
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK EKSENİNDE GELECEK ENERJİ SENARYOLARI MODELLEMESİ VE ANALİZİ

Kurtuluş DEĞER

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Kurtuluş DEĞER

07/02/2022

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK EKSENİNDE GELECEK ENERJİ SENARYOLARI MODELLEMESİ VE ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Kurtuluş DEĞER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2022

ÖZET

Günümüzde, genel olarak artmakta olan enerji ihtiyacı nedeniyle enerji sürdürülebilirliği kavramı önem kazanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, Türkiye için 2030 yılına ait sürdürülebilir bir elektrik enerjisi karması önerilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede, öncelikle 2030 yılı için Türkiye'nin elektrik enerjisi talebi çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı yöntemi ve yuvarlanma mekanizmalı gri tahmin yöntemi birlikte kullanılarak tahmin edilmiştir. Yapay sinir ağı modeli; nüfus, gayrisafi yurt içi hasıla, ithalat, ihracat ve sanayi üretim endeksi bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulmuştur. Tek değişkenli zaman serisi yaklaşımını temel alan bir yuvarlanma mekanizmalı gri tahmin yöntemi modeli kullanılarak, her bir bağımsız değişkene ait gelecekteki değerler tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerlerden oluşturulan veri seti, yapay sinir ağı modelinde kullanılarak elektrik enerjisi talep tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen talep değerini karşılayabilecek dört farklı elektrik enerjisi karması senaryosu geliştirilmiştir. Geliştirilen senaryolar ideal çözüme yakınlığa göre tercih sıralama tekniği kullanılarak çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal kategorilerinde yer alan 10 farklı kritere göre sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucuna göre 2030 yılı için Türkiye'nin elektrik enerjisi talebi ≈ 384569 GWh olarak tahmin edilmiştir. İdeal çözüme yakınlığa göre tercih sıralama tekniği ile yapılan analize göre en sürdürülebilir elektrik enerjisi karması senaryosu ise nükleer enerji senaryosu olarak bulunmuştur. Sürdürülebilirlik analizi kapsamında ayrıca çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal kategorilerine dört farklı ağırlık seti atanarak bir duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 92807

Anahtar Kelimeler : Enerji, sürdürülebilirlik değerlendirmesi, yapay sinir ağı, gri tahmin, TOPSIS

Sayfa Adedi : 90

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi M. Galip ÖZKAYA

MODELLING AND ANALYSIS OF FUTURE ENERGY SCENARIOS ON THE SUSTAINABILITY AXIS

(Ph. D. Thesis)

Kurtuluş DEĞER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2022

ABSTRACT

At the present time, the energy sustainability concept has gained importance due to the generally increasing energy needs. In the scope of this thesis study, a sustainable electricity mix is aimed to be proposed for Turkey by 2030. Within this framework, firstly the electrical energy demand of Turkey by 2030 was estimated using multilayer perceptron artificial neural network method and grey prediction with rolling mechanism method in combination. The artificial neural network model was built using population, gross domestic product, imports, exports and industrial production index independent variables. Future values of each of the independent variables were predicted by employing a grey prediction with rolling mechanism model that is based on a univariate time series approach. Electricity demand forecast was carried out using the data set formed with predicted values in the artificial neural network model. Four diverse electricity mix scenarios were developed which are able to meet the predicted demand value. The developed scenarios were evaluated in terms of sustainability using the technique for order preference by similarity to ideal solution method according to 10 different criteria that belong to environmental, economic, technical and social categories. Turkey's electricity demand for 2030 was forecasted as ≈ 384569 GWh according to the results of the study. The most sustainable scenario was found as the nuclear energy scenario pursuant to the analysis conducted with the technique for order preference by similarity to ideal solution method. In the scope of the sustainability analysis, a sensitivity analysis was also performed by assigning four diverse weight sets to the environmental, economic, technical and social categories.

Science Code : 92807

Key Words : Energy, sustainability assessment, artificial neural network, grey prediction, TOPSIS

Page Number : 90

Supervisor : Assist. Prof. Dr. M. Galip ÖZKAYA

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca değerli katkılarından dolayı danışmanım Dr. Öğr. Üyesi M. Galip ÖZKAYA'ya, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Kurtuluş BORAN ve Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK ve kıymetli katkılarından dolayı Prof. Dr. Emre BORAN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7

3. METODOLOJİ 17

3.1. Yapay Sinir Ağı Yöntemi 17

3.2. Yuvarlanma Mekanizmalı Gri Tahmin Yöntemi 22

3.3. TOPSIS Yöntemi 28

4. UYGULAMA 33

4.1. Tahmin Modeli 33

4.1.1. Tahmin modelinde kullanılan veri seti 33

4.1.2. YSA-GPRM kombine yöntemiyle talep tahmini 42

4.2. Çok Kriterli Karar Verme Modeli 46

4.2.1. Elektrik enerjisi karması senaryolarının oluşturulması 46

4.2.2. Çok kriterli karar verme modelinde kullanılan veri seti 49

4.2.3. TOPSIS yöntemiyle değerlendirme 75

4.3. Önerilen Yaklaşımın Mevcut Çalışmalarla Karşılaştırılması 77

Sayfa

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 79

KAYNAKLAR 83

ÖZGEÇMİŞ 89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. 2008-2017 yılları için Türkiye'nin sektörlere göre net elektrik enerjisi tüketimi oranları 42

Çizelge 4.2. Seçilen YSA modeline ait MSE ve R değerleri 45

Çizelge 4.3. Her bir bağımsız değişkene ait en düşük MAPE değeri ve bu değere karşılık gelen zaman noktası 45

Çizelge 4.4. Bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkene ait tahmin edilen değerler 46

Çizelge 4.5. Enerji kaynaklarının Türkiye'nin brüt enerji üretimindeki 2018 yılına ait payları 47

Çizelge 4.6. Enerji kaynaklarının Türkiye'nin kurulu gücü içindeki 2018 yılına ait payları 47

Çizelge 4.7. Senaryolara göre teknoloji bazında elektrik enerjisi üretim oranları ve miktarları 48

Çizelge 4.8. Senaryolara göre teknoloji bazında kurulu güç oranları ve miktarları 49

Çizelge 4.9. TOPSIS yöntemiyle değerlendirmede kullanılan kriterlere ait değerler 76

Çizelge 4.10. Asli ağırlık seti ve duyarlılık analizi için ağırlık setleri 77

Çizelge 4.11. Ağırlık setlerine göre senaryoların yakınlık katsayı değerleri ve sıralamaları 77

Çizelge 4.12. Önerilen yaklaşımın literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılması 78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Bir ÇKA YSA modelinin yapısı 19

