

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ELEKTRİK ÜRETİMİ
AÇISINDAN İNCELENMESİ VE MODELLEMESİ**

HAZIRLAYAN

DİCLE OLUKLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2021

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ELEKTRİK ÜRETİMİ
AÇISINDAN İNCELENMESİ VE MODELLEMESİ**

HAZIRLAYAN

DİCLE OLUKLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŐMANI

PROF.DR. YUSUF TANSEL İÇ

ANKARA - 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Dicle OLUKLU tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 25 / 05 / 2021

Tez Adı: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi Açısından İncelenmesi ve Modellemesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL, Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet GÜLŞEN, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk Elaldı
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü
Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 03 / 06 / 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı : Dicle OLUKLU

Öğrencinin Numarası : 21820195

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği

Programı : Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Tez Başlığı : Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi Açısından İncelenmesi ve Modellemesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 59 sayfalık kısmına ilişkin, 30/05/2021 tarihinde tez danışmanım tarafından “turnitin” adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %10’dur. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

TEŐEKKÜR

GerçekleőtirmiŐ olduğum tez çalıŐmasının her aŐamasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, yardım ve katkılarını hiç eksik etmeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf Tansel İ'e,

Deđerli katkılarından dolayı tez jüri başkanı Sayın Prof. Dr. Mustafa Yurdakul ve jüri üyesi Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Gülşen'e,

Her zaman ve her koşulda yanımda olarak maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bugünlere gelmemde büyük katkıları olan annem, babam ve abime,

Son olarak, hep birlikte olduğumuz gibi bu çalıŐmamda da varlıklarını ve desteklerini her daim hissettiren arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Dicle OLUKLU

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ELEKTRİK ÜRETİMİ AÇISINDAN İNCELENMESİ VE MODELLEMESİ.

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Ülkeler, gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine yönelik sermaye yatırımlarını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Karar vericiler, yenilenebilir elektrik enerjisi kaynaklarıyla ilgili yatırım kararları verirken kWh başına maliyet, yenilenebilirlik, toplam elektrik üretim kapasitesi sürdürülebilirliği, arz güvenliği, talep ve bütçe kısıtlamaları gibi çeşitli kriterleri göz önünde bulundurmalıdır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji alternatiflerini sıralamak yerine, yenilenebilir enerji kaynaklarının en iyi üretim miktarlarını ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kaynağın talebe göre en iyi yatırım düzeyini hesaplamak için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Çalışmada Türkiye için bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. En iyi sonucun elde edilmesinde, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) yöntemi ile doğrusal programlama (DP) modelinin bir kombinasyonu kullanılmaktadır. Geliştirilen modelinin uygulanabilirliği bu çalışmada gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Elektrik Enerjisi Kaynakları, Elektrik Enerjisi Planlaması, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), TOPSIS, Doğrusal Programlama (DP).

ABSTRACT

Dicle OLUKLU

REVIEW AND MODELING OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN TERMS OF ELECTRICITY GENERATION.

Başkent University Institute of Science

Industrial Engineering Department

The countries want to improve capital investments in electricity generation from renewable energy sources in the future. The decision-makers should consider various criteria such as the cost per kWh, renewability, total electricity generation capacity, sustainability, supply security, demand, and budget constraints when making investment decisions related to renewable electrical energy resources. In this study, instead of ranking the renewable energy alternatives, a mathematical model is developed for calculating the optimal amounts of the renewable energy sources and their optimal investment level according to the source's desirability compared with other renewable energy sources. We propose a case study for Turkey. A combination of approaches Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) and linear programming (LP) model is used in obtaining an optimal result. The developed model's applicability is illustrated in this study.

Keywords: Renewable Electrical Energy Sources, Electrical Energy Planning, Multi Criteria Decision Making (MCDM), TOPSIS, Linear Programming (LP).

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLER.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
3. DÜNYADA YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI.....	4
4. ÜLKEMİZDE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI	8
5. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME VE TOPSİS METODU.....	12
5.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri.....	12
5.2. Yöntem Seçimi.....	14
6. UYGULAMA	16
6.1. TOPSİS (Technique for Order Preference by Similarity)	16
6.1.1. Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması.....	16
6.1.2. Adım 2: Standart Karar Matrisinin Oluşturulması.....	16
6.1.3. Adım 3: Ağırlıklı Standart Karar Matrisinin Oluşturulması	17
6.1.4. Adım 4: Pozitif ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Hesaplanması.....	18
6.1.5. Adım 5: Pozitif ve Negatif İdeal Değerlere Uzaklığın Hesaplanması	18
6.1.6. Adım 6: İdeal Çözüme Göre Yakınlık Katsayılarının Hesaplanması	19
6.2. TOPSİS Yöntemi ile Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Değerlendirilmesi	19
6.2.1. Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Belirlenmesi.....	19
6.2.2. Yenilenebilir Enerji Sistemleri Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi	20
6.2.3. Karşılaştırma Matrisinin Oluşturulması.....	23

6.2.4.	TOPSIS Yönteminin Uygulanması	24
6.3.	Matematiksel Model	27
6.3.1.	Kümeler ve İndisler	27
6.3.2.	Parametreler	27
6.3.3.	Karar Değişkenleri	28
6.3.4.	Matematiksel Model.....	29
7.	TARTIŞMA.....	32
7.1.	Senaryo Analizi	32
7.2.	Benzer Çalışmaların Karşılaştırılması ve Alternatiflerin Değerlendirmesi..	33
7.2.1.	Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Öncelik Sıralarının Belirlenmesi	35
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	36
	KAYNAKLAR.....	37
	EKLER	41
	EK A. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Üretimi (1990-2020) (GWh).....	41
	EK B. Hidroelektrik Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh) ...	42
	EK C. Rüzgâr Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	43
	EK D. Güneş Enerjisi Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)	44
	EK E. Jeotermal Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	45
	EK F. Excel Solver Sonuçları	46

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1. Yenilenebilir Kaynaklı Kurulu Gücün Gelişimi (MW) (TEİAŞ, 2021)	9
Tablo 2. Analiz Edilen Yenilenebilir Güç Santral Tipleri.....	20
Tablo 3. Enerji Tedarik Sistemlerinin Tipik Değerlendirme Kriterleri.....	20
Tablo 4. Değerlendirme Kriterleri	21
Tablo 5. Karşılaştırma Matrisi.....	23
Tablo 6. Karar Matrisi	24
Tablo 7. Standart Karar Matrisi	24
Tablo 8. Ağırlıklı Standart Karar Matrisi (V).....	25
Tablo 9. Alternatiflerin TOPSIS Metodu ile Sıralaması	26
Tablo 10. Birim Maliyetler ve TOPSIS Skorları.....	27
Tablo 11. Alternatifler için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)	28
Tablo 12. Diğer Parametreler	28
Tablo 13. Optimal Yenilenebilir Enerji Kapasiteleri (GWh)	30
Tablo 14. Sürdürülebilir Üretim için Belirlenen Yeni Kriter Ağırlıkları	32
Tablo 15. Yeni Ağırlıklar için TOPSIS Skorları	32
Tablo 16. 2025 Yılı için Optimal Yenilenebilir Enerji Kapasiteleri (GWh).....	33
Tablo 17. Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Öncelik Sıralarının Belirlenmesi	35
Tablo 18. Yenilenebilir Enerji Üretimi (GWh) (TEİAŞ, 2021)	41
Tablo 19. Hidroelektrik Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	42
Tablo 20. Rüzgâr Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	43
Tablo 21. Güneş Enerjisi Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	44
Tablo 22. Jeotermal Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	45
Tablo 23. Excel Solver Duyarlılık Raporu	46
Tablo 24. Excel Solver Yanıt Raporu.....	47

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. Yenilenebilir Kaynaklardan Birincil Enerji Payı (BP, 2020).....	4
Şekil 2. Yenilenebilir Kaynaklardan Elektrik Üretiminin Payı (BP, 2020).	5
Şekil 3. Hidroelektrik Üretimi (BP, 2020)	5
Şekil 4. Rüzgâr Enerjisi Üretimi (BP, 2020)	6
Şekil 5. Güneş Enerjisi Üretimi (BP, 2020)	6
Şekil 6. Kurulu Jeotermal Enerji Kapasitesi (BP, 2020)	7
Şekil 7. Yenilenebilir Kurulu Gücün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ, 2021)	8
Şekil 8. Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (TEİAŞ, 2021). 10	
Şekil 9. Türkiye'nin Yenilenebilir Elektrik Üretimi (TEİAŞ, 2021)	11
Şekil 10. Çok Kriterli Karar Verme Süreci Basamakları	12
Şekil 11. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Sınıflandırılması	13
Şekil 12. Yenilenebilir Enerjide Kullanılan ÇKKV Çalışmaları.....	14
Şekil 13. Enerji Planlama Çalışmalarında ÇKKV Yaklaşımlarının Yüzdesele Dağılımı.....	15
Şekil 14. Optimal Yenilenebilir Enerji Kapasiteleri (GWh)	30
Şekil 15. Yenilenebilir Enerji Katkılarının Yıllara Göre Dağılım Yüzdesi (Aksoy vd., 2020).....	34
Şekil 16. Yenilenebilir Enerji Katkılarının Yıllara Göre Dağılım Yüzdesi	34
Şekil 17. Hidroelektrik Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)	42
Şekil 18. Rüzgâr Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh).....	43
Şekil 19. Güneş Enerjisi Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)	44
Şekil 20. Jeotermal Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)	45
Şekil 21. Excel Solver Kullanıcı Arayüzü.....	46

1. GİRİŞ

Son dönemde hem endüstriyel sistemlerde hem de günlük hayattaki artan gereksinimler enerjiye olan talebi artırmıştır. Enerji talebinin yükselmesi sonucunda ise çevreye duyarlı enerji sistemlerinin geliştirilmesi bir zorunluluk halini almıştır. Çevreye duyarlılık açısından en problemlili alan fosil yakıtların kullanıldığı enerji kaynaklarıdır. Bu nedenle son yıllarda yenilenebilir enerjiye olan ihtiyaçlar hem sosyal hem de ekonomik nedenlere bağlı olarak hızla yükselmektedir. Diğer taraftan, yenilenebilir enerji kaynaklarından istenen verimde enerjinin karşılanabilmesi için ciddi yatırımlara ihtiyaç bulunmaktadır. Hem çevreye duyarlı hem de ekonomik ve düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım kararı alınması için karmaşık yapıdaki problemlerin çözümüne ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Söz konusu problemin yapısı iki aşamalı olarak ele alınmalıdır. Öncelikle alternatiflerin teknik, ekonomik ve sosyal kriterlere göre değerlendirilmesi, sonrasında hangi alternatife ne kadar yatırım yapılması gerektiğinin belirlenmesi için bir matematiksel modelin kurulması şeklinde bir yol izlenmesi gerekir.

Bu çalışmada ilk olarak Türkiye'nin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynakları incelenmiş ve mevcut durum ortaya konmuştur. İkinci aşamada ise mevcut verilerden yararlanılarak geleceğe yönelik projeksiyonlar ilgili kurumların internet sitelerindeki dokümanlardan ve literatürdeki kaynaklardan derlenmiştir. Ardından TOPSIS yöntemi ile yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralama puanları elde edilmiştir. Sıralama puanları matematiksel modelin amaç fonksiyonu girdisi olarak alınmış ve diğer teknik kısıtlar ışığında gelecek dönemde hangi alternatife ne kadar yatırım yapılması gerektiğini belirleyecek bir matematiksel model kurulmuştur. Son olarak farklı senaryo analizleri ışığında farklı kriter ağırlıklarıyla hesaplanan farklı TOPSIS puanları ile çözülen matematiksel model sonuçları ışığında önerilerde bulunulmuştur.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yenilenebilir enerji alternatiflerinin değerlendirilmesi için farklı kriterlerin ele alınması ve her bir kriterin sonuç üzerindeki etkisini yansıtabilecek tarzda bir değerlendirme yapılması gerekmektedir (Tsoutsos vd., 2009). Literatürde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar kronolojik bir çerçevede aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır:

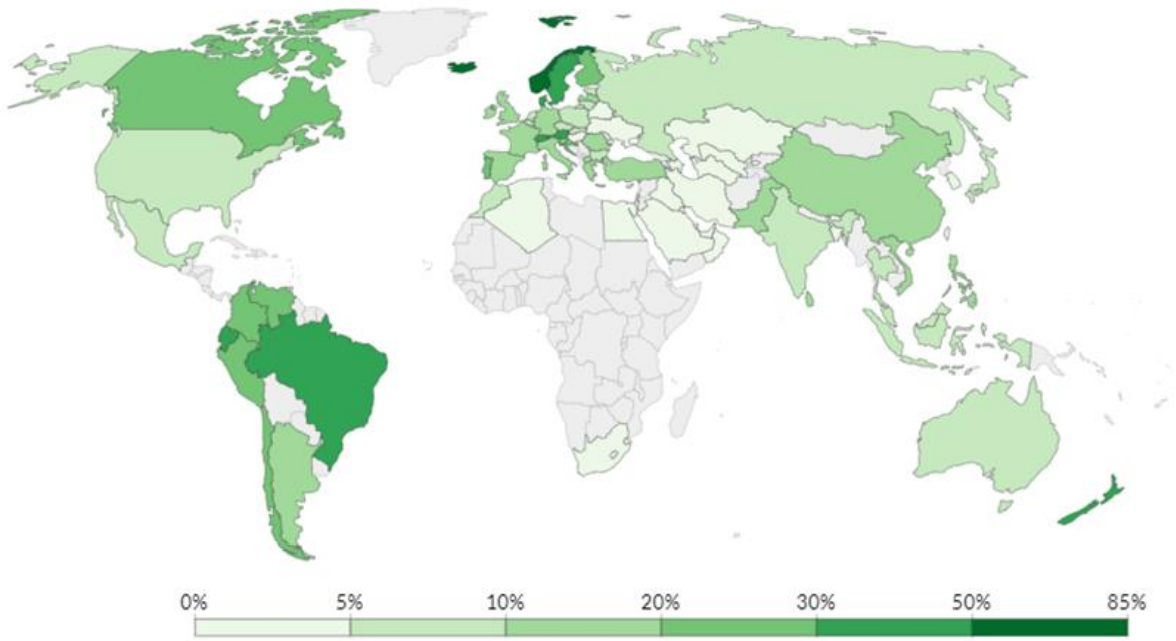
- Hamalainen ve Karjalainen (1992): AHP yöntemi ile Finlandiya'nın enerji politikalarının belirlenmesine yönelik bir karar destek aracı sunmuşlardır.
- Mavrotas vd. (1999): Çok amaçlı doğrusal programlama yöntemi ile Yunanistan elektrik üretim sektörü için bir planlama modelinin geliştirilmesi çalışmasını gerçekleştirmişlerdir.
- Afgan ve Carvalho (2002): Enerji kaynaklarını, çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerini dikkate alarak sürdürülebilir enerji sistemleri özelinde değerlendirmişlerdir.
- Kabir ve Shihan (2003): AHP yöntemini kullanarak yenilenebilir enerji alternatiflerini kendi aralarında sıralamışlardır.
- Polatidis ve Haralambopoulos (2004): Yunanistan örneğinde yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanmasını gerçekleştirmiştir.
- Topcu ve Ulengin (2004): Türkiye'de elektrik üretim alternatiflerini seçmek amacı ile bir karar destek sistemini geliştirmiştir.
- Ertay ve Kahraman (2013): MACBETH ve AHP yöntemlerini birleştirerek Türkiye için yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanmasına yönelik bir çok kriterli karar verme modeli önermişlerdir.
- Çelikkalek ve Tüysüz (2016): Gri sistem tabanlı DEMATEL-VIKOR-ANP yöntemlerini kullanarak Türkiye için beş farklı yenilenebilir enerji kaynağı içerisinde bir seçim çalışması gerçekleştirmişlerdir.
- Haddad, Liqid ve Ferreira (2017): AHP yöntemi ile rüzgâr enerji santrallerinin (RES) uzman görüşlerine dayanarak değerlendirilmesini gerçekleştirmiştir.
- Kumar vd. (2017): Gerçekleştirdikleri literatür taramasında gelecekte potansiyel uygulama alanları ile ilgili bir bakış açısı önererek, ÇKKV tekniği ile sürdürülebilir enerji alanında kapsamlı bir inceleme sunmuşlardır.