Şekil 4.1. YSA modeli mimarisine ait şematik 43

Şekil 4.2. YSA modeline ait performans grafiği 44

Şekil 4.3. YSA modeline ait regresyon grafiği 44

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Kısaltmalar	Açıklamalar
ÇKA	Çok Katmanlı Algılayıcı
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
GPRM	Yuvarlanma Mekanizmalı Gri Tahmin
GSMH	Gayrisafi Millî Hasıla
GSYH	Gayrisafi Yurt İçi Hasıla
LM	Levenberg-Marquardt
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MSE	Ortalama Karesel Hata
NES	Nükleer Enerji Santrali
OECD	İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı
PV	Fotovoltaik
R	Korelasyon Katsayısı
SCG	Scaled Conjugate Gradient
SÜE	Sanayi Üretim Endeksi
TOPSIS	İdeal Çözüme Yakınlığa Göre Tercih Sıralama Tekniği
YSA	Yapay Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi sanayileşmede günümüze kadar dünyadaki en önemli girdi olmuştur. Yirminci yüzyılın başlangıcında endüstri 2.0 başlamıştır. Sanayide elektrik kullanımının ve seri üretimin başlaması bu dönemin karakteristik özellikleri olmaktadır. Bu dönemde üretim hacmi büyümüş olup sonuç olarak yaşam standardı yükselmiştir. Elektrik modern yaşam stilinin oluşmasında önemli bir rol oynamıştır. Bugün elektrik enerjisi modern hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Elektrik ısıtma, soğutma, aydınlatma, ulaşım için ve tıbbi cihazlarda, ev eşyalarında ve ofis ekipmanlarında kullanılmaktadır.

Elektrik fosil, nükleer veya yenilenebilir kategorilerinde yer alan enerji kaynaklarından üretilen ikincil bir enerji kaynağıdır. Bu kategorilerdeki enerji kaynaklarını kullanan kömür, doğal gaz, nükleer, hidro, rüzgâr ve solar-PV enerji santralleri gibi çeşitli elektrik üretim teknolojileri bulunmaktadır. Genel itibariyle fosil yakıt teknolojileri sevk edilebilir özellikte olmaları bakımından avantajlıdır. Öte yandan, bunların sera gazı emisyonu miktarında olduğu gibi, çevresel etkisi göreceli olarak fazladır. Nükleer enerji santralleri (NESler) sevk edilebilir olmaları yönüyle faydalıyken bunlara ait yatırım maliyetleri göreceli olarak yüksek olmaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojileri göreceli olarak çevresel etkilerinin düşük olması sebebiyle tercih edilirken, rüzgâr ve solar-PV gibi çeşitli teknolojiler bir dezavantaj olarak sevk edilebilir özellikte değildir.

Dünyada genel olarak sanayileşme ve nüfus artışı gibi nedenlerle enerji ihtiyacı önemli ölçüde artmıştır. Artan enerji ihtiyacı günümüze değin büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanmıştır. Günümüzde de fosil yakıtlar, enerji kaynakları içinde önemini korumaya devam etmektedir. Öte yandan, fosil yakıtların yoğun olarak kullanılması beraberinde çeşitli sorunları da getirmiştir.

Fosil yakıtların tüketimi, yenilenmelerinden daha yüksek hızda olacak şekilde gerçekleşmektedir. Başka bir deyişle, fosil yakıtlar yenilenebilir olarak tanımlanan enerji kaynakları kategorisinde yer almamaktadır. Bu nedenle, fosil yakıtların gelecekte oluşacak enerji talebini süreklilik arz edecek bir biçimde karşılayabilmeleri mümkün görünmemektedir. Bu bakımdan, fosil yakıtların yoğun olarak kullanımının devam etmesi yeryüzünde belirli miktarlarda bulunan fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi anlamına

gelecektir.

Fosil yakıt kullanımı, olumsuz çevresel etkilere de neden olmaktadır. Bunlardan bir tanesi fosil yakıtların sebep olduğu hava kirliliğidir. Hava kirliliği canlıları sağlık bakımından olumsuz bir şekilde etkileyebilmektedir.

Fosil yakıtların önemli ölçüde neden olduğu diğer bir çevresel etki ise iklim değişikliğidir. Fosil yakıtların yanması neticesinde oluşan sera gazları, küresel ısınmaya sebep olmakta ve bu durum da global bir sorun olan iklim değişikliğini beraberinde getirmektedir.

Dünyada teknolojik gelişmeler ve sanayileşme devam etmekte olup enerji ihtiyacını önemli oranda karşılayan fosil yakıtların tükenmeye devam etmesi ve bu yakıtların neden olduğu çevresel etkiler, enerjinin sürdürülebilirliği kavramının günümüzde gittikçe daha çok öne çıkmasını sağlamıştır.

Enerji konusunda sürdürülebilirlik, enerji talebinin gelecekte yeterli bir biçimde ve sürekli olarak karşılanabilmesi ve bu sağlanırken aynı zamanda doğal dengenin korunması ve oluşması muhtemel olan çevresel etkilerin en aza indirilmesi anlamına gelmektedir. Enerjide sürdürülebilirliğin etkin bir biçimde sağlanabilmesi için günümüzde bilimsel çözüm arayışları devam etmektedir.

Enerji sistemlerinde, sürdürülebilirlik konusu çerçevesinde enerji üretiminin sürdürülebilirliği önemli bir alandır. Bu bakımdan, bir enerji türü olan elektrik enerjisi üretiminin sürdürülebilirliği de elektrik enerjisinin günümüzdeki rolü dikkate alındığında önemli olmaktadır.

Elektrik talebindeki büyüme elektrik arzı altyapısında kapasite artışını önemli kılmaktadır. Güvenilir, güvenlikli ve ekonomik elektrik enerjisi sağlanabilmesi için gelecekte oluşacak enerji talebindeki artış dikkate alınarak üretim genişlemesi bakımından doğru kararlar alınması gerekli olmaktadır. Elektrik enerjisi üretimi kapasitesi planlama kararlarının alınabilmesi ve böylece elektrik enerjisi üretiminin yeterli düzeyde gerçekleştirilebilmesi için öncelikle gelecekteki elektrik enerjisi talep değerinin doğruya yakın bir düzeyde tahmin edilmesi gerekmektedir. Esasen üretim teknolojilerinden hiçbirisi tek başına şebekedeki elektrik üretimini sürdürmek için yeterli değildir. Dolayısıyla, elektrik enerjisi

karmasındaki enerji teknolojilerinin oranlarına karar verilmesi için elektrik enerjisi talep tahmini ve çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal boyutları ilgilendiren öncelikler temelindeki sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve enerji kaynağının uygunluğu temel teşkil etmektedir.

Talep tahmin yöntemleri, farklı bilimsel yaklaşımları bünyesinde bulunduran geniş bir bilimsel çalışma alanını kapsamaktadır. Elektrik enerjisi talep tahmini için üç kategori kapsamında sınıflandırılabilecek çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Geleneksel yaklaşımlar kategorisi regresyon, zaman serileri ve Box-Jenkins yöntemlerini içermektedir. Esnek programlama yaklaşımları kategorisi genetik algoritmalar, bulanık mantık ve yapay sinir ağı (YSA) gibi yöntemleri kapsamaktadır. Üçüncü kategori yeni ortaya çıkan teknikler olup bunlar parçacık sürü optimizasyonu, karınca kolonisi optimizasyonu ve destek vektör makineleri olmaktadır. Elektrik enerjisi talep tahmini işlemi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu durum dikkate alınarak hata oranı düşük seviyede olan tahmin yöntemlerinin geliştirilmesi ve mevcut yöntemler arasında tahmin işlemi için en uygun olanlarının araştırılması konuları bilimsel olarak üzerinde çalışılmasına ihtiyaç duyulan konular olmaktadır.