- Algarín vd. (2017): Kolombiya'nın Karayip bölgesindeki kırsal alanlar için yenilenebilir enerji planlama sürecinde karar vermeyi desteklemek için bir AHP uygulamasını sunmuştur.
- Mirjat vd. (2018): Uzun vadeli elektrik planlaması için enerji modelleme sonuçlarının sürdürülebilirlik açısından değerlendirmesinde AHP metodolojisini kullanmıştır.
- Katal ve Fazelpour (2018): İran'daki elektrik santrallerin uygunluğunun tespit edilmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden faydalanmışlardır.
- Bhowmik vd. (2018): Önceden belirlenen bir alternatifler kümesinden sürdürülebilir enerji planlaması için en iyi yeşil enerji kaynaklarının belirlenmesi amacı ile SWOT analizine dayalı bir TOPSIS yöntemini kullanmışlardır.
- Yurdakul ve İç (2019): Yenilenebilir enerji kaynakları için bulanık TOPSIS yönteminden faydalanarak bir tarif planlaması modellemesi sunmuşlardır.
- Rani vd. (2020): Bulanık TOPSIS yöntemiyle yenilenebilir enerji alternatiflerini seçmek için bir ÇKKV modeli sunmuşlardır.
- Wang vd. (2020): SWOT analizi temeline dayanan bulanık AHP yöntemini kullanarak Pakistan için yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçimini gerçekleştirmişlerdir.
- Yücenur vd. (2020): SWARA ve COPRAS yöntemleriyle biyogaz tesisi kurulumu için uygun yerleşim alanı seçimine yönelik bir çok kriterli karar verme modeli önermişlerdir.
- Alkan ve Albayrak (2020): COPRAS ve bulanık çoklu MOORA yöntemi ile Türkiye'deki enerji alternatiflerini sıralamışlardır.

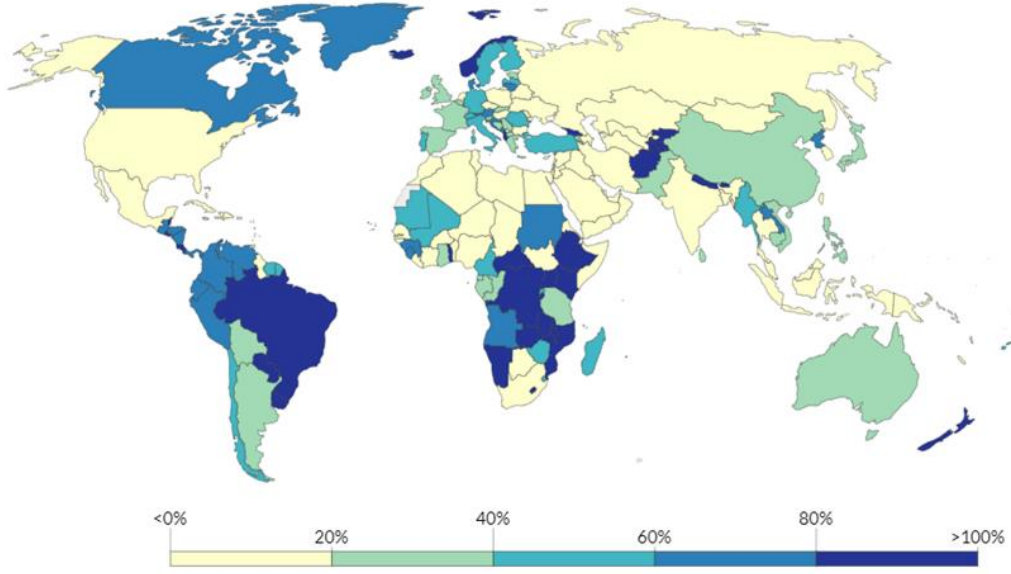
Literatür taramasından görüldüğü üzere, çok kriterli karar verme yöntemleri yenilenebilir enerji alternatiflerinin değerlendirilmesi, seçimi ve modellenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. ÇKKV yöntemleri içinde TOPSIS yöntemi ise kolay modellenebilme ve esnek bir yapıya sahip olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında öncelikle yenilenebilir enerji alternatifleri kendi arasında teknik, sosyal ve ekonomik kriterlere göre sıralanacaktır. Ardından sıralama puanları geliştirilecek bir matematiksel modelin amaç fonksiyonu katsayıları olarak kullanılacak ve geleceğe yönelik tahminler doğrultusunda elde edilecek teknik ve ekonomik kısıtlar doğrultusunda hangi enerji alternatifine ne kadar yatırım yapılması gerektiğine dair analiz sonuçları sunulacaktır.

3. DÜNYADA YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI

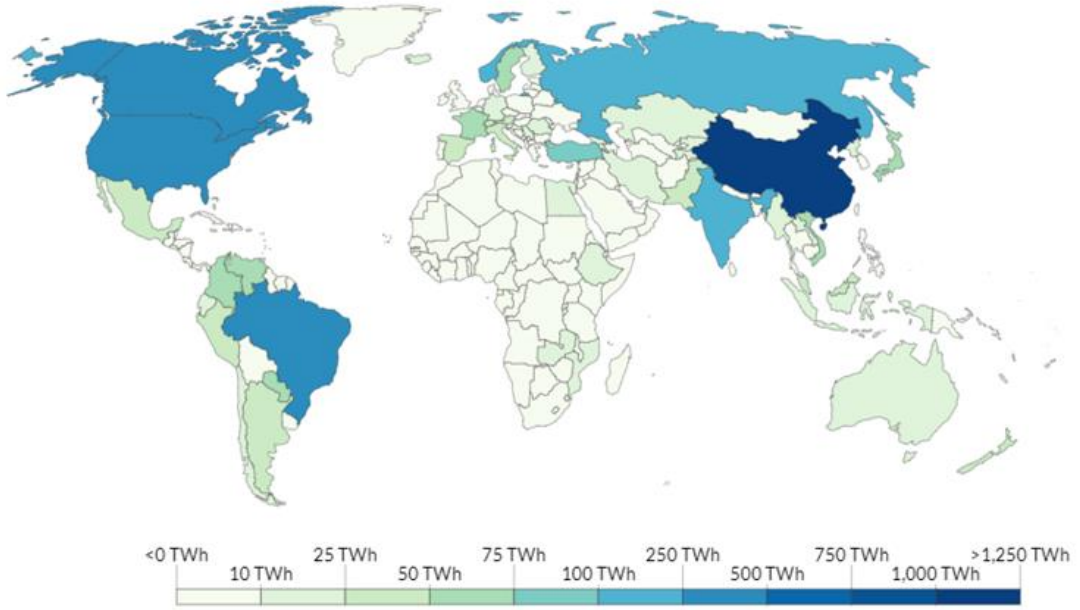
Giriş bölümünde de vurgulandığı üzere, fosil yakıtlara bağlı olarak doğaya salınan karbonun azaltılması ve böylece sera gazı miktarının en düşük seviyeye indirilebilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji miktarının artırılması büyük önem arz etmektedir. Yenilenebilir teknolojilerin hızlı büyümesine yönelik çok sayıda araştırma yürütülmekte ve bu konular ile ilgili çok sayıda rapor yayınlanmaktadır. Aşağıda BP (British Petrol Company) tarafından yayınlanan ve yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya genelindeki kullanımına ilişkin fikirler veren grafiklere yer verilmektedir (Şekil 1-6) (BP, 2020).



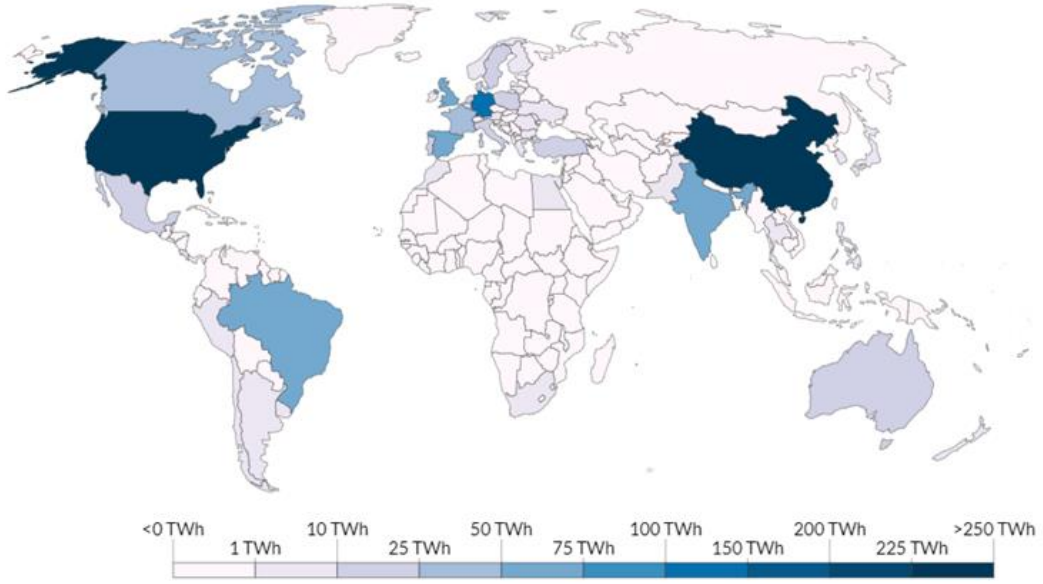
Şekil 1. Yenilenebilir Kaynaklardan Birincil Enerji Payı (BP, 2020).



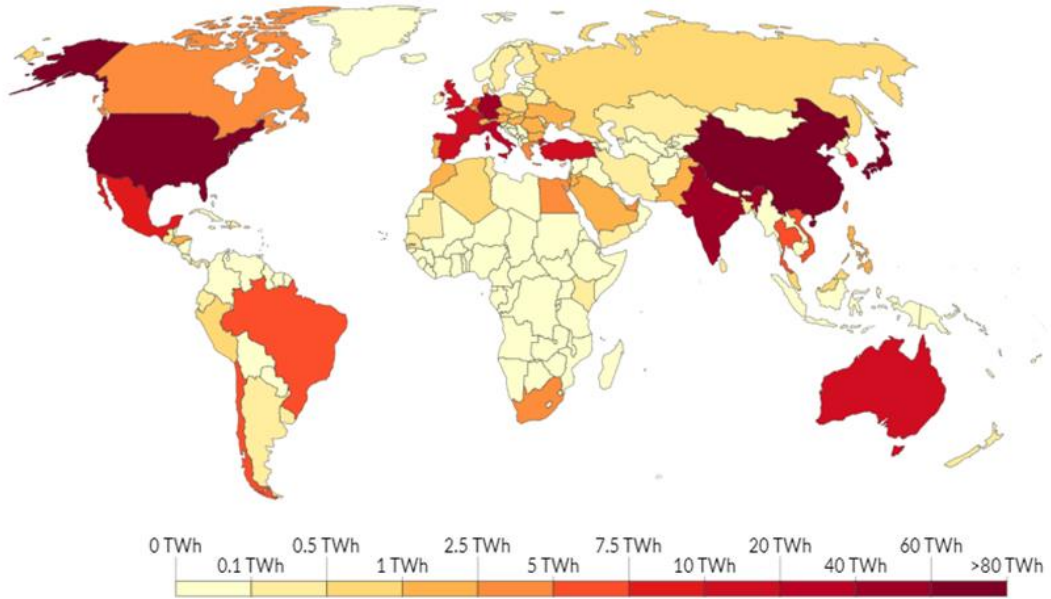
Şekil 2. Yenilenebilir Kaynaklardan Elektrik Üretiminin Payı (BP, 2020).