Elektrik enerjisi talep tahminini etkileyen faktörlerin tahminin kısa dönemli ya da uzun dönemli olmasına bağlı olduğu öne sürülmektedir [1]. Ayrıca, belirlenen tahmin süresi aralığı için elektrik enerjisi talebi ve bazı faktörler arasında doğrusal olmayan ilişkiler de mevcut olabilmektedir.

Oluşturulan bir elektrik enerjisi talep tahmin modelinde bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkenler yer alır. Böyle bir tasarımda, bağımsız değişkenler elektrik enerjisi talebini etkileyen faktörleri temsil ederken bağımlı değişken ise elektrik enerjisi talebini temsil etmektedir.

Bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arasında genellikle doğrusal olmayan ilişkiler mevcut olup YSAlar doğrusal olmayan ilişkileri yakalamak bakımından güçlüdürler [2].

Elektrik enerjisi üretim işlemi, elektrik enerjisi tedarik zincirinin temel bir bileşenidir [3]. Çeşitli enerji üretim teknolojilerini ihtiva eden elektrik üretim karmasının sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi işlemi sürdürülebilirliğin birden çok boyutuyla ele

alınmasını gerektiren çok yönlü bir konudur. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) farklı seçenekleri çeşitli kriterlere göre karşılaştırmaya olanak sağlayan kullanışlı bir yaklaşımdır. Birçok ÇKKV yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları ideal çözüme yakınlığa göre tercih sıralama tekniği (TOPSIS), visekriterijumsko kompromisno rangiranje, analitik ağ süreci, çok ölçütlü değer teorisi ve analitik hiyerarşi süreci olmaktadır. ÇKKV yöntemleri temel olarak çözüm kümesi yapı tipi veya problem tipine göre sınıflandırılmaktadır. Çözüm kümesi yapı tipine göre ilk grup sonlu sayıda çözüme sahip olan kesikli ÇKKV olmaktadır. İkinci grup ise sonsuz sayıda çözüme sahip olan sürekli ÇKKV olmaktadır. Problem tipi seçim, karar, sınıflandırma veya sıralama olabilir. Uygun bir ÇKKV yöntemi belirlenmesinde problem tipi anahtar bir faktör olmaktadır.

Bu çalışmada bağımsız değişkenler olan nüfus, gayrisafi yurt içi hasıla (GSYH), ithalat, ihracat ve sanayi üretim endeksi (SÜE) faktörleri kullanılarak bir çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) YSA modeli geliştirilmiştir.

Her bir bağımsız değişken bazında değer tahmini yapılabilmesi amacıyla yuvarlanma mekanizmalı gri tahmin (GPRM) yöntemini esas alan bir zaman serisi kullanılmıştır. Bu yöntemle 2030 yılına kadar tahmin edilen değerler, Türkiye'nin 2030 yılı elektrik enerjisi talep değerinin tahmininin gerçekleştirilmesi amacıyla YSA modelinde kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı elektrik enerjisi karması senaryolarını karşılaştırmak ve en sürdürülebilir seçeneğe karar vermek amacıyla bir ÇKKV yöntemi olan TOPSIS kullanılmıştır.

Türkiye'nin yakın tarihteki elektrik enerjisi karması [4, 5], Türkiye'de NES kurulumuyla ilgili yakın tarihteki durum [6] ve bu çalışmada gerçekleştirilen 2030 yılı için elektrik enerjisi talebi tahmini dikkate alınarak elektrik üretim teknolojileri bakımından farklı oransal yapılara sahip olan dört adet elektrik enerjisi karması senaryosu oluşturulmuştur.

Literatür araştırması sonucunda çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal olmak üzere dört farklı kategori altında sınıflandırılan on temel kriter seçilmiştir. Söz konusu kategorilere eşit ağırlıklar atanmıştır. Bununla birlikte, her kategoriye farklı ağırlık setleri atanarak bir duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması, enerji arzı sistemleriyle ilgili bilimsel araştırma alanına üç farklı biçimde katkı sağlamaktadır. Birinci olarak, uzun dönemli elektrik enerjisi talep tahmini işlemi için YSA ve GPRM tekniklerinden oluşan uygulanabilir bir yöntem geliştirilmiş olmaktadır.

İkinci olarak, literatürde özellikle elektrik enerjisi karması sürdürülebilirliği üzerine yoğunlaşan fazla sayıda çalışma bulunmamaktadır ve bu tez çalışması literatür araştırması çerçevesinde, TOPSIS yöntemi ile 2030 yılı için Türkiye'nin elektrik enerjisi karmasının sürdürülebilirliğini inceleyen ilk çalışmadır.

Üçüncü olarak, elektrik enerjisi talep tahmini işlemi, elektrik enerjisi karması için karar verme işlemine dâhil edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında yapılan literatür araştırması tez çalışmasında kullanılan yöntemlerin incelenmesi temelinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde YSA yöntemleriyle enerji talep tahmini, gri tahmin yöntemi ve enerji sistemlerinin ÇKKV yaklaşımıyla değerlendirilmesiyle ilgili olan literatür özeti sunulmuştur.

YSA yaklaşımı, literatürde yer alan çalışmalarda gerek uzun dönemli enerji talebi tahmini için gerek uzun dönemli elektrik enerjisi talebi tahmini için kullanılmıştır. Bu çalışmaların kapsamları modellerde kullanılan YSA mimarileri ve bağımsız değişken setleri gibi çeşitli konular bakımından değişiklik göstermektedir.

Belirli sayıdaki çalışmalar, Türkiye'deki uzun dönemli elektrik enerjisi tüketiminin tahmininin gerçekleştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda araştırmacılar geliştirmiş oldukları modellere ait tahmin performanslarını da karşılaştırmışlardır.

Araştırmacılar [2]'de, Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketiminin tahmin edilmesi için üç farklı YSA modeli geliştirmişlerdir. Bu modellerde, ÇKA ağ topolojisi kullanılmış olup eğitim algoritması olarak geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Modellerde üçer adet katman bulunmaktadır ve modeller girdi ve çıktı değişkenleri bakımından farklılık göstermektedir.

Sosyoekonomik değişkenlerin tercih edildiği modellerde, birinci modele ait girdi değişkenleri nüfus, gayrisafi millî hasıla (GSMH), ithalat ve ihracat olmaktadır. İkinci modelde, girdi değişkenleri olarak nüfus, GSMH ve ihracatın ithalata oranı kullanılmıştır. Birinci ve ikinci modellerin çıktı değişkeni, toplam elektrik tüketim miktarıdır. Üçüncü modelde, girdi değişkeni yıl bazında zaman olup çıktı değişkenleri ise nüfus, GSMH, ithalat, ihracat ve toplam elektrik tüketimi olmaktadır.