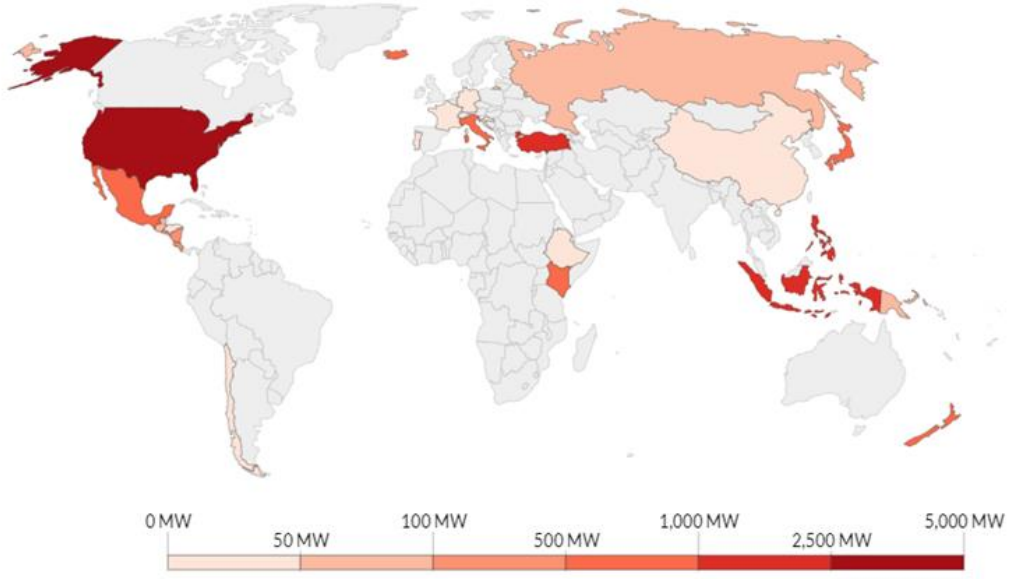
Şekil 3. Hidroelektrik Üretimi (BP, 2020)



Şekil 4. Rüzgâr Enerjisi Üretimi (BP, 2020)



Şekil 5. Güneş Enerjisi Üretimi (BP, 2020)

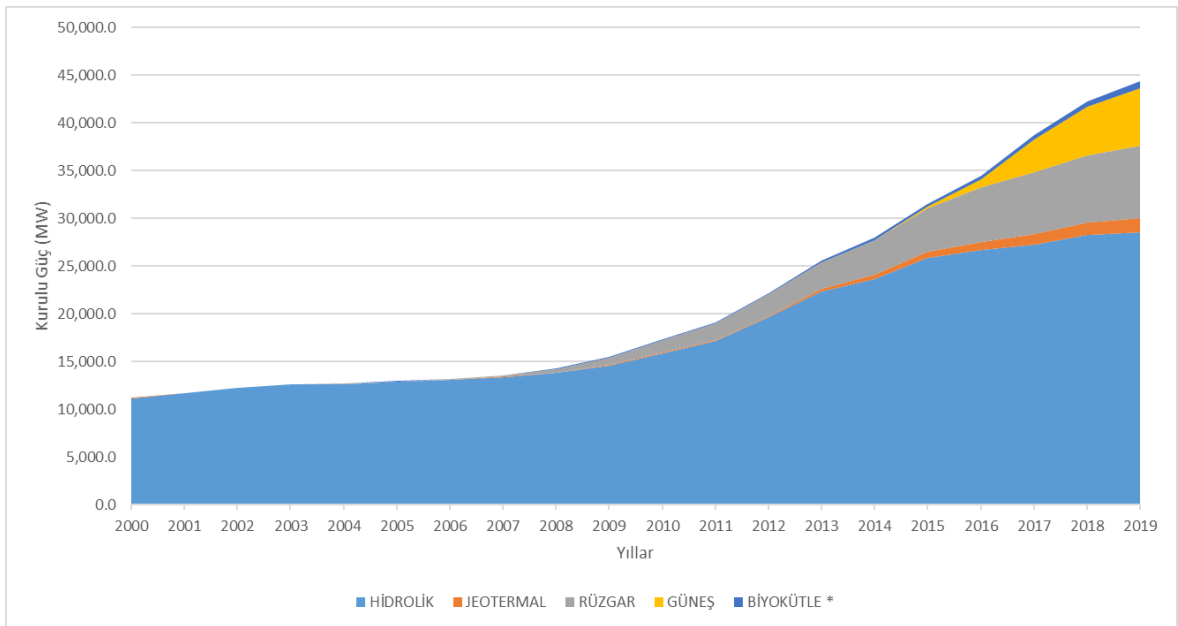


Şekil 6. Kurulu Jeotermal Enerji Kapasitesi (BP, 2020)

Şekil 1-6 incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanma düzeylerinin, yenilenebilir enerji kaynağı bazında yoğunlaşmalarının dünyanın farklı bölgelerinde olduğu net olarak izlenebilmektedir. Ancak makul düzeyde yoğunlaşmaların sınırlı olduğu ve dünya geneline yaygınlaştırılabilecek bir potansiyelin mevcudiyeti de görülebilmektedir.

4. ÜLKEMİZDE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI

Türkiye'de farklı yenilenebilir enerji alternatifleri olmasına rağmen; özellikle hidroelektrik santraller yaygın olarak kullanılmakta ve ortalama elektrik üretiminin yaklaşık olarak beşte biri bu kaynaktan sağlanmaktadır. Ancak hidroelektrik üretimi kuraklık dönemlerinden çok olumsuz olarak etkilenmekte ve bu durum hidroelektrik santrallerin gelecek yıllarda tüm dünyada ve Türkiye'de yaşanması muhtemel kuraklık karşısında dezavantajlı duruma düşürmektedir. Türkiye'nin 2023 yılına dair en önemli hedeflerinden biri, üretilen elektriğin üçte ikisinin yenilenebilir kaynaklardan karşılanmasıdır. Ancak, Türkiye güneş ve rüzgâr enerjisi kullanımında benzer durumda olan ülkelere göre daha az yatırım gerçekleştirmiştir. Bu nedenle ülkenin özellikle kısa ve orta vadede ulaşım, sanayi, ısıtma ve soğutmanın yanı sıra elektrik üretimini de içeren bir yenilenebilir enerji planına ihtiyacı bulunmaktadır. Türkiye'deki hidroelektrik, en büyük yenilenebilir elektrik kaynağıdır ve 2021'de elektriğin %29'unu hidroelektrik santrallerden ve %14'ünü ise diğer yenilenebilir kaynaklardan üretebilmiştir (TEİAŞ, 2021). Türkiye'de jeotermal enerji ağırlıklı olarak ısınma için kullanılmaktadır. Ülkenin güney bölgelerinde güneş enerjisi üretiminin ve batı bölgelerinde ise rüzgâr enerjisi üretiminin büyük ölçüde artırılmasıyla, enerji talebinin önemli bir kısmı yenilenebilir kaynaklardan karşılanabilir hale getirilebilir potansiyeli bulunmaktadır. Şekil 7 ve Tablo 1'de yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllar içindeki gelişimi görülmektedir (TEİAŞ, 2021).

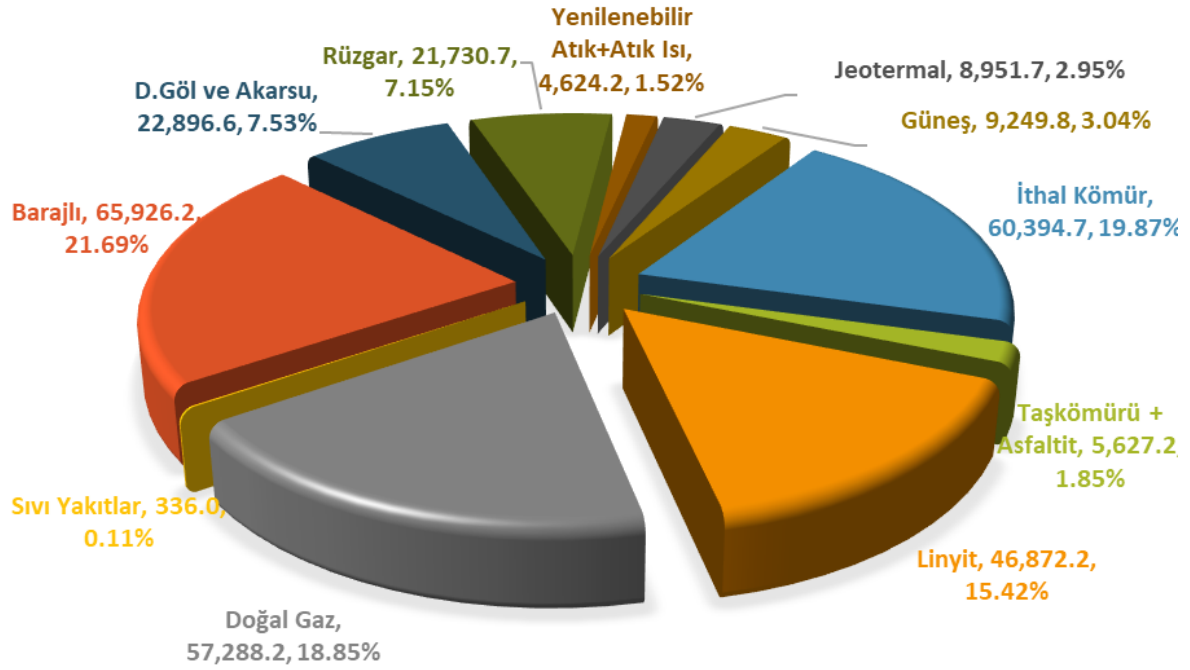


Şekil 7. Yenilenebilir Kurulu Gücün Yıllar İtibariyle Gelişimi (TEİAŞ, 2021)

Tablo 1. Yenilenebilir Kaynaklı Kurulu Gücün Gelişimi (MW) (TEİAŞ, 2021)

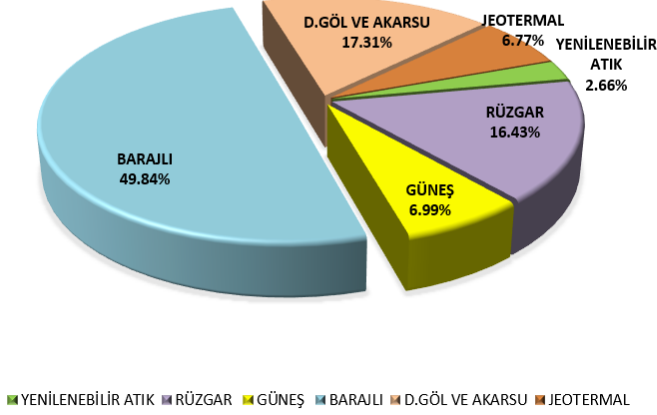
Yıllar	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgâr	Güneş	Biyokütle	Yenilenebilir Kurulu Gücü	Türkiye Toplam Kurulu Gücü	Yenilenebilir Payı %
2000	11,175.2	17.5	18.9		10.0	11,221.6	27,264.1	41.2
2001	11,672.9	17.5	18.9		10.0	11,719.3	28,332.4	41.4
2002	12,240.9	17.5	18.9		13.8	12,291.1	31,845.8	38.6
2003	12,578.7	15.0	18.9		13.8	12,626.4	35,587.0	35.5
2004	12,645.4	15.0	18.9		13.8	12,693.1	36,824.0	34.5
2005	12,906.1	15.0	20.1		13.8	12,955.0	38,843.5	33.4
2006	13,062.7	23.0	59.0		19.8	13,164.4	40,564.8	32.5
2007	13,394.9	23.0	147.5		21.2	13,586.6	40,835.7	33.3
2008	13,828.7	29.8	363.7		38.2	14,260.4	41,817.2	34.1
2009	14,553.3	77.2	791.6		65.0	15,487.1	44,761.2	34.6
2010	15,831.2	94.2	1,320.2		85.7	17,331.3	49,524.1	35.0
2011	17,137.1	114.2	1,728.7		104.2	19,084.2	52,911.1	36.1
2012	19,609.4	162.2	2,260.6		147.3	22,179.5	57,059.4	38.9
2013	22,289.0	310.8	2,759.7		178.0	25,537.5	64,007.5	39.9
2014	23,643.2	404.9	3,629.7	40.2	227.0	27,945.0	69,519.8	40.2
2015	25,867.8	623.9	4,503.2	248.8	277.1	31,520.8	73,146.7	43.1
2016	26,681.1	820.9	5,751.3	832.5	363.8	34,449.6	78,497.4	43.9
2017	27,273.1	1,063.7	6,516.2	3,420.7	477.4	38,751.1	85,200.0	45.5
2018	28,291.4	1,282.5	7,005.4	5,062.8	621.9	42,264.0	88,550.8	47.7
2019	28,503.0	1,514.7	7,591.2	5,995.2	791.3	44,395.3	91,267.0	48.6

Şekil 8’de Türkiye’deki santrallerin 2019 yılındaki üretimleri ve toplam üretimdeki payları verilmiştir. Burada barajlı hidroelektrik santrallerinin %21,69, göl ve akarsu hidroelektrik santrallerinin %7,53, rüzgâr santrallerinin %7.15, jeotermal santrallerin %2,95 ve güneş santrallerinin %3,04’lük bir paya sahip oldukları görülmektedir (TEİAŞ, 2021).



Şekil 8. Türkiye Elektrik Enerjisi Üretimine Kaynaklara Göre Dağılımı (TEİAŞ, 2021)

Şekil 9’da Türkiye’nin yenilenebilir enerjisi üretimi gösterilmiştir. 2019 yılı için yıllık elektrik üretiminin %43,53’lük kısmının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı görülmektedir (TEİAŞ, 2021).



	GWh	%
YENİLENEBİLİR ATIK	3.522,7	2,66
RÜZGAR	21.730,7	16,43
GÜNEŞ	9.249,8	6,99
BARAJLI	65.926,2	49,84
D.GÖL VE AKARSU	22.896,6	17,31
JEOTERMAL	8.951,7	6,77
TOPLAM	132.277,8	100,00

	GWh	%
YENİLENEBİLİR TOPLAM	132.277,8	43,53
TÜRKİYE TOPLAM	303.897,6	100

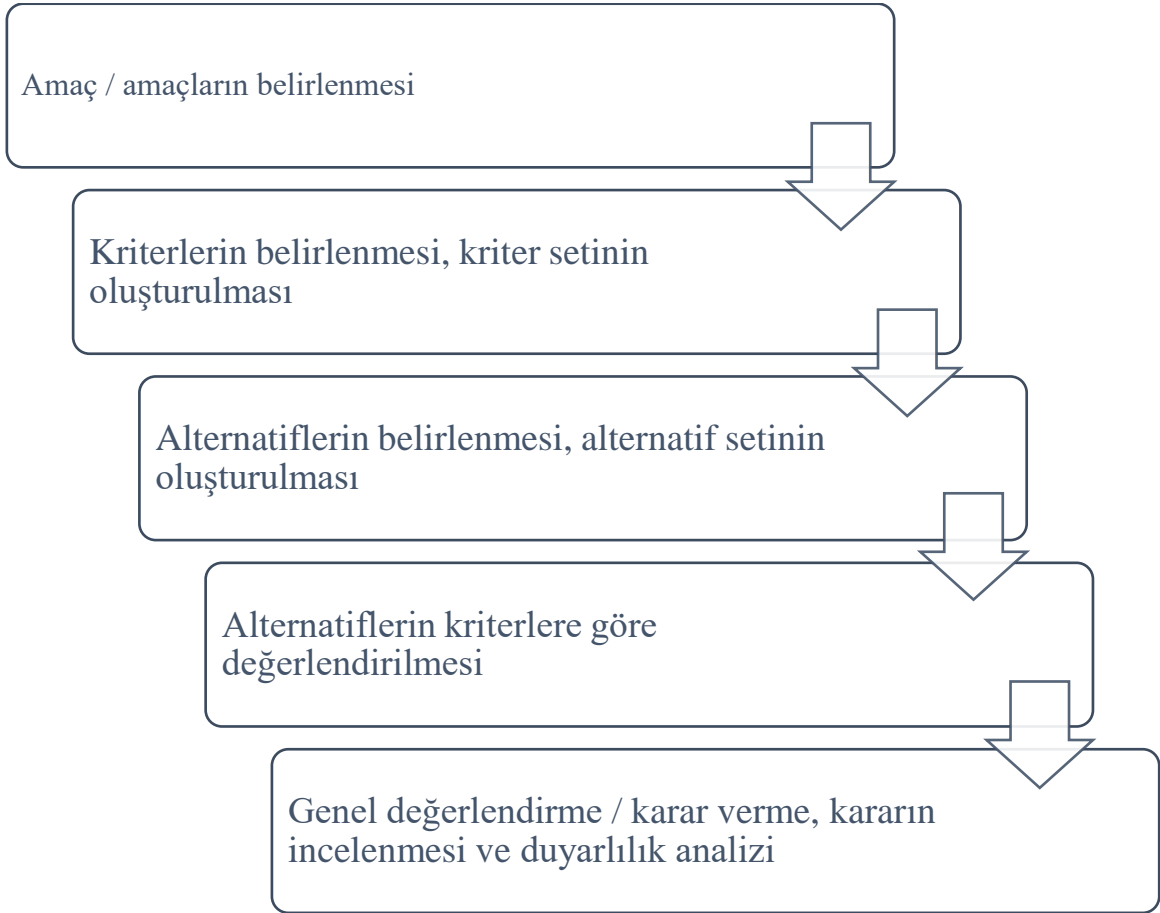
Şekil 9. Türkiye'nin Yenilenebilir Elektrik Üretimi (TEİAŞ, 2021)

Sonuç olarak, Türkiye halihazırda elektrik üretiminin %43,53'ünü yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Ancak ülkenin stratejik hedefleri arasında yenilenebilir enerji katkısının %66'ya çıkarılması hedeflenmektedir. Bu hedeflere ulaşabilmek için yenilenebilir enerji yatırımlarına ilişkin etkin bir planlama yapılması önem arz etmektedir. Bu hedef doğrultusunda bu tez çalışmasında gelecek dönemlerde hangi yenilenebilir enerji kaynağına ne ölçüde yatırım yapılmasının daha uygun olacağına dair bir model önerilmektedir. Modele ilişkin detaylar sonraki bölümlerde sunulmuştur.

5. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME VE TOPSIS METODU

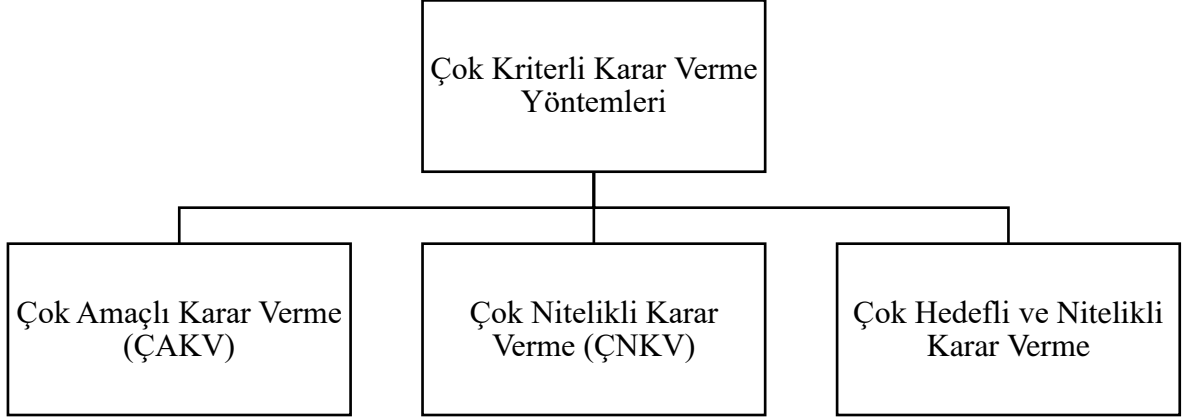
5.1. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

ÇKKV problemlerinde çözüme ulaşmak için genellikle beş adım izlenir: Hedefin belirlenmesi, kriterlerin belirlenmesi, alternatiflerin belirlenmesi, karar vericinin tercihlerinin ortaya konması, sıralama sonuçlarının belirlenmesi (Wang vd., 2009; Mateo, 2012) (Şekil 10).



Şekil 10. Çok Kriterli Karar Verme Süreci Basamakları

ÇKKV yöntemlerine ilişkin gruplandırma ise Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Sınıflandırılması

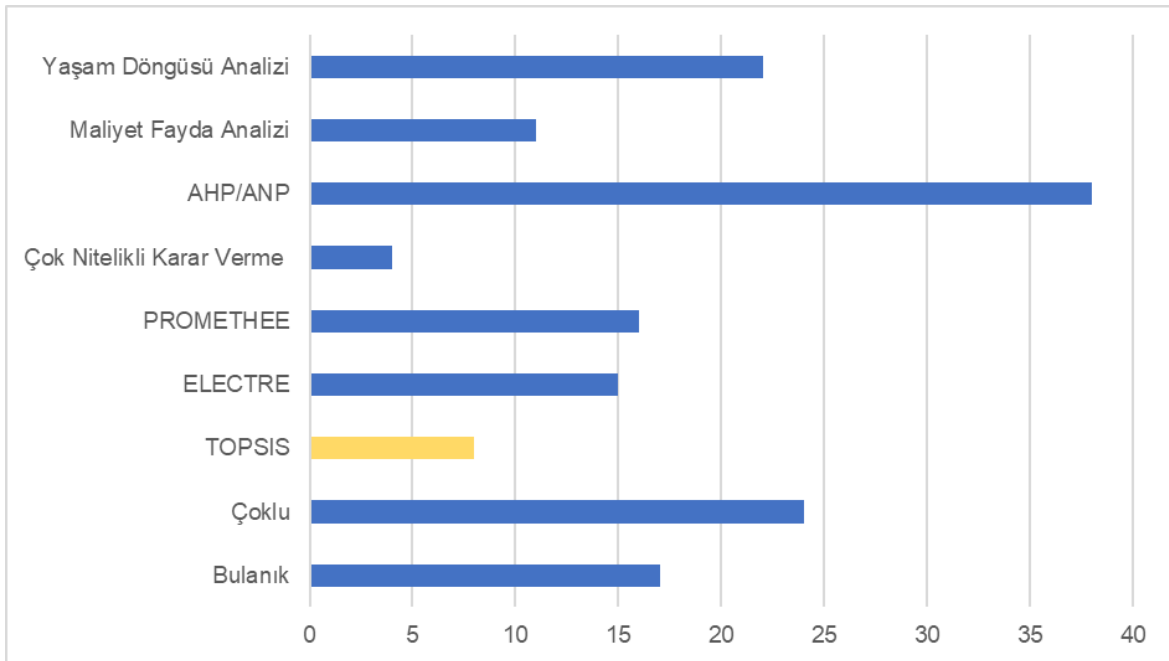
Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV) yönteminde belirlenen alternatifler matematiksel modelleme yöntemi kullanılarak analiz edilerek en iyi çözüm bulunmaya çalışılır. Temel hedef birden fazla amacı en iyi sağlayan çözümü bulmak ve karar vericiye sunmaktır. Bu amaçla kullanılan en önemli yöntemler Çok Amaçlı Doğrusal Programlama, Uzlaşık Programlama ve Hedef Programlama yöntemleridir.

Çok Nitelikli Karar Verme (ÇNKV) yönteminde alternatifler sonlu sayıdadır ve dolayısı ile bu yöntem kesikli karar verme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Alternatifler önceden belirlenir ve daha sonra yöntemin belirlenen alternatiflerden en iyi olanı seçmesi hedeflenir. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler ise aşağıda sıralanmıştır:

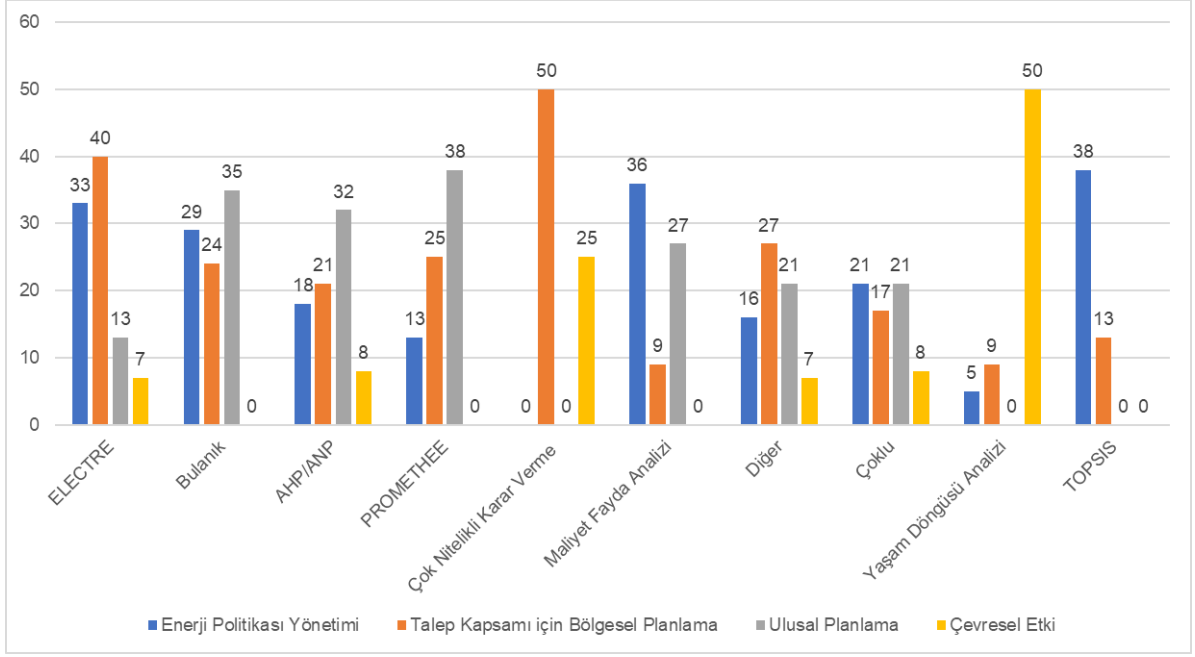
- Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP),
- TOPSIS,
- Gri İlişkisel Analiz,
- Analitik Ağ Prosesi (AAP),
- Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MOORA),
- Çok Kararlı Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü (VIKOR),
- Kategorik Tabanlı bir Değerlendirme Tekniği ile Çekiciliği Ölçme (MACBETH),
- Zenginleşen Değerlendirmeler İçin Tercih Sıralaması (PROMETHEE).

5.2. Yöntem Seçimi

Abu-Taha (2011), yenilenebilir enerji kaynaklarını; yenilenebilir enerji planlama ve politikaları, yenilenebilir enerji değerlendirme, proje seçimi ve çevre gibi konularda değerlendirmiştir. Bu amaçla en yaygın olarak kullanılan ÇKKV teknikleri olarak; AHP/ANP, PROMETHEE, SIMUS, TOPSIS, UTADIS, ELECTRE, VIKOR, SWA ve değer ağaçları yöntemlerini sıralamıştır. Ayrıca bazı çalışmalar bu teknikleri bulanık bir ortamda uygulamıştır. Araştırmacılar enerji kaynaklarını değerlendirmek için çeşitli ÇKKV yaklaşımları kullansa da, TOPSIS, literatürdeki alternatif enerji kaynaklarının sıralanmasında daha az tercih edilen bir yaklaşımdır (Strantzali ve Aravossis 2016). Strantzali ve Aravossis (2016), yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji alanında iki yüz karar verme modelini gözden geçirmiştir. Şekil 12 ve **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**, TOPSIS'in temelde yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde çok tercih edilen bir ÇKKY yaklaşımı olmadığını, aksine tüm farklı disiplinlerde yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 12. Yenilenebilir Enerjide Kullanılan ÇKKV Çalışmaları
(Strantzali ve Aravossis, 2016)



Şekil 13. Enerji Planlama Çalışmalarında ÇKKV Yaklaşımlarının Yüzdesele Dağılımı

(Strantzali ve Aravossis, 2016; Yurdakul ve İç, 2019).

Bu çalışmada, diğer alanlarda başarılı olarak uygulanan TOPSIS yönteminin yenilenebilir enerji alternatiflerinin sıralanması probleminde kullanılması benimsenmiştir. Amaç farklı yenilenebilir enerji alternatifleri arasında belirlenen kriterler doğrultusunda bir sıralama oluşturmak ve daha sonra bu sıralamayı kullanarak geleceğe yönelik yenilenebilir enerji yatırımlarını doğrusal programlama yöntemi ile belirlemektir.

6. UYGULAMA

6.1. TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity)

TOPSIS metodu 1980 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen bir ÇNKV yöntemidir ve kolay uygulanabilmesi nedeni ile çok geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Yöntemin uygulama adımları aşağıda verilmiştir (Chiranjib vd., 2018):

6.1.1. Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

Alternatifler ve değerlendirme kriterleri belirlendikten sonra, karar verici tarafından $n \times m$ boyutunda bir karar matrisi oluşturulur. Bu matriste n adet alternatif (karar seçeneği) ve m adet de değerlendirme kriteri bulunmaktadır (Chiranjib vd., 2018).

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdot & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdot & d_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdot & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

D karar matrisinde satırlar alternatif karar seçeneklerini ve sütunlar değerlendirme kriterlerine karşılık gelmektedir. D matrisinde her bir d_{ij} , i alternatifinin j değerlendirme kriterine göre mevcut performansını göstermektedir.

6.1.2. Adım 2: Standart Karar Matrisinin Oluşturulması

D karar matrisinde her bir değerlendirme kriterine ait değerlerin kareleri toplamı alınarak bu sütunda bulunan her bir eleman bu değere bölünerek standart karar matrisi oluşturulur. Eğer D karar matrisinde herhangi bir elemanın değeri 0 ise standart karar matrisinde de sıfırdır. Normalize edilmiş karar matrisi aşağıdaki gibi elde edilir (Chiranjib vd., 2018):

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdot & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdot & r_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdot & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

R standart karar matrisindeki her bir r_{ij} değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ ve } j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

6.1.3. Adım 3: Ağırlıklı Standart Karar Matrisinin Oluşturulması

İlk olarak her bir değerlendirme kriteri için ağırlık değerleri (w_j) belirlenir. Burada önemli olan nokta $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ şartının sağlanmasıdır. Bu ağırlıklandırma işlemi TOPSIS yönteminin sübjektif olarak belirlenen aşamasıdır. Son olarak ise R matrisinin her bir elemanı ilgili değerlendirme kriteri ağırlığı ile çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi, V, oluşturulur (Chiranjib vd., 2018).