Araştırmacılar [1]'de, Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinin tahmin edilmesi amacıyla farklı mimarilere sahip olan iki adet YSA modeli geliştirmişlerdir. Modellerden bir tanesi, ileri beslemeli geri yayılımlı üç katmanlı bir ÇKA YSA modelidir. Diğer modelde ise tekrarlayan YSA mimarisi kullanılmıştır. Her iki modelde girdi değişkenleri GSMH,

GSYH, nüfus, hane halkı sayısı, SÜE, ham petrol fiyatı, kişi başı elektrik tüketimi ve elektrik fiyatıdır. Çıktı değişkeni ise elektrik enerjisi talebi olmaktadır.

Araştırmacılar [7]'de, Türkiye'nin net elektrik enerjisi tüketimini tahmin etmek amacıyla YSA, çoklu doğrusal regresyon ve en küçük kareler destek vektör makinesi yöntemlerini kullanan üç farklı model geliştirmişlerdir. YSA modeli, çok katmanlı ileri beslemeli geri yayılımlı bir modeldir ve modele ait iki adet gizli katman bulunmaktadır. Modellerdeki bağımsız değişkenler brüt elektrik üretimi, kurulu kapasite, nüfus ve toplam abonelik sayısıdır.

Hsu ve Chen [8], Tayvan için yıllık bölgesel puant yük tahmini gerçekleştirmek amacıyla bir YSA modeli geliştirmiş olup bu modelin tahmin performansını bir regresyon modeliyle karşılaştırmışlardır. YSA modeli üç katmandan oluşmaktadır. Girdi katmanında bölgesel GSYH, bölgesel nüfus ve bölgesel en yüksek sıcaklık değişkenleri yer alırken çıktı katmanında bölgesel puant yük değişkeni yer almaktadır.

Tso ve Yau [9], Hong Kong için evsel elektrik enerjisi tüketimi tahmininin gerçekleştirilmesi çerçevesinde YSA, çoklu regresyon analizi ve karar ağaçları yöntemlerinin tahmin performanslarını karşılaştırmışlardır. YSA yönteminin uygulanmasında konut tipi, konuta ait karakteristikler ve cihaz sahipliği kategorileri altında yer alan değişkenler kullanılmıştır. Çalışmada, yaz ve kış mevsimleri için iki farklı ÇKA YSA modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen her iki modelde de bir adet gizli katman yer almaktadır.

Literatürde çeşitli çalışmalar YSA yönteminin uzun dönemli enerji talebi tahmininde kullanılması üzerine odaklanmıştır.

Sözen, Arcaklioğlu ve Özkaymak [10] Türkiye'nin gelecekteki net enerji tüketiminin belirlenmesi amacıyla YSA yaklaşımını kullanarak iki adet gizli katmana sahip olan ancak girdi değişkenleri farklı olan iki model geliştirmişler ve bu modelleri karşılaştırmışlardır.

Birinci modele ait girdi değişkenleri nüfus, brüt üretim, kurulu güç, ithalat ve ihracattır. İkinci modele ait girdi değişkenleri doğal gaz, linyit, kömür, hidrolik, fuel-oil, dizel yakıt ve diğerleri olarak verilmiştir. Her iki modele ait çıktı değişkeni ise net enerji tüketimidir.

Sözen, Akçayol ve Arcaklioğlu [11] Türkiye'nin net enerji tüketimi tahmininin gerçekleştirilmesi amacıyla YSA yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, geri yayılım algoritması ve evrimsel algoritma kullanılmıştır. Çalışma kapsamında girdi değişkenleri yıl, nüfus, kurulu güç ve brüt üretim; çıktı değişkenleri ise net enerji tüketimi olan ve iki gizli katmanı bulunan çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA modeli oluşturulmuştur.

Sözen ve Arcaklioglu [12] Türkiye'nin net enerji tüketiminin tahmin edilmesi amacıyla YSA yöntemini uyguladıkları çalışmada, girdi değişkenleri farklı olan üç ayrı model geliştirmişlerdir.

Birinci modelde girdi katmanında nüfus, kurulu güç, brüt üretim, enerji ithalatı ve enerji ihracatı değişkenleri yer almaktadır. İkinci modelde girdi değişkenleri olarak GSMH ve nüfus değişkenleri kullanılmıştır. Üçüncü modelde, girdi değişkenleri olarak GSYH ve nüfus değişkenleri girdi katmanında yer almaktadır. Modellerin her birine ait çıktı katmanında net enerji tüketimi değişkeni bulunmaktadır. YSA yapısı ve nöron sayısı evrimsel algoritmayla belirlenmiştir. Modellerde, gizli katmana ait nöron ağırlıklarının modifikasyonlarının ve hataların belirlenmesinde geri yayılım algoritması kullanılmıştır.

Sözen, Arcaklioglu ve Tekiner [13] çalışmalarında YSA yöntemini Türkiye'nin net enerji tüketiminin tahmininde kullanmışlardır. Çalışmada üç farklı model oluşturulmuştur.

Birinci modelde girdi değişkenleri doğal gaz, linyit, kömür, hidrolik, fuel-oil, dizel yakıt ve diğerleri olup ağ eğitiminde Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması kullanılmıştır. İkinci modelde girdi katmanında GSMH ve nüfus girdi değişkenleri yer almaktadır. Üçüncü modelde, girdi değişkenleri olarak GSYH ve nüfus kullanılmıştır. İkinci ve üçüncü modellerde Levenberg-Marquardt (LM) eğitim algoritmasıyla ağın eğitimi gerçekleştirilmiştir. Her üç modelde de net enerji tüketimi çıktı değişkeni olmaktadır.

Sözen ve Arcaklioğlu [14] çalışmalarında Türkiye'nin temel enerji kaynakları tüketiminin tahmin edilmesi amacıyla YSA yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada girdi değişkenleri nüfus, kurulu güç, brüt üretim, ithalat, ihracat ve net enerji tüketimi olarak belirlenmiştir. SCG eğitim algoritması kullanılan çalışmada çıktı değişkenleri ise doğal gaz, linyit, kömür, hidrolik ve fuel-oil olmaktadır.

Kankal, Akpınar, Kömürcü ve Özşahin [15] Türkiye'nin enerji tüketimini tahmin etmek amacıyla bir bağımsız değişken setinde yer alan değişkenlerin çeşitli kombinasyonlarını kullanarak dört farklı model oluşturmuşlardır. Bu modeller YSA, çoklu doğrusal regresyon analizi ve güç regresyon analizi yaklaşımları kullanılarak tahmin performansı bakımından karşılaştırılmıştır.

Model 1 için bağımsız değişkenler nüfus ve GSYH olarak belirlenmiştir. Model 2 için bağımsız değişkenler olarak nüfus, GSYH, ithalat miktarı ve ihracat miktarı seçilmiştir. Model 3 için bağımsız değişkenler nüfus, GSYH ve istihdam olmaktadır. Model 4 için bağımsız değişken setinde yer alan tüm değişkenler seçilmiştir. Bu değişkenler; nüfus, GSYH, ithalat miktarı, ihracat miktarı ve istihdamdır. YSA yönteminin uygulanmasında her bir model için üç katmanlı bir ağ yapısı seçilmiş olup modellerin hepsinde çıktı katmanında enerji tüketimi yer almaktadır.

Uzlu, Kankal, Akpınar ve Dede [16] Türkiye'nin enerji tüketimi tahmininin gerçekleştirilmesi için YSA yaklaşımı kullandıkları çalışmalarında, geri yayılım algoritması ve öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon algoritmalarının tahmin performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada, ileri beslemeli üç katmanlı bir YSA yapısı seçilmiştir. Girdi değişkenleri GSYH, nüfus, ithalat ve ihracat olarak belirlenmiş olup çıktı değişkeni ise enerji tüketimidir.

Geem ve Roper [17] Güney Kore'nin enerji talebinin tahmin edilmesi için YSA modelleri, çoklu doğrusal regresyon modeli ve üstel modeller geliştirmiş ve bu modellerin tahmin performanslarını karşılaştırmışlardır.

Tasarlanan YSA modelleri ileri beslemeli geri yayılımlı modellerdir. Her iki YSA modelinin girdi katmanında GSYH, nüfus, ithalat miktarı ve ihracat miktarı girdi değişkenleri bulunurken çıktı katmanında enerji talebi çıktı değişkeni yer almaktadır.

Literatürde gri tahmin yöntemi ve varyantları çeşitli çalışmalarda elektrik enerjisi talebi, enerji kaynakları tüketimi, uzun dönemli birincil enerji tüketimi, GSYH, nüfus ve sanayi üretimi çıktısı konularında tahmin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Akay ve Atak [18] Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi talebinin ve sanayi sektörüne ait

elektrik enerjisi talebinin tahmin edilmesi amacıyla GPRM yöntemini kullanmışlardır.

Boran [19] Türkiye'deki doğal gaz tüketimi miktarı tahminini gerçekleştirmek amacıyla çalışmasında GPRM yaklaşımını kullanmıştır.

Li, Yamaguchi, Lin ve Nagai [20] Çin için GSYH, nüfus ve birincil enerji tüketimi tahmininde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir gri model önermişlerdir.

Pao, Fu ve Tseng [21] Çin'in karbondioksit (CO_2) emisyonları, enerji tüketimi ve reel GSYH tahmininde kullanılmak amacıyla geliştirilmiş, doğrusal olmayan bir gri Bernoulli modeli önermişlerdir. Geliştirilmiş model, tahmin kabiliyeti bakımından gri model ve bütünleşik otoregresif hareketli ortalama modeliyle karşılaştırılmıştır.

Wang ve Hsu [22] çalışmalarında, Tayvan'ın ileri teknoloji sanayi çıktısını tahmin etmek için, geliştirilmiş bir gri tahmin modeli oluşturmuşlardır ve bu modeli tahmin performansı bakımından orijinal GM(1,1) modeli ve Bayes GM(1,1) modeliyle karşılaştırmışlardır.

Literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda, enerji sistemleri TOPSIS ve diğer çeşitli ÇKKV yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Boran, Boran ve Dizdar [23] Türkiye için enerji politikaları bağlamında çeşitli elektrik üretim teknolojilerini değerlendirmişlerdir. Bu teknolojiler fosil yakıt, rüzgâr enerjisi, nükleer enerji, doğal gaz, güneş enerjisi ve hidrolik enerjidir.

Çalışmada yer alan değerlendirmeye ait kategori başlıkları ekonomik, çevresel, teknik ve sosyal olmaktadır. Değerlendirme için bilgi aksiyomu ve bulanık bilgi aksiyomunu içeren çok kriterli aksiyomatik tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Boran ve diğerleri [24] çalışmalarında modifiye edilmiş TOPSIS yöntemi kullanarak Türkiye için elektrik enerjisi üretim seçeneklerini değerlendirmişlerdir. Fosil yakıt, jeotermal, rüzgâr, hidrolik ve gaz bazlı elektrik enerjisi üretimi seçeneklerinin değerlendirildiği çalışmada verim, kurulum maliyeti, elektrik enerjisi fiyatı ve CO_2 emisyonu kriterleri dikkate alınmıştır.

Boran [25] bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak Türkiye'deki fosil yakıtlı, jeotermal, rüzgâr, hidrolik ve gaz enerji santrallerini değerlendirmiştir. Değerlendirme için verim, kurulum maliyeti, elektrik enerjisi fiyatı, CO_2 emisyonu ve sosyal kabul kriterleri kullanılmıştır.

Boran [26] Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr, hidrolik, güneş, jeotermal ve biyokütle seçeneklerini sezgisel bulanık visekriterijumsko kompromisno rangiranje yöntemini kullanarak değerlendirmiştir. Değerlendirmede teknolojik, çevresel, sosyolojik ve ekonomik kategori başlıkları dâhilinde olmak üzere toplam 12 adet kriter kullanılmıştır.

Atmaca ve Basar [27] analitik ağ süreci yöntemini kullanarak Türkiye'de mevcut olan enerji santrallerini ve yakın gelecekte kurulumu yapılması düşünülen enerji santrallerini değerlendirmişlerdir.

İlgili çalışmada doğal gaz enerji santrali, jeotermal enerji santrali, hidroelektrik enerji santrali, kömür/linyit enerji santrali ve NES alternatifleri; teknoloji ve sürdürülebilirlik, ekonomik, yaşam kalitesi ve sosyoekonomik başlıklarına sahip olan kategorilerde yer alan kriterlerle değerlendirilmiştir.

Atilgan ve Azapagic [28] çok ölçütlü değer teorisi yöntemini kullanarak Türkiye'deki elektrik enerjisi sektörünün bütünleşik yaşam döngüsü sürdürülebilirliği değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir.

İlgili çalışmada çevresel, ekonomik ve sosyal başlıklı kategorilerde bulunan toplam 20 adet yaşam döngüsü sürdürülebilirlik kriteri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Linyit, taş kömürü, gaz, büyük rezervuarlı hidrolik, küçük rezervuarlı hidrolik, nehir tipi hidrolik, rüzgâr ve jeotermal değerlendirilen enerji santrali türleri olmaktadır.

Kuleli Pak, Albayrak ve Erensal [29] Türkiye için kömür ve linyit, petrol, doğal gaz, nükleer, biyokütle, jeotermal, hidrolik, güneş ve rüzgâr bazlı enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirlik konusunu değerlendirmişlerdir. Sosyal, ekonomik ve çevresel başlıklı kategorilerde yer alan kriterlerle yapılan sürdürülebilirlik değerlendirmesi için analitik ağ süreci yöntemi ve fayda, fırsat, maliyet ve risk yöntemi birlikte

kullanılmıştır.