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdot & w_m r_{1m} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdot & w_m r_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ w_1 r_{n1} & w_2 r_{n2} & \cdot & w_m r_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdot & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdot & v_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdot & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

6.1.4. Adım 4: Pozitif ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Hesaplanması

Her bir ölçüt için V matrisi kullanılarak değerlendirme kriterinin amacına göre pozitif ve negatif ideal çözüm kümeleri elde edilir.

Değerlendirme kriterleri eğer fayda olarak ifade ediliyorsa, pozitif ideal çözüm matrisinin sütunlarının en büyük değerleri ve negatif ideal çözüm matrisinin sütunlarının en küçük değerleri alınır. Değerlendirme kriterleri eğer maliyet olarak ifade ediliyorsa, pozitif ideal çözüm matrisinin sütunlarının en küçük değerleri ve negatif ideal çözüm matrisinin sütunlarının en büyük değerleri alınır. Burada pozitif ve negatif ideal çözüm kümeleri aşağıdaki şekilde gösterilir (Chiranjib vd., 2018):

$$\begin{aligned} V^* &= \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\} \\ V^- &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-\} \end{aligned} \quad (5)$$

6.1.5. Adım 5: Pozitif ve Negatif İdeal Değerlere Uzaklığın Hesaplanması

Her bir karar alternatifine ilişkin değerlendirme kriterlerinin pozitif ve negatif ideal çözüm değerlerine uzaklık değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır (Chiranjib vd., 2018):

$$\begin{aligned} S_i^* &= \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^*)^2 \right]^{0.5}, i = 1, 2, \dots, n \\ S_i^- &= \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0.5}, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

6.1.6. Adım 6: İdeal Çözüme Göre Yakınlık Katsayılarının Hesaplanması

Her bir karar alternatifinin ideal çözüme göre yakınlık değerinin hesaplanması aşağıdaki şekilde yapılır (Chiranjib vd., 2018):

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad (7)$$

Burada $0 \leq C_i^* \leq 1, i = 1, 2, \dots, n$ dir. Bu eşitlik negatif ideal çözümün toplam içindeki payına karşılık gelmektedir. Dolayısı ile 1'e yakın $C_i^*, i = 1, 2, \dots, n$ karar alternatifi öncelikli olarak tercih edilir.

6.2. TOPSIS Yöntemi ile Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi amacı ile TOPSIS yöntemi kullanılacaktır. İlk olarak yenilenebilir enerji sistemleri değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi amacı ile literatürde kullanılan kriterler incelenecek ve modelde kullanılacak olan kriterler belirlenecektir. Daha sonra karşılaştırma matrisi oluşturulacak ve farklı senaryolar altında TOPSIS yöntem kullanılarak alternatifler arasında bir sıralama yapılacaktır.

6.2.1. Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Belirlenmesi

Ülkemize farklı yenilenebilir enerji alternatifleri kullanılmakla birlikte bunlardan teknoloji ve kapasite bakımından daha yaygın olarak kullanılan ve Tablo 2'de sunulan güneş, hidroelektrik, rüzgâr ve jeotermal alternatiflerinin değerlendirmeye alınmasına karar verilmiştir.

Tablo 2. Analiz Edilen Yenilenebilir Güç Santral Tipleri

Alternatif	Kısaltılmış İsmi
Güneş Güç Santrali	GGS
Hidroelektrik Güç Santrali	HGS
Rüzgâr Güç Santrali	RGS
Jeotermal Güç Santrali	JGS

6.2.2. Yenilenebilir Enerji Sistemleri Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi

Wang vd. (2009), literatürde enerji tedarik sistemlerini değerlendirmek için kullanılan kriterleri incelemiştir. Belirlenen kriterler Tablo 3’de sunulmuştur:

Tablo 3. Enerji Tedarik Sistemlerinin Tipik Değerlendirme Kriterleri

Ana Kriterler	Kriterler
Teknik	Verimlilik
	Enerji Verimliliği
	Birincil enerji oranı
	Emniyet
	Güvenilirlik
	Olgunluk
Ekonomik	Yatırım maliyeti
	İşletme ve bakım maliyeti
	Yakıt maliyeti
	Elektrik maliyeti
	Net bugünkü değer
	Geri ödeme periyodu
	Hizmet ömrü
	Eşdeğer yıllık maliyet
Çevresel	NO _x emisyonu
	CO ₂ emisyonu
	CO emisyonu
	SO ₂ emisyonu
	Partikül emisyonu
	Metan olmayan uçucu organik bileşikler Arazi kullanımı
Sosyal	Sosyal kabul edilebilirlik
	İş yaratma
	Sosyal faydalar

Türkiye şartları da incelenerek literatürde kullanılan yöntemlerden Tablo 4’de sunulan kriterlerin kullanımına karar verilmiştir. Bu kriterler teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal olarak sınıflandırılmış ve senaryolar bu ana sınıflandırmaya göre belirlenmiştir.

Tablo 4. Değerlendirme Kriterleri

Ana Kriter	Alt Kriter	Birim
Teknik (1)	Santral yük faktörü	%
	Santral ömrü	Yıl
	İnşaat Süresi (yıl)	Yıl
	1 kW kapasitenin ortalama yıllık elektrik üretimi	(KWh)
Ekonomik (2)	Birim tesis maliyeti	(\$/kW)
	Sabit işletme ve bakım maliyeti	(\$/kW-yıl)
	1 MWh elektrik üretmenin seviyelendirilmiş maliyeti	(\$)
Çevresel (3)	CO ₂ Emisyonu	(g/kWh)
	SO ₂ Emisyonu	(g/kWh)
	NO _x Emisyonu	(g/kWh)
Sosyal (4)	Çalışan Sayısı	
	Sosyal kabul edilebilirlik	

Santral yük faktörü santralin bir yıl boyunca aktif olarak çalışabildiği toplam çalışma saatini ifade etmektedir ve bu süre ne kadar uzunsa santral verimliliği ve üretim miktarı o kadar yüksektir.

Santral ömrü santralin işletmeye alınmasından ekonomik ömrünü tamamlamasına kadar geçen süreyi ifade eder. Yine santral ömrünün uzun olması daha fazla enerji ve daha düşük birim yatırım maliyeti anlamına gelmektedir.

İnşaat Süresi santral yapım kararının verilmesinden işletmeye alınması arasında geçen projelendirme ve yapım aşamalarını içerir. İnşaat süresinin kısa olması santrallerin daha hızlı devreye alınması anlamına gelir.

1 kW kapasitenin ortalama yıllık elektrik üretimi santral kurulu gücü ile üretim kapasitesi arasındaki oranı tanımlar. Bu değer ne kadar yüksekse santral o kadar fazla elektrik enerjisi üretebilir.

Birim tesis maliyeti, santral için yapılan kW başına birim yatırım maliyetini ifade eder ve bu değer ne kadar düşük ise santral alternatifi o kadar cazip hale gelir.

Sabit işletme ve bakım maliyeti bir santralin olağan faaliyetlerini gerçekleştirmesi esnasında ortaya çıkan işletme ve bakım maliyetlerini ifade eder. Bu maliyetin düşük olması santralin daha çok tercih edilmesine neden olur.

1 MWh elektrik üretiminin seviyelendirilmiş maliyeti santralin ömrü boyunca ortaya çıkan toplam maliyetlerin (yatırım, bakım, işletme, vb.) yine ömrü boyunca üretebileceği toplam elektrik enerjisi miktarına bölünmesi ile bulunur. Diğer bir tabirle santralin 1 MWh elektrik üretebilmesi için gerekli olan maliyeti ifade eder.

CO₂, SO₂ ve NO_x Emisyonları santrallerin faaliyetleri esnasında çevreye saldıkları emisyon gazlarını ifade eder. Çeşitli yasal kısıtlamalar ve teşvikler nedeni ile emisyon değerleri düşük olan santraller daha çok tercih edilmektedir.

Çalışan Sayısı bir santralin faaliyetlerini etkin bir şekilde sürdürebilmesi için ihtiyaç duyduğu toplam çalışan sayısını ifade eder. İstihdam açısından düşünürsek, çalışan sayısının fazla olması daha fazla iş anlamına geleceğinden toplum tarafından daha çok kabul görecektir.

Sosyal kabul edilebilirlik bir santralin bir bölgeye inşa edilmesine toplumun tepkisi olarak ifade edilebilir. Özellikle çevreyi kirleten ve ona zarar veren santral tipleri genel olarak kabul görmezler. Diğer taraftan çevreye zarar vermeyen ve iş imkânı sağlayan alternatiflerin sosyal kabulü daha yüksektir.

6.2.3. Karşılaştırma Matrisinin Oluşturulması

TOPSIS Metodunda kullanılacak kriterlere göre alternatiflerin değerlendirilmesi Tablo 5’de sunulmuştur (Özcan ve Erol, 2014; Kazancık, 2016).

Tablo 5. Karşılaştırma Matrisi

Teknik Kriterler (Kazancık, 2016)				
	HGS	RGS	GGS	JGS
Santral yük faktörü	0.33	0.33	0.42	0.85
Santral ömrü (yıl)	40	25	25	25
İnşaat Süresi (yıl)	4	1	2	1
1 kW kapasitenin ortalama yıllık elektrik üretimi (kWh)	2891	2891	3679	7446
Ekonomik Kriterler (Kazancık, 2016)				
	HGS	RGS	GGS	JGS
Birim tesis maliyeti (\$/kW)	1190	1650	7530	2850
Sabit işletme ve bakım maliyeti (\$/kW-yıl)	11.9	23.5	50	85.5
1 MWh elektrik üretmenin seviyelendirilmiş maliyeti (\$)	28.11	48.63	158.8	38.64
Çevresel Kriterler (EEA, 2015)				
	HGS	RGS	GGS	JGS
CO₂ Emisyonu (g/kWh)	23	18	17	20
SO₂ Emisyonu (g/kWh)	0.03	0.05	0.16	0.02
NO_x Emisyonu (g/kWh)	0.02	0.03	0.12	0.28
Sosyal Kriterler (Özcan ve Erol, 2014)				
	HGS	RGS	GGS	JGS
Çalışan Sayısı	50	12	26	32
Sosyal kabul edilebilirlik	0.0639	0.134	0.1137	0.1312

6.2.4. TOPSIS Yönteminin Uygulanması

Tablo 6. Karar Matrisi

Alternatifler	Kriterler							
	Santral Yük Faktörü	Santral Ömrü (Yıl)	İnşaat Süresi (yıl)	CO ₂ Emisyonu (g/kWh)	SO ₂ Emisyonu (g/kWh)	NO _x Emisyonu (g/kWh)	Çalışan Sayısı	Sosyal Kabul Edilebilirlik
HGS	0.33	40	4	23	0.03	0.02	50	0.0639
RGS	0.33	25	1	18	0.05	0.03	12	0.134
GGS	0.42	25	2	17	0.16	0.12	26	0.1137
JGS	0.85	25	1	20	0.02	0.28	32	0.1312
$\sqrt{\sum_{i=1}^4 d_{ij}^2}$	1.057	58.949	4.690	39.268	0.171	0.307	65.909	0.228

24

Tablo 7. Standart Karar Matrisi

Alternatifler	Kriterler $\left[r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \right]$							
	Santral Yük Faktörü	Santral Ömrü (Yıl)	İnşaat Süresi (Yıl)	CO ₂ Emisyonu (g/kWh)	SO ₂ Emisyonu (g/kWh)	NO _x Emisyonu (g/kWh)	Çalışan Sayısı	Sosyal Kabul Edilebilirlik
HGS	0.312281087	0.678551144	0.852802865	0.58571406	0.174963553	0.065198137	0.758621411	0.279735385
RGS	0.312281087	0.424094465	0.213200716	0.458384916	0.291605922	0.097797205	0.182069139	0.586612545
GGS	0.397448656	0.424094465	0.426401433	0.432919088	0.93313895	0.39118882	0.394483134	0.497745122
JGS	0.804360375	0.424094465	0.213200716	0.509316574	0.116642369	0.912773913	0.485517703	0.574354969

Tablo 8. Ağırlıklı Standart Karar Matrisi (V)

Ağırlıklar (w _i)	Kriterler							
	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Alternatifler	Santral Yük Faktörü	Santral Ömrü (Yıl)	İnşaat Süresi (Yıl)	CO ₂ Emisyonu (g/kWh)	SO ₂ Emisyonu (g/kWh)	NO _x Emisyonu (g/kWh)	Çalışan Sayısı	Sosyal Kabul Edilebilirlik
HGS	0.039035136	0.084818893	0.106600358	0.073214257	0.021870444	0.008149767	0.094827676	0.034966923
RGS	0.039035136	0.053011808	0.02665009	0.057298115	0.03645074	0.012224651	0.022758642	0.073326568
GGS	0.049681082	0.053011808	0.053300179	0.054114886	0.116642369	0.048898602	0.049310392	0.06221814
JGS	0.100545047	0.053011808	0.02665009	0.063664572	0.014580296	0.114096739	0.060689713	0.071794371
V_j[*]	0.100545047	0.084818893	0.02665009	0.054114886	0.014580296	0.008149767	0.094827676	0.073326568
V_j⁻	0.039035136	0.053011808	0.106600358	0.073214257	0.116642369	0.114096739	0.022758642	0.034966923

$$S_i^* = \left[\sum_{j=1}^8 (V_{ij} - V_j^*)^2 \right]^{0.5}$$

$$S_i^- = \left[\sum_{j=1}^8 (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0.5}$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}$$

Tablo 9. Alternatiflerin TOPSIS Metodu ile Sıralaması

Alternatifler	S_i^*	S_i^-	$S_i^* + S_i^-$	C_i^*	Sıralama
HGS	0.1098	0.1625	0.2724	0.5967	2
RGS	0.1024	0.1579	0.2603	0.6065	1
GGS	0.1363	0.0950	0.2313	0.4106	4
JGS	0.1162	0.1532	0.2694	0.5688	3

TOPSIS yönteminin uygulanması sonucunda C_i^* değerlerine göre sıralama RGS (0.6065), HGS (0.5967), JGS (0.5688), ve GGS (0.4106) olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler matematiksel modelde ilgili parametreye atanarak hangi santrale ne kadarlık bir yatırım yapılması gerektiği belirlenecektir.