Shen, Lin, Li ve Yuan [30] Tayvan'ın sürdürülebilir enerji politikaları prensipleri kapsamında yer alan enerji, çevre ve ekonomi hedefleri çerçevesinde çeşitli kriterlerle güneş enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, okyanus enerjisi, rüzgâr enerjisi ve pompaj depolamalı olmayan hidrolik enerji alternatiflerini değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, değerlendirme için bulanık analitik hiyerarşi süreci yöntemini kullanmışlardır.

San Cristóbal [31], İspanya'nın yenilenebilir enerji planının kapsadığı sektörlerden olan rüzgâr enerjisi, hidroelektrik, solar termoelektrik, biyokütle ve biyoyakıt sektörlerine yönelik toplam 13 adet yenilenebilir enerji projesi arasından visekriterijumsko kompromisno rangiranje ve analitik hiyerarşi süreci yöntemlerinin bir kombinasyonunu kullanarak proje seçimi gerçekleştirmiştir. Proje seçiminde 7 farklı kriter dikkate alınmıştır.

Ribeiro, Ferreira ve Araújo [32] Portekiz için enerji senaryolarını değerlendirmek için bilgisayar ortamında bir ÇKKV aracı tasarlamışlardır. Çalışmada değer ölçüm yöntemleri kategorisinde yer alan bir metodoloji kullanılarak beş farklı hipotetik enerji senaryosu ele alınmıştır.

İlgili çalışmada yer alan senaryolardan birincisi mevcut durum senaryosudur. İkinci senaryo yeni doğal gaz enerji santrallerinin kurulmasını, üçüncü senaryo kömürle çalışan yeni enerji santrallerinin kurulmasını, dördüncü senaryo yeni hidroelektrik santraller ve gaz enerji santrallerinin kurulmasını esas almaktadır. Beşinci senaryo teması maksimum yenilenebilir enerji olup yeni hidroelektrik enerji santrallerinin ve rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulumunu esas almıştır. Çalışmada ekonomik, çevresel, sosyal ve teknik boyutları kapsayan 13 kriter kullanılarak değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

Hong, Bradshaw ve Brook [33] Japonya tarafından değerlendirilen dört farklı enerji karması senaryosunu sürdürülebilirlik bakımından ÇKKV yaklaşımıyla analiz etmişlerdir.

İlgili çalışmada yer alan senaryolarda nükleer enerji, kentsel atıktan enerji, endüstriyel atıktan enerji, katı biyoyakıttan enerji, jeotermal enerji, fotovoltaik (PV), karasal rüzgâr

enerjisi, deniz üstü rüzgâr enerjisi, hidroelektrik, pompaj depolamalı hidroelektrik, petrol ve doğal gaz seçenekleri belirli oranlarda bulunmaktadır. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi, belirlenen kriterlerle senaryoların sosyal, ekonomik ve çevresel etkileri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

Santoyo-Castelazo ve Azapagic [34] çok ölçütlü değer teorisi yöntemini kullanarak Meksika elektrik enerjisi arz sisteminin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları bakımından yaşam döngüsü temelinde bütünleşik sürdürülebilirlik değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir.

İlgili çalışma kapsamında 11 adet elektrik enerjisi karması senaryosu geliştirilmiştir. Biyokütle, kömür, kömür karbon yakalama ve depolama, gaz, gaz karbon yakalama ve depolama, jeotermal, ağır akaryakıt, hidrolik, nükleer, okyanus, solar termal, solar-PV ve rüzgâr enerjisi seçenekleriyle oluşturulan elektrik enerjisi karmaları 17 adet sürdürülebilirlik kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Brand ve Missaoui [35] elektrik sistemi modellemesi ve ÇKKV yöntemlerini birlikte kullanan bir yaklaşım izledikleri çalışmalarında TOPSIS yöntemiyle Tunus için beş farklı elektrik enerjisi karması senaryosunu değerlendirmişlerdir.

İlgili senaryolardan ilki mevcut durum senaryosudur. İkinci senaryo, kömürle çalışan enerji santralleriyle elektrik enerjisi üretim sisteminin çeşitlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Üçüncü senaryo NES kurulumuyla çeşitlendirmeyi esas almaktadır. Dördüncü senaryo kömür ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimiyle çeşitlendirme yaklaşımıyla oluşturulmuştur. Beşinci senaryo ise yenilenebilir enerji ile çeşitlendirme yaklaşımını temel almaktadır.

İlgili çalışmaya ait elektrik enerjisi karması senaryolarında kömürle çalışan enerji santrali, NES, açık çevrimli gaz santrali, kombine çevrim gaz santrali, rüzgâr enerjisi santrali, PV güneş enerjisi santrali ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali teknolojileri yer almaktadır. Analizde ekonomik maliyetler, arz güvenliği, sosyoekonomik kriterler ve ekolojik kriterler kategorilerinde yer alan 13 adet kriter kullanılmıştır.

Kaya ve Kahraman [36] modifiye edilmiş bulanık TOPSIS yöntemi kullanarak

konvansiyonel, nükleer, güneş, rüzgâr, hidrolik, biyokütle ve kojenerasyon enerji üretim teknolojilerini karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar çalışmada, değerlendirme işlemi için teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal başlıklı kategorilerde yer alan toplam 9 adet kriter kullanmışlardır.

Maxim [37] çalışmasında kömür, doğal gaz, kojenerasyon, pistonlu motor, büyük hidrolik, küçük hidrolik, karasal rüzgâr, deniz üstü rüzgâr, jeotermal, PV, solar termal, biyokütle ve nükleer enerji üretim teknolojilerini sürdürülebilirlik bakımından değerlendirmiştir.

İlgili çalışmada, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ekonomik, teknolojik, çevresel ve sosyopolitik kategorilerinde yer alan toplam 10 adet kriter kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme amacıyla ağırlıklı toplam ve çok nitelikli fayda yöntemi birlikte kullanılmıştır.

3. METODOLOJİ

Bu tez çalışması kapsamında uygulanan metodoloji iki aşamadan oluşmaktadır. Tez çalışmasının birinci aşamasında, elektrik enerjisi tüketiminin tahmininin gerçekleştirilmesi amacıyla YSA yöntemi ve GPRM yöntemi birlikte kullanılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, belirlenen elektrik enerjisi karmalarını sürdürülebilirlik bakımından değerlendirmek amacıyla TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

3.1. Yapay Sinir Ağı Yöntemi

YSAlar, biyolojik sinir sistemlerinin belirli özellikleri örnek alınarak geliştirilmiş, bilgi işleme özelliğine sahip olan yapay zekâ sistemleridir. YSA, değişkenler arasında var olan ilişkilerin tam olarak belirlenemediği, analitik çözüm geliştirmenin mümkün olmadığı problemlerin çözümünde avantaj sağlamaktadır.