6.3. Matematiksel Model

Bu bölümde TOPSIS puanları amaç fonksiyonunun parametreleri olarak kullanılmış ve Türkiye'nin enerji talebi ve kaynak kullanım kısıtlamaları dikkate alınarak bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modele ilişkin açıklamalar aşağıda verilmiştir:

6.3.1. Kümeler ve İndisler

- I : Alternatifler Kümesi, $I = \{HGS, RGS, GGS, JGS\}$
 T : Yıllar Kümesi, $T = \{1,2,3,4,5\}$

6.3.2. Parametreler

- U_{it} : i alternatifinin t yılı için tahmin edilen yıllık üretim kapasitesi (GWh)
 C_i : Birim yatırım ve sabit operasyon ve bakım maliyeti (\$/MW)
 P_t : t yılındaki üretim tahmini (GWh)
 D_t : t yılındaki talep tahmini (GWh)
 C_i^* : Alternatif i için TOPSIS skoru
 B_t : t yılında harcanabilecek maksimum bütçe (\$)

Parametre değerleri müteakip tablolarda sunulmuştur:

Tablo 10. Birim Maliyetler ve TOPSIS Skorları

Alternatifler	C_i (Yurdakul ve İç, 2019)	C_i^*
HGS	2.28	0.596707
RGS	1.13	0.606479
GGS	1.01	0.410597
JGS	3.36	0.568778

Önümüzdeki beş yıl için üretim, talep ve bütçe değerleri, önceki yılın verileri kullanılarak her alternatif için zaman serisi analizi kullanılarak tahmin edilmiştir (Tablo 11). Tahmin uygulamasının detayları Ek A-E'de sunulmaktadır.

Tablo 11. Alternatifler için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Alternatifler	Yıllar				
	2021	2022	2023	2024	2025
HGS	78,395.00	79,998.00	81,600.00	83,202.00	84,805.00
RGS	27,805.00	30,548.00	33,291.00	36,034.00	38,777.00
GGS	13,399.00	15,286.00	17,174.00	19,062.00	20,950.00
JGS	10,543.00	11,737.00	12,930.00	14,124.00	15,317.00

Tablo 12. Diğer Parametreler

Parametreler	2021	2022	2023	2024	2025
Toplam Beklenen Elektrik Üretimi (Aksoy vd., 2020)	328,992	339,849	348,345	358,447	368,842
Yenilenebilir Enerji Oranı (Aksoy vd., 2020)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Üretim Kapasitesi Tahmini^a (P_t, GWh)	130,142	137,566	144,995	152,422	159,849
Talep Tahmini (D_t, GW)	128,306.88	135,939.60	139,338.00	143,378.80	147,536.80
Bütçe (\$)	300 milyon \$ / yıl				

^aTalep Tahmini= Toplam Beklenen Elektrik Üretimi × Yenilenebilir Enerji Oranı

6.3.3. Karar Değişkenleri

x_{it} : i alternatifinin t yılındaki kapasitesi (GWh)

z : hedef fonksiyonu değeri (GWh)

6.3.4. Matematiksel Model

$$\text{Max } z = \sum_{i \in I} C_i^* x_{it} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} C_i x_{it} \leq B_t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it} \leq P_t \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it} = D_t \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$x_{it} \leq U_{it} \quad \forall i \in I \text{ ve } t \in T \quad (12)$$

$$x_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I \text{ ve } t \in T \quad (13)$$

Amaç fonksiyonu toplam ağırlıklandırılmış alternatifleri maksimize etmektedir. (9) numaralı kısıt bütün alternatifler için kullanılabilir maksimum bütçe miktarını belirlemektedir. (10) numaralı kısıt t yılındaki üretim hedefini belirlemektedir. (11) numaralı kısıt her t yılı için karşılanması gereken talep miktarını belirlemektedir. (12) numaralı kısıt her bir alternatif için ve her yıl için üretim üst sınırını belirlemektedir. Son olarak (13) numaralı kısıt karar değişkeni üzerindeki pozitif olma şartını tanımlamaktadır.

Matematiksel model kullanılarak oluşturulan 2021 yılı için doğrusal programlama modeli aşağıda örnek olarak verilmektedir:

$$\text{Max } z = 0.596707 x_1 + 0.606479 x_2 + 0.410597 x_3 + 0.568778 x_4 \quad (14)$$

$$2.28x_1 + 1.13x_2 + 1.01x_3 + 3.36x_4 \leq 300000000 \quad (15)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 130142 \quad (14)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 128306.88 \quad (15)$$

$$x_1 \leq 78395 \quad (16)$$

$$x_2 \leq 27805 \quad (19)$$

$$x_3 \leq 13399 \quad (20)$$

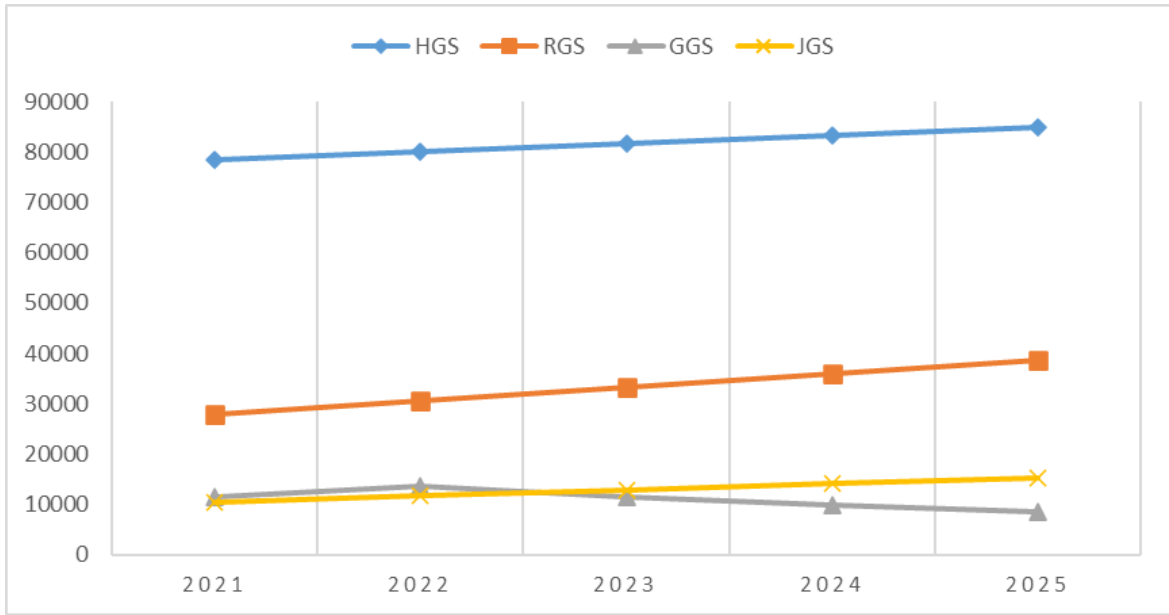
$$x_4 \leq 10543 \quad (21)$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1,2,3,4 \quad (22)$$

Problemi çözmek amacı ile Excel Solver aracı kullanılmıştır. C_i^* parametresinin değeri Excel’de hazırlanan TOPSIS hesaplamalarında belirlenen değerlerden çekilmektedir. Excel Solver uygulaması, sonuç raporu ve duyarlılık raporu EK F’de sunulmuştur. Eniyileme sonucunda yenilenebilir enerji alternatifleri için yıllara göre en iyi üretim kapasiteleri Tablo 13 ve Şekil 14’de verilmiştir.

Tablo 13. Optimal Yenilenebilir Enerji Kapasiteleri (GWh)

Alternatifler	Yıllar Kümesi				
	2021	2022	2023	2024	2025
HGS	78,395	79,998	81,600	83,202	84,805
RGS	27,805	30,548	33,291	36,034	38,777
GGS	11,564	13,657	11,517	10,019	8,638
JGS	10,543	11,737	12,930	14,124	15,317



Şekil 14. Optimal Yenilenebilir Enerji Kapasiteleri (GWh)

Sonuçlardan da görüleceği gibi en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektrik santraller olup, kapasiteleri sürekli olarak artış eğilimindedir. Onu rüzgâr enerji santralleri izlemekte ve bu santral tipinde de sürekli artış gözlenmektedir. Jeotermal ve güneş enerji santralleri daha az tercih edilmiştir. 2021 ve 2022 de güneş santral kapasitesi daha yüksekken, 2023 yılından itibaren jeotermal santral kapasitesi daha fazla olarak gerçekleşmiştir. Jeotermal santral kapasitesinde sürekli bir artış gözlenirken, güneş enerji santrallerinde önce bir artış daha sonra azalış gözlemlenmektedir.

7. TARTIŞMA

7.1. Senaryo Analizi

Bu bölümde sürdürülebilir üretim için yeni bir senaryo geliştirilmiştir. Çevresel kriterlerin diğer kriterlerden daha önemli olduğu yeni bir kriter ağırlık seti kullanılmıştır (Tablo 14). Daha sonra, TOPSIS modeli yeni kriter ağırlıkları ile tekrar çalıştırılarak uygulanmış ve yeni sıralama puanları elde edilmiştir (Tablo 15).

Tablo 14. Sürdürülebilir Üretim için Belirlenen Yeni Kriter Ağırlıkları

Kriterler	Ağırlık Skoru	Normalleştirilmiş Ağırlıklar
Santral Yük Faktörü	1	0.032258
Santral Ömrü (Yıl)	1	0.032258
İnşaat Süresi (Yıl)	1	0.032258
CO ₂ Emisyonu (g/kWh)	10	0.322581
SO ₂ Emisyonu (g/kWh)	8	0.258065
NO _x Emisyonu (g/kWh)	8	0.258065
Çalışan Sayısı	1	0.032258
Sosyal Kabul Edilebilirlik	1	0.032258

Tablo 15. Yeni Ağırlıklar için TOPSIS Skorları

Alternatifler	C_i^*	Sıralama
HGS	0.83253111	2
RGS	0.83769825	1
GGS	0.38840231	4
JGS	0.49314196	3

Tablo 15’den de görüleceği gibi elde edilen TOPSIS sıralaması orijinal çözümle aynı olmakla birlikte, TOPSIS puanları tamamen farklıdır. Elde edilen yeni puanları kullanarak matematiksel model yeniden çalıştırılmıştır ve 2025 yılı için elde edilen en iyi çözüm Tablo 16’da orijinal çözüm ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 16. 2025 Yılı için Optimal Yenilenebilir Enerji Kapasiteleri (GWh)

Alternatifler	Orijinal Senaryo	Yeni Senaryo
HGS	84,805	84,805
RGS	38,777	38,777
GGS	8,638	20,950
JGS	15,317	3,005

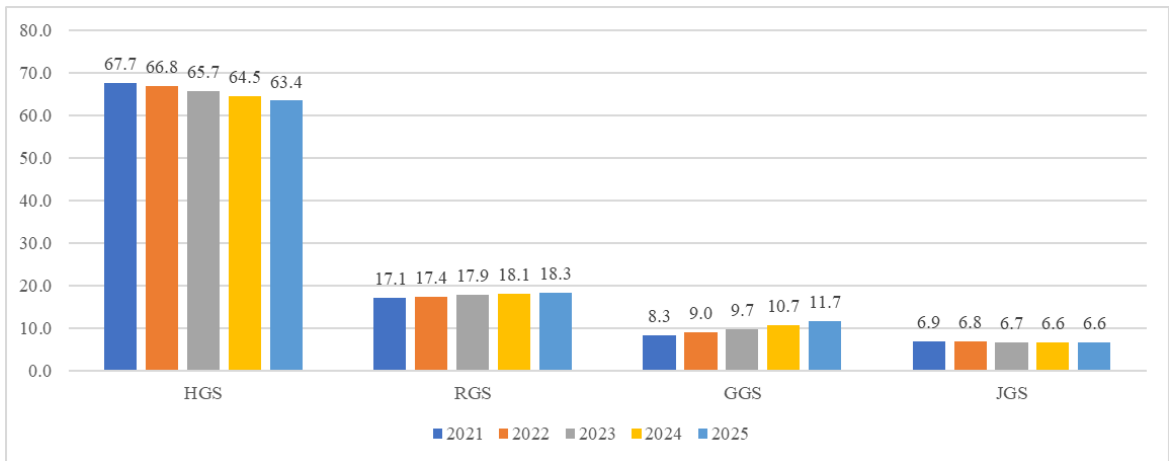
Tablo 16’den görülebileceği gibi, bazı sonuçlar orijinal çözümden farklıdır. Yeni senaryoda, güneş enerjisi yatırımı, orijinal durumda olduğundan önemli ölçüde yüksektir. Öte yandan, jeotermal, orijinal çözümden önemli ölçüde daha düşük olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak bu senaryo bize TOPSIS yönteminden elde edilen puanların en iyi çözüm üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile karar vericilerin alternatifleri değerlendirirken tutarlı olmaları ve ülkenin stratejik hedefleri ile uyumlu değerlendirme yapmaları büyük bir önem arz etmektedir.

7.2. Benzer Çalışmaların Karşılaştırılması ve Alternatiflerin Değerlendirmesi

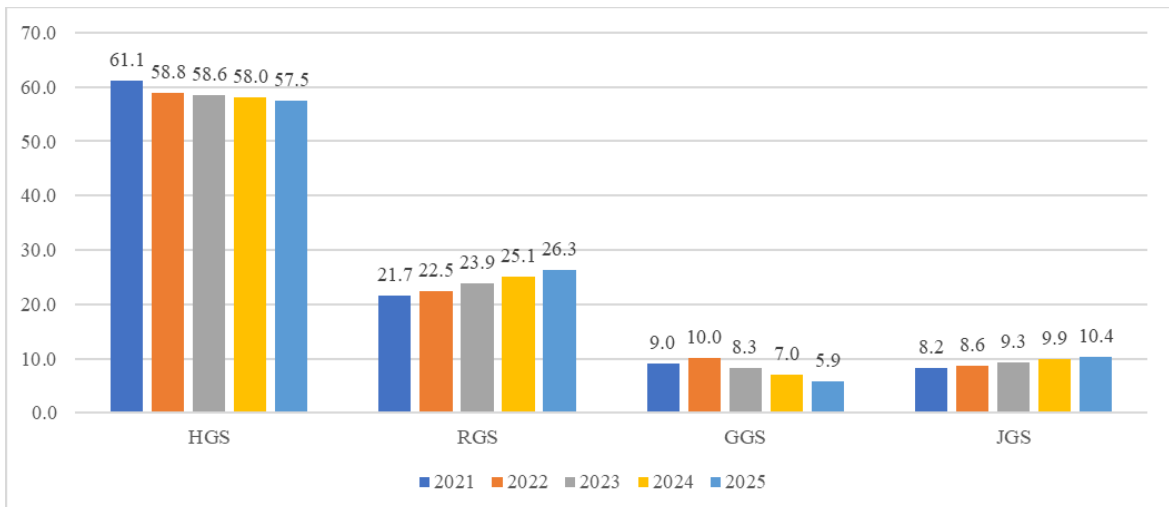
Bu bölümde ilk olarak SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları (Aksoy vd. 2020) ile bu tez çalışmasında önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkinci olarak ise, ülkemizde yenilenebilir enerji alternatiflerini sıralamak amacı ile yapılan çalışmalar incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Türkiye’nin 2030 yılına kadar en iyi elektrik üretim kapasitesinin belirlenmesi amacı ile farklı senaryolar altında SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Aksoy vd. 2020). Aksoy vd. (2020) çalışmalarında elektrik üretim kapasitesinin belirlenmesi amacı ile “Tam Piyasa Odaklı Senaryosu”, “Düşük Talep Senaryosu”, “Yerli Kaynak Senaryosu”, “Karbon Maliyeti Senaryosu” ve “Dengeli

Politikalar Senaryosu’nu kullanmışlardır. Yapılan analizler sonucunda rüzgâr ve güneş enerjisi alternatifleri, tüm senaryolarda en az maliyetli seçenekler olarak ortaya çıkmış ve bu nedenle üretim içindeki payın sürekli olarak artacağı öngörülmüştür (Şekil 15). Bu yönüyle sonuçlar bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlarla paraleldir. Bu tez çalışması sonucunda elde edilen 5 yıllık bir zaman dilimi için yenilenebilir enerji alternatiflerinin payları Şekil 16’da gösterilmiştir. Şekil 16’da, en yüksek paya sahip olan hidroelektrik üretimin yıllar içerisinde azalacağı, diğer taraftan rüzgâr ve güneş enerjisi alternatiflerinden elde edilecek üretimin ise rüzgar enerjisi ağırlıklı olacak şekilde artacağı tahmin edilmektedir. Jeotermal enerjide ise durumun çok değişmeyeceği tahmin edilmektedir.



Şekil 15. Yenilenebilir Enerji Katkılarının Yıllara Göre Dağılım Yüzdesi (Aksoy vd., 2020)



Şekil 16. Yenilenebilir Enerji Katkılarının Yıllara Göre Dağılım Yüzdesi

Bu tez çalışmasında önerilen modelde, hidroelektrik üretimi azalma eğiliminde olmakla birlikte, rüzgâr ve jeotermal enerjilerde artan, güneş enerjisinde ise önce artan sonra azalan bir grafik ortaya çıkmıştır. Kaynakların yüzdesel katkı payları her iki modelde birbirine yakındır. Diğer taraftan her iki çalışmada da 2021-2025 arasında hidroelektrik enerji santrallerindeki üretimde azalış, rüzgâr enerjisinde artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak önerilen model ile Aksoy vd. (2020) modeli sonuçları birbirine benzer sonuçlar vermiştir.

7.2.1. Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Öncelik Sıralarının Belirlenmesi

Bu bölümde yenilenebilir enerji alternatiflerinin öncelik sıralaması sonuçları literatürdeki farklı yöntemlerle Türkiye özelinde gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Tablo 17). Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji alternatifleri TOPSIS yöntemi ile sıralanmaktadır. Karşılaştırma çalışması ise literatürde yer alan bulanık COPRAS, bulanık MUTIMOORA, AHP, gri çok kriterli en iyileme yöntemleri sonuçları ile gerçekleştirilmiştir. Öncelik sıraları arasında farklılıklar olmakla birlikte, genel olarak rüzgâr ve hidroelektrik alternatifleri ilk iki sırayı paylaşmakta ve ilk üç sırada aynı alternatifler yer almaktadır. Tablo 17 incelendiğinde TOPSIS yönteminin literatürde uygulanan diğer yöntemlerle benzer bir sıralama sunabildiği görülmektedir.

Tablo 17. Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Öncelik Sıralarının Belirlenmesi

Çalışmalar	Kullanılan Yöntem	Sıralama
Alkan ve Albayrak (2020)	Bulanık COPRAS	Rüzgâr-Hidro Elektrik-Güneş-Biomass-Jeotermal
	Bulanık MUTIMOORA	Hidro Elektrik-Rüzgâr-Biomass-Güneş-Jeotermal
Aksoy (2019)	AHP ve Doğrusal Programlama	Rüzgâr-Güneş-Biomass-Jeotermal
Çelikbilek ve Tüysüz (2016)	Gri çok kriterli en iyileme	Güneş, Rüzgâr, Hidro Elektrik, Biomass ve Jeotermal
Mevcut Çalışma	TOPSIS ve Doğrusal Programlama	Rüzgâr-Hidro Elektrik-Jeotermal-Güneş

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'de önümüzdeki beş yılda ilave enerji talebini karşılaması gereken yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim miktarlarını belirlemek için bir model geliştirilmiştir. Öncelikle alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarını TOPSIS modeli ile kriterler doğrultusunda sıralanmıştır. Daha sonra, geliştirilen doğrusal programlama modelini kullanarak, önümüzdeki beş yıl içinde ek enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının nasıl tercih edilebileceği belirlenmiştir. Zaman serisi analizi, matematiksel modelin kısıtlarından üretim kapasitesinin tahmin edilmesi için kullanılmıştır. Ardından 5 yıllık talebe göre her yıl hangi alternatiften ne kadar enerji üretilmesi gerektiği belirlenmiştir. TOPSIS yönteminde kriter ağırlıkları eşit öneme sahip olacak şekilde kullanılmıştır. Çünkü önümüzdeki beş yıl içinde hangi kriterlerin daha önemli veya tercih edilebilir olduğunu tahmin etmek için kapsamlı bir analize ihtiyaç bulunmaktadır. Model esnek bir yapıda oluşturulmuş olup, kriter ağırlıkları güncellenebilir ve model sonuçları yenilenebilir niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] Abhishek Kumar, Bikash Sah, Arvind R. Singh, Yan Deng, Xiangning He, Praveen Kumar, R.C. Bansal, A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 69, 2017, 596-609, ISSN 1364-0321.
- [2] Abu-Taha R. Multi-criteria applications in renewable energy analysis: a literature review. In: *Technology Management in the Energy Smart World (PICMET)*, Proceedings of PICMET, 11; 2011. p. 1-8.
- [3] Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 2002, 27, 739–755.
- [4] Alkan, Ö., & Albayrak, Ö. K. Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. *Renewable Energy*, 2020, 162, 712-726.
- [5] Aksoy, H., Korkmaz, O., Yiğit, V., Bavbek, K.G., Koyuncuoğlu Toma, E., Rogner, M., 2030 yılına doğru Türkiye'nin optimum elektrik üretim kapasitesi, SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi 2020.
- [6] Aksoy A. Integrated model for renewable energy planning in Turkey, *International Journal of Green Energy*, 2019, 16:1, 34-48.
- [7] Bhowmik Chiranjib, Baruah Abhinandan, Bhowmik Sumit, Ray Amitava, Green energy sources selection for sustainable energy planning using multi-criteria decision-making approach, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 377, 1757-8981.
- [8] BP. *Statistical Review of World Energy 2020 69th Edition*. British Petroleum (BP), 2020.

- [9] Brahim Haddad, Abdelkrim Liazid, Paula Ferreira, A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system, *Renewable Energy*, Volume 107, 2017, 462-472, ISSN 0960-1481.
- [10] Carlos Robles Algarín, Aura Polo Llanos, Adalberto Ospino Castro, An Analytic Hierarchy Process Based Approach for Evaluating Renewable Energy Sources, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2017, 7(4), 38-47.
- [11] Çelikkbilek, Y., & Tüysüz, F. An integrated grey based multi-criteria decision making approach for the evaluation of renewable energy sources. *Energy*, 2016, 115, 1246-1258.
- [12] Eleni Strantzali, Konstantinos Aravossis, Decision making in renewable energy investments: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 55, 2016, 885-898, ISSN 1364-0321.
- [13] Ertay, T., Kahraman, C., & Kaya, İ. Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey. *Technological and Economic Development of Economy*, 2013, 19(1), 38-62.
- [14] European Environment Agency, Sulphur dioxide -SO₂ emissions Report, EEA, 2015, 38-44.
- [15] Fatemeh Katal, Farivar Fazelpour, Multi-criteria evaluation and priority analysis of different types of existing power plants in Iran: An optimized energy planning system, *Renewable Energy*, Volume 120, 2018, 163-177, ISSN 0960-1481.
- [16] Hamalainen, R. P., & Karjalainen, R. Decision support for risk analysis in energy policy. *European Journal of Operational Research*, 1992, 56, 172–183.

- [17] Hussain Mirjat N, Uqaili MA, Harijan K, Mustafa MW, Rahman MM, Khan MWA, Multi-Criteria Analysis of Electricity Generation Scenarios for Sustainable Energy Planning in Pakistan, *Energies*, 2018, 11(4):757.
- [18] Kabir, A. B. M. Z., & Shihan, S. M. A. Selection of renewable energy sources using analytic hierarchy process. In *International symposium on the analytic hierarchy process*, Bali, 2003.
- [19] Kazancık, L. B. *Türkiye Elektrik Enerji Sektöründe Robust Optimizasyon*. Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2016.
- [20] Mateo JRSC. *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry*. London: Springer; 2012.
- [21] Mavrotas, G., Diakoulaki, D., & Papayannakis, L. An energy planning approach based on mixed 0–1 multiple objective linear programming. *International Transactions in Operational Research*, 6, 1999, 231–244.
- [22] Özcan, E. C., & Erol, S. A multi-objective mixed integer linear programming model for energy resource allocation problem: The case of turkey. *Gazi University Journal of Science* 2014, 27(4), 1157–1168.
- [23] Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. A. Local renewable energy planning: A participatory multi-criteria approach. *Energy Sources*, 2004, 26, 1253–1264.
- [24] Rani, P., Mishra, A. R., Mardani, A., Cavallaro, F., Alrasheedi, M., & Alrashidi, A. A novel approach to extended fuzzy TOPSIS based on new divergence measures for renewable energy sources selection. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257, 120352.
- [25] TEİAŞ. (2021, 04 20). *Türkiye Elektrik Üretim ve İletim İstatistikleri*.
- [26] Topcu, Y. I., & Ulengin, F. Energy for the future: An integrated decision aid for the case of Turkey. *Energy*, 2004, 29, 137–154.

- [27] Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E., & Kiosses, I. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 2009, 37, 1587–1600.
- [28] Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, Zhao JH. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(9):2263e78.
- [29] Wang, Y., Xu, L., & Solangi, Y. A. Strategic renewable energy resources selection for Pakistan: Based on SWOT-Fuzzy AHP approach. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52, 101861.
- [30] Yücenur, G. N., Çaylak, Ş., Gönül, G., & Postalciöğlü, M. An integrated solution with SWARA&COPRAS methods in renewable energy production: City selection for biogas facility. *Renewable Energy*, 2020, 145, 2587-2597.
- [31] Yurdakul, M., İç, Y.T. Development of a New Support Mechanism to Calculate Feed-in Tariffs for Electricity Generation from Renewable Energy Sources in Turkey. *Process Integr Optim Sustain* 3, 2019, 423–436.

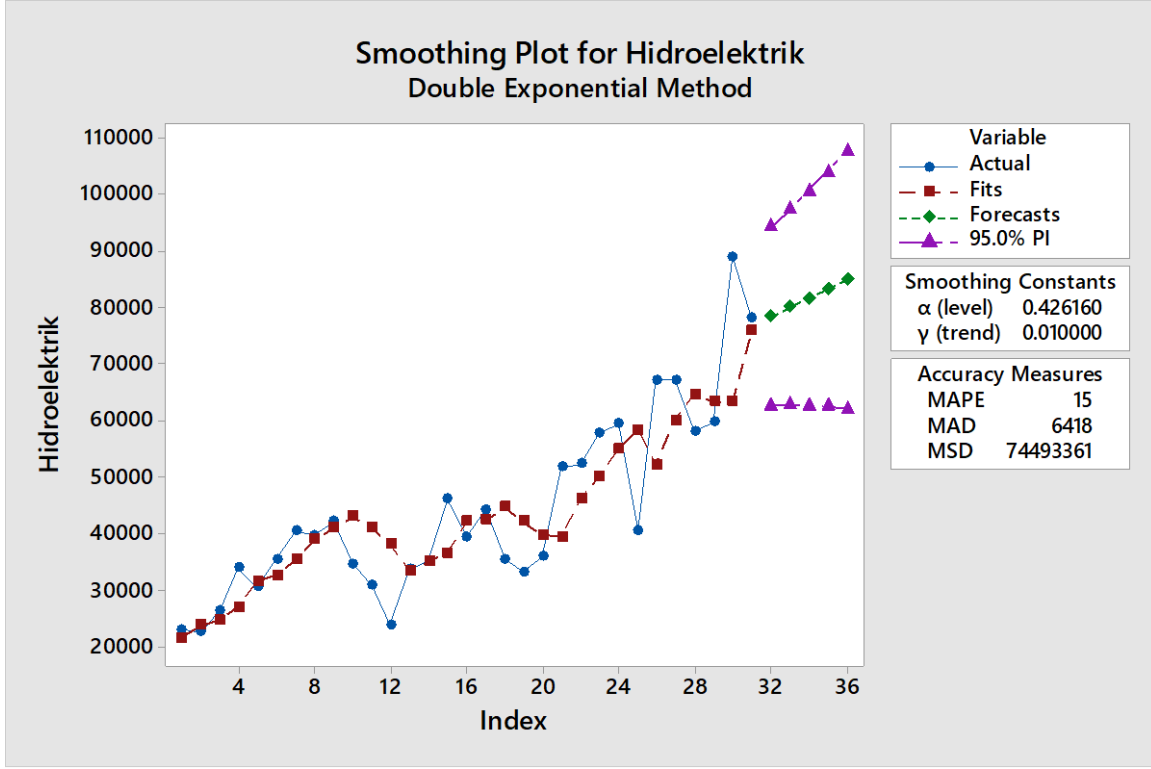
EKLER

EK A. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Üretimi (1990-2020) (GWh)

Tablo 18. Yenilenebilir Enerji Üretimi (GWh) (TEİAŞ, 2021)

Yıl	Jeotermal	Hidroelektrik	Güneş	Rüzgâr
1990	80	23148	0	0
1991	81	22683	0	0
1992	70	26568	0	0
1993	78	33951	0	0
1994	79	30586	0	0
1995	86	35541	0	0
1996	84	40475	0	0
1997	83	39816	0	0
1998	85	42229	0	5
1999	81	34677	0	21
2000	76	30879	0	33
2001	90	24010	0	62
2002	105	33683	0	48
2003	89	35330	0	61
2004	93	46084	0	58
2005	94	39561	0	59
2006	94	44244	0	127
2007	156	35581	0	355
2008	162	33270	0	847
2009	436	35958	0	1495
2010	668	51796	0	2916
2011	694	52338	0	4723
2012	899	57865	0	5860
2013	1364	59420	0	7557
2014	2364	40645	17	8520
2015	3425	67146	194	11652
2016	4819	67231	1043	15517
2017	6127	58218	2889	17904
2018	6906	59755	7477	19882
2019	8230	88886	10542	21515
2020	9344	78104	11645	24760