YSA yaklaşımı probleme ait olan değişkenler arasında doğrusal olmayan ilişkiler olması durumunda problem için çözüm geliştirilmesinde kullanılabilir. Bu bakımdan, YSA iş akışı ele alınacak olursa, öncelikle problemin yapısının incelenmesi, girdi ve çıktı değişkenlerinin belirlenmesi ve çözüm için uygun ve yeterli miktarda veri olup olmadığının araştırılması gerekmektedir. Bu aşamalardan sonra, YSA tasarımı gerçekleştirilerek problemin çözülmesi sağlanabilir.

YSA tasarımında ilk adım, YSA yapısının belirlenmesidir. Bu aşamada uygulanacak YSA mimarisi seçilir ve bu ağ mimarisi çerçevesinde uygulanacak bir ağ topolojisi belirlenir. Ayrıca sinir ağına ait işlemci elemanlar için aktivasyon fonksiyonları seçilir.

Daha sonraki aşama ağın eğitilmesi aşamasıdır. Bu amaçla, belirli bir YSA eğitim algoritması seçilir. Sonrasında, ağın eğitiminde kullanılacak veri seti belirlenerek veriler normalize edilir. Bu veri seti eğitim, onaylama ve test işlemlerinde kullanılmak üzere uygun oranlara sahip olan kısımlar halinde ayrılır. Sinir ağı, bu veri seti kullanılarak eğitilir.

Ağın eğitimi sonucunda elde edilen çıktıların değerlerinin, gerçek çıktı değerlerine kıyasla minimum hata oranına sahip olması hedeflenir. Uygun bir minimum hata değerine ulaşıldıktan sonra ağ örneklerden öğrenmiş olur. Eğitim işlemi tamamlanan YSA modeli kullanıma hazır hale gelir ve modele yeni veriler sağlanarak çıktı değerleri elde edilebilir.

YSA modelinin tasarlanması ve modelin kullanımı ile ilgili iş akışına ait aşamalardan görüleceği üzere YSA ile ilgili iki temel konu YSA modelinin yapısı ve eğitimidir.

Bir YSA modeli en temelde nöronlar, nöronlar arasında yer alan bağlantılar ve katmanlardan oluşur. Biyolojik sinir sisteminden esinlenerek geliştirilen YSA nöronu, biyolojik sinir hücresine kıyasla daha basit bir yapıya sahiptir.

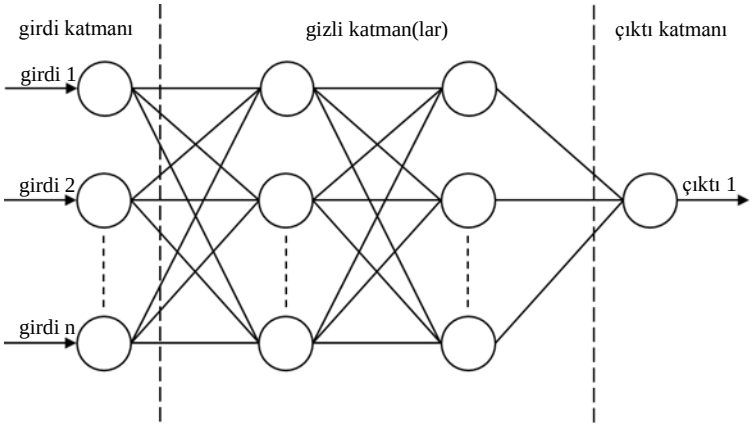
Nöronlar, YSA yapısında yer alan temel işlemci elemanlardır. Bununla birlikte nöronlar, sistem yapısında bağlantı noktası olma özelliğine de sahiptir. Nöronlar bir araya gelerek sinir ağı yapısını oluşturur.

Bağlantı noktaları arasında sinyal iletimi gerçekleştirilerek YSA içinde bilgi akışı sağlanmış olmaktadır. Nöronlar arası bağlantılar sinaps olarak da adlandırılmaktadır.

Bir nöronun giriş kısmına birden fazla sinaps bağlanabilir ve bu sinapslar farklı sinyaller taşıyabilirler. Öte yandan, nöron çıkışında tek bir bilgi yer alır ve birden fazla sinaps olsa dahi aynı bilgi iletilir.

Bir YSA modelinde mimari nöronların birbirine göre düzenlenmesini; topoloji ise belirli bir YSA mimarisine ait farklı yapısal kombinasyon olasılıklarını tanımlamaktadır [38].

Bir YSA tek katmanlı veya çok katmanlı bir mimariye sahip olabilir. Bir ÇKA YSA yapısında üç farklı tipte katman yer almakta olup bunlar bir adet girdi katmanı, en az bir adet gizli katman ve bir adet çıktı katmanıdır, bununla birlikte katmanlar üzerinde nöronlar yer almaktadır [39]. Şekil 3.1’de ‘n’ adet bağımsız değişken ve bir adet bağımlı değişken içeren bir ÇKA YSA modeline ait genel yapı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bir ÇKA YSA modelinin yapısı

Katmanlar arasındaki bilgi akışının yönü, YSA'nın diğer bir belirleyici özelliğidir. İleri beslemeli YSA'da bilgi akışı sadece girdi katmanından çıktı katmanına doğru olacak şekilde gerçekleşmektedir. Bu özelliğe sahip olan bir YSA'da bilgi akışı, ilerideki bir katmandan geride yer alan bir katmana doğru ya da aynı katman içerisinde yer alan nöronlar arasında gerçekleşmez.

ÇKA mimarisine sahip olan bir YSA'da bilgi girişi ilk katman olan girdi katmanında gerçekleşir. Bu bakımdan girdi katmanında modelde yer alan bağımsız değişken sayısınca nöron bulunur. Bu katmanda yer alan nöronlarda işlem yapılmaz ve bilgi gizli katmana iletilir. Sinyaller girdi katmanı-çıktı katmanı doğrultusunda olmak üzere sayısal değer olarak iletilmektedir.

Sinaps ve nöronlarda da matematiksel işlemler gerçekleştirilmektedir. Her sinaps belirli bir ağırlık değerine sahiptir ve bu ağırlık değeri bağlantının önem derecesini göstermektedir. İlk sinaptik ağırlık değerleri genel olarak rastgele bir biçimde belirlenmektedir.

Giriş katmanından sinapsa gelen veri değeri sinaptik ağırlık değeriyle çarpılarak her bir gizli katman nöronuna iletilir. Her bir gizli katman nöronunda ilk işlem olarak nörona iletilen değerler toplanır ve bu değere bir bias değeri eklenir. Elde edilen değer net girdi değeri olarak tanımlanmaktadır.

Nöronda ikinci işlem olarak, net girdi değeri aktivasyon fonksiyonunda yerine konularak net çıktı değeri elde edilir. Bu bakımdan, nöronlar bilgi işleyen birimlerdir ve aktivasyon fonksiyonu nöronun temel bileşenlerinden olup nörona ait çıktı değerinin genliğinin

sınırlandırılmasını temin eder [40]. Bu genlik sınırları fonksiyona özgüdür. Aktivasyon fonksiyonu nöronun etkinleştirilme durumunu belirler.

Aktivasyon fonksiyonu, doğrusal veya doğrusal olmayan özellikte olabilir. Gizli katmanda yer alan nöronlar için doğrusal olmayan özellikteki bir aktivasyon fonksiyonu seçilerek modelin doğrusal olmaması sağlanır. Bu yaklaşım sayesinde YSA modeli doğrusal olmayan karmaşık bağlantı özelliklerini öğrenebilir.

Genel olarak, aktivasyon fonksiyonları türevlenebilir fonksiyonlardan seçilmektedir. Gizli katman nöronlarına ait aktivasyon fonksiyonlarında gerçekleşen işlemler sonucunda hesaplanan değerler sinapslar vasıtasıyla eğer başka gizli katmanlar mevcutsa sırasıyla tüm gizli katmanlara ve en sonunda çıktı katmanına iletilir, eğer başka bir gizli katman yoksa doğrudan çıktı katmanına iletilir.

Çıktı katmanındaki nöron sayısı, bağımlı değişken sayısına eşit olmaktadır. Çıktı katmanı nöronunda gerçekleştirilen işlemler, gizli katman nöronu işlemleriyle aynı olup gizli katmandaki durumdan farklı olarak doğrusal bir aktivasyon fonksiyonu seçilebilmektedir. Çıktı katmanında gerçekleştirilen işlemler sonucunda çıktı değeri elde edilir.

YSA modellerinde, çeşitli tiplerde aktivasyon fonksiyonları kullanılabilmektedir. Bunlardan en yaygın kullanım alanı bulunan iki tanesi Eş. 3.1 ile verilen hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu ve Eş. 3.2 ile verilen doğrusal fonksiyondur [41].

$$a = \frac{e^{n} - e^{-n}}{e^{n} + e^{-n}} \tag{3.1}$$

$$a = n \tag{3.2}$$

Geliştirilen bir YSA modeli, tahmin performansının incelenmesi amacıyla eğitilir. Mühendislik uygulamalarında ÇKA modellerinin eğitiminde, geri yayılım algoritması avantajlı olmaktadır [15]. Bu bakımdan model öğrenme işlemini danışmanlı öğrenme yaklaşımı çerçevesinde modele sunulan verileri kullanarak gerçekleştirmektedir.

Danışmanlı öğrenmede, belirli bir girdi verisi ve çıktı verisi modele gösterilerek modelin

bu çıktı değerine en yakın değeri üretmesi beklenir. Öncelikle model için ilk ağırlık ve bias değerleri belirlenir ve daha sonra modelin eğitimine başlanır.

Geri yayılım algoritması kullanılarak yapılan eğitimde, veri seti modele sunulur ve belirlenen bir hata fonksiyonu kullanılarak hata değeri hesaplanır. Bu hata değeri model tarafından üretilen tahmin değerlerinin gerçek değerlere ne kadar yaklaştığının bir göstergesidir. Sonraki aşamada ise ağırlık değerleri çıktı katmanından girdi katmanına doğru hata değerini azaltacak biçimde düzenlenir.

Modelin tüm veri setini gördüğü tam bir döngü epoch olarak tanımlanmaktadır. Model için uygun bulunan minimum bir hata değerine ulaşıldığında modelin eğitimi sonlandırılır. Bundan sonraki iki aşama doğrulama ve test aşamalarıdır.

Doğrulama aşaması modelin kalibrasyonunun yapıldığı aşamadır. Esas itibariyle, doğrulama aşaması model eğitiminin bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Test aşamasında ise model daha önce görmediği veriler kullanılarak test edilmektedir. Test aşamasında, eğitim ve doğrulama aşamalarından farklı olarak tamamlanmış model test edilmektedir ve bundan dolayı bu aşamada modelde artık bir değişiklik yapılması söz konusu olmamaktadır.

Eğitim, doğrulama ve test aşamalarına ait hata değerleri değerlendirilerek modelin eğitiminin tamamlanıp tamamlanmayacağına karar verilir. YSA modelinin eğitimi tamamlandıktan sonra farklı veriler için kullanıma hazır hale gelmektedir. Böylece, model farklı bir veri seti kullanılarak problem çözümünde kullanılabilir.

LM algoritması ve SCG algoritması geri yayılım algoritmasının daha hızlı olan varyantlarıdır [14]. Gizli katman sayısı ve bu katmanlarda yer alan nöron sayıları kritik öneme sahip parametrelerdir. Öte yandan, geri yayılımlı modellerde katman sayısını belirlemek için genel bir kural bulunmamaktadır. Bu bakımdan deneme yanılma yöntemi kullanılabilmektedir [8].

Elektrik enerjisi talebini etkileyen faktörleri temsil eden bağımsız değişkenlerin seçimi bir tahmin modelinin kurulmasında temel bir işlem olma özelliğine sahiptir. Elektrik enerjisi talebi tahmininde, bir yıllık süreyi aşan zaman periyodu uzun dönem olarak

sınıflandırılmakta olup, ekonomik faktörler gibi çeşitli faktörlerin uzun dönemli elektrik enerjisi talep tahminini etkilediği öne sürülmektedir [1].

Normalizasyon, tasarlanan bir YSA modelinin daha verimli çalışabilmesi için uygulanan bir veri ön işleme yöntemidir. Bu işlem sayesinde model öğrenme işlemini daha hızlı olacak bir biçimde gerçekleştirebilir.

Normalizasyon sonucunda, girdi değerleri standart sınırlar aralığında yer alacak şekilde düzenlenmiş olur. YSA modelinin eğitimi tamamlandıktan sonra, farklı girdi verileriyle sistem çalıştırıldığında çıktı değerleri de normalizasyonun uygulandığı aralıkta yer alacaktır.

Çıktı değerleri için tersine normalizasyon işlemi gerçekleştirilerek gerçek değerler elde edilir. YSA modeli tasarımında yaygın olarak kullanılan bir veri normalizasyon yaklaşımı Eş. 3.3'te ifade edilen Min-Maks tekniğidir.

$$x_{yeni} = \frac{x - x_{min}}{x_{maks} - x_{min}} \tag{3.3}$$

YSA eğitiminde, veri setindeki verilerin eğitim, doğrulama ve test işlemleri için hangi oranlarda bu kategorilere paylaştırılacağına dair genel bir kural bulunmamaktadır. Bununla beraber, genel bir yaklaşım olarak verinin büyük bir bölümü eğitim işlemi için ayrılmakta, kalan bölüm ise doğrulama ve test işlemleri için eşit oranlarda olacak şekilde kullanılmaktadır.

3.2. Yuvarlanma Mekanizmalı Gri Tahmin Yöntemi

1982 yılında Ju-Long gri sistem teorisini geliştirmiştir [42]. Gri sistem teorisi disiplinler arası bir teori olup esas olarak belirsiz sistemleri incelemektedir. Belirsiz sistemler iki temel özelliğe sahiptir. Belirsiz sistemleri tanımlayan birinci temel özellik bu sistemlere ait mevcut bilginin eksik olması, ikinci temel özellik ise mevcut bilginin yetersiz olmasıdır