EK B. Hidroelektrik Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

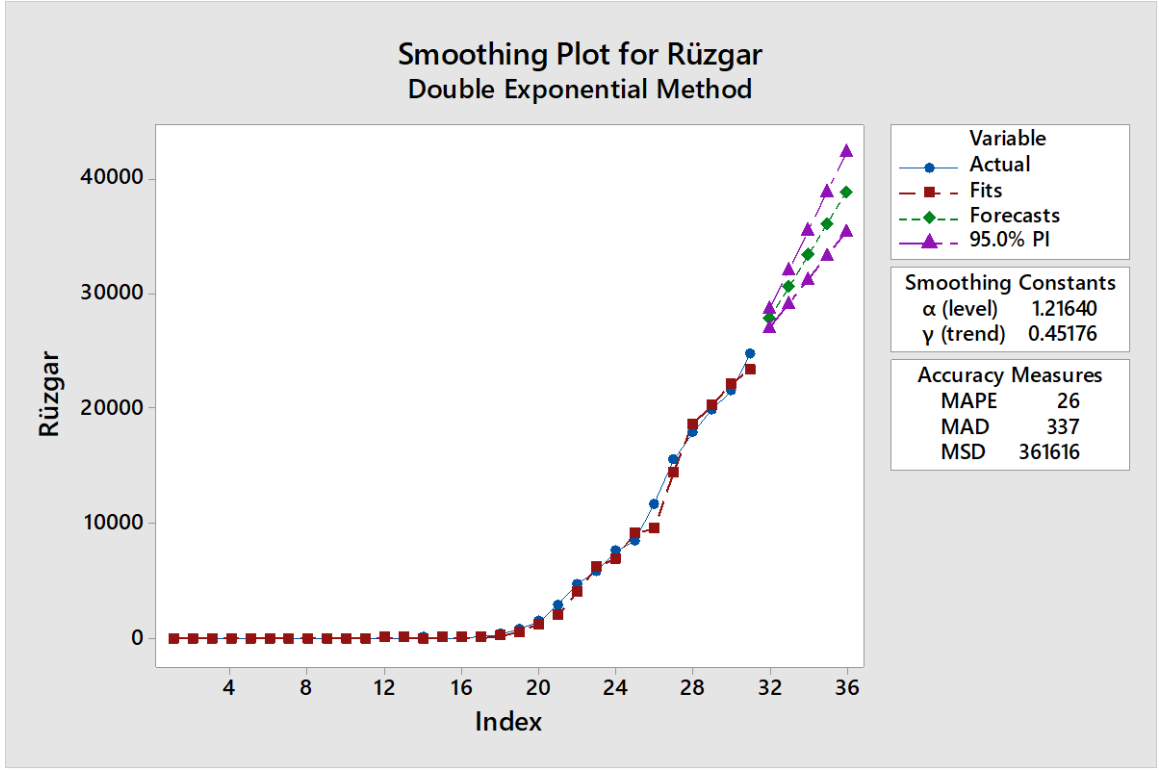


Şekil 17. Hidroelektrik Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Tablo 19. Hidroelektrik Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Yıl	Hidroelektrik Üretim Tahmini
2021	78395
2022	79998
2023	81600
2024	83202
2025	84805

EK C. Rüzgâr Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

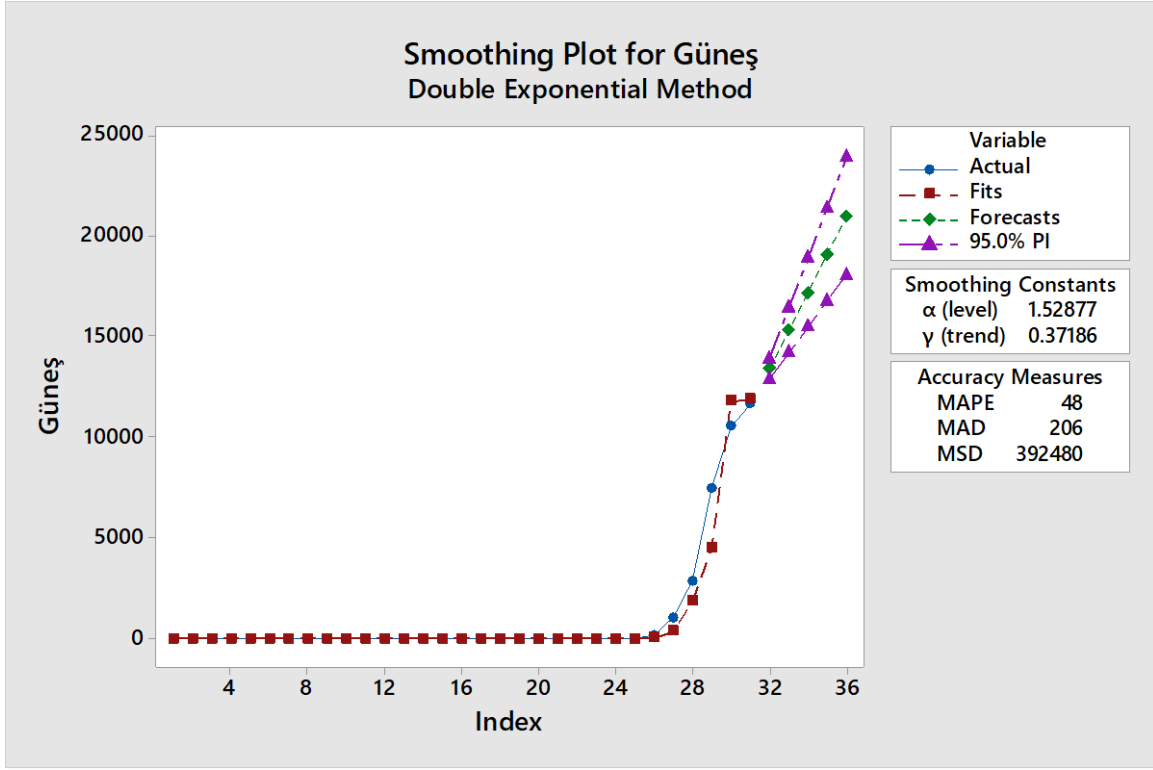


Şekil 18. Rüzgâr Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Tablo 20. Rüzgâr Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Yıl	Rüzgâr Üretim Tahmini
2021	27805
2022	30548
2023	33291
2024	36034
2025	38777

EK D. Güneş Enerjisi Santralleri için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

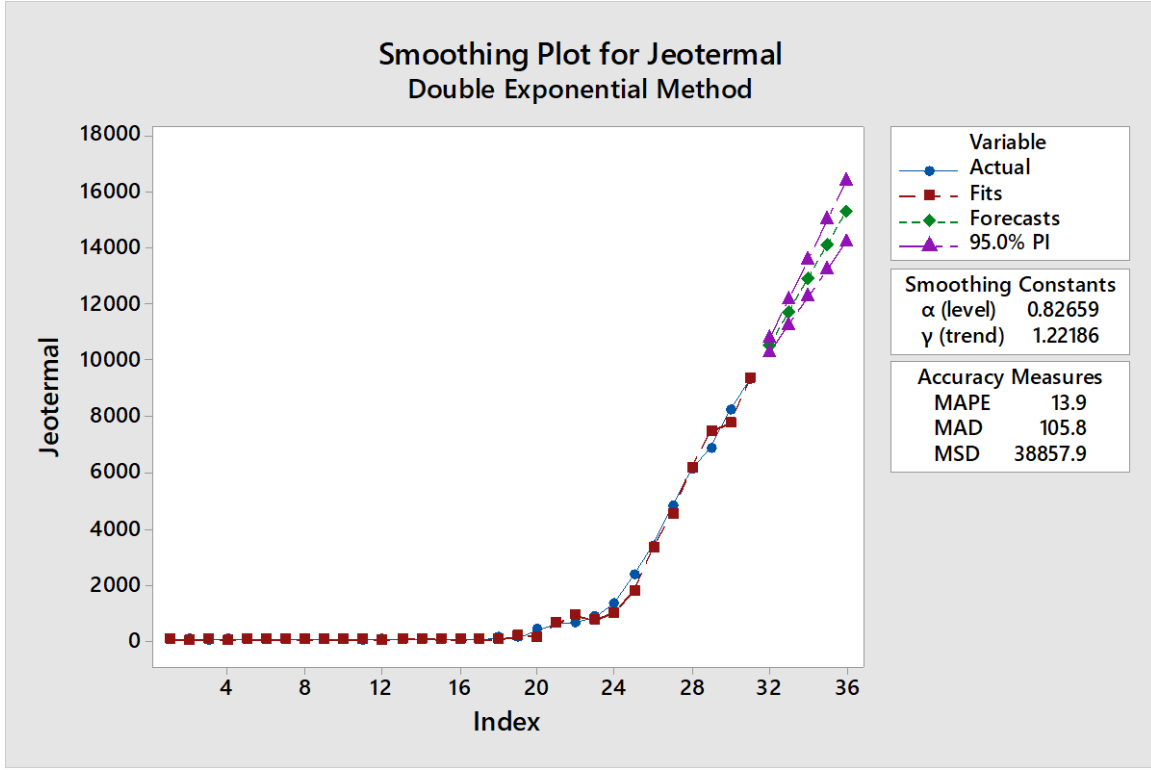


Şekil 19. Güneş Enerjisi Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Tablo 21. Güneş Enerjisi Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Yıl	Güneş Üretim Tahmini
2021	13399
2022	15286
2023	17174
2024	19062
2025	20950

EK E. Jeotermal Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)



Şekil 20. Jeotermal Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Tablo 22. Jeotermal Santraller için Yıllık Üretim Kapasite Tahminleri (GWh)

Yıl	Jeotermal Üretim Tahmini
2021	10543
2022	11737
2023	12930
2024	14124
2025	15317

EK F. Excel Solver Sonuçları

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2			Ci*	Ci	Z	B											
3	x1	78395	0.596707	2.28	46778.85	178740.6											
4	x2	27805	0.606479	1.13	16863.15	31419.65											
5	x3	11563.88	0.410597	1.01	4748.094	11679.52											
6	x4	10543	0.568778	3.36	5996.626	35424.48											
7																	
8					Top Z	74386.71											
9					Top B	257264.2											
10					Kapasite	128306.9											
11					Talep	128306.9											
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	

Çözücü Parametreleri

Hedef Ayarları:

Hedef: En Büyük En Küçük Değeri:

Değişken Hücreleri Değiştirerek:

Kısıtlamalara Bağlıdır:

\$B\$3 <= 78395
 \$B\$3:\$B\$6 >= 0
 \$B\$4 <= 27805
 \$B\$5 <= 13399
 \$B\$6 <= 10543
 \$F\$10 <= 130142
 \$F\$11 <= 128306.88
 \$F\$9 <= 3000000000

Kısıtlanmamış Değişkenleri Pozitif Yap

Çözme Yöntemi Seçin:

Çözüm Yöntemi
 Doğru değilse olmayan Çözümleri için GRG Doğrusal Olmayan altyapısını seçin. Doğrusal Çözümleri için Basit LP altyapısını seçin ve doğru olmayan Çözümleri için Açılım altyapısını seçin.

Şekil 21. Excel Solver Kullanıcı Arayüzü

Tablo 23. Excel Solver Duyarlılık Raporu

Microsoft Excel 14.0 Duyarlılık Raporu
Çalışma Sayfası: [Kitap1]Sayfa1
Rapor Oluşturuldu: 21.05.2021 09:27:56

Değişken Hücreleri

Hücre	Ad	Son Değer	Azaltılmış Maliyet	Hedef Katsayı	İzin Verilen Artış	İzin Verilen Azalış
\$B\$3	x1	78395	0.18611	0.596707	1E+30	0.18611
\$B\$4	x2	27805	0.195882	0.606479	1E+30	0.195882
\$B\$5	x3	11563.88	0	0.410597	0.158181	0.410597
\$B\$6	x4	10543	0.158181	0.568778	1E+30	0.158181

Kısıtlamalar

Hücre	Ad	Son Değer	Gölge Ücret	Kısıtlama Sağ Taraf	İzin Verilen Artış	İzin Verilen Azalış
\$F\$10	Kapasite B	128306.88	0	130142	1E+30	1835.12
\$F\$11	Talep B	128306.88	0.410597	128306.88	1835.12	11563.88
\$F\$9	Top B B	257264.2488	0	3000000000	1E+30	2999742736

Tablo 24. Excel Solver Yanıt Raporu

Microsoft Excel 14.0 Yanıt Raporu

Çalışma Sayfası: [Kitap1]Sayfa1

Rapor Oluşturuldu: 21.05.2021 09:28:40

Sonuç: Çözücü bir çözüm buldu. Tüm Kısıtlamalar ve uygunluk koşulları karşılandı.

Çözücü Altyapısı

Altyapı: Basit LP

Çözüm Süresi: 0.016 Saniye.

Yinelemeler: 4 Alt problemler: 0

Çözücü Seçenekleri

Zaman Sınırı Limitsiz, Yinelemeler Limitsiz, Precision 0.000001

En Çok Alt Problem Limitsiz, En Çok Tamsayı Çözümü Limitsiz, Tamsayı Toleransı 1%,

Negatif Olmadığını Varsay

Hedef Hücre (En Büyük)

Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer
\$F\$8	Top Z B	74386.71475	74386.71475

Değişken Hücreleri

Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer	Tamsayı
\$B\$3	x1	78395	78395	Sürekli
\$B\$4	x2	27805	27805	Sürekli
\$B\$5	x3	11563.88	11563.88	Sürekli
\$B\$6	x4	10543	10543	Sürekli

Kısıtlamalar

Hücre	Ad	Hücre Değeri	Formül	Durum	Serbestlik
	Kapasite				
\$F\$10	B	128306.88	\$F\$10<=130142	Farklı	1835.12
\$F\$11	Talep B	128306.88	\$F\$11<=128306.88	Aynı	0
\$F\$9	Top B B	257264.2488	\$F\$9<=3000000000	Farklı	2999742736
\$B\$3	x1	78395	\$B\$3<=78395	Aynı	0
\$B\$3	x1	78395	\$B\$3>=0	Farklı	78395
\$B\$4	x2	27805	\$B\$4>=0	Farklı	27805
\$B\$5	x3	11563.88	\$B\$5>=0	Farklı	11563.88
\$B\$6	x4	10543	\$B\$6>=0	Farklı	10543
\$B\$4	x2	27805	\$B\$4<=27805	Aynı	0
\$B\$5	x3	11563.88	\$B\$5<=13399	Farklı	1835.12
\$B\$6	x4	10543	\$B\$6<=10543	Aynı	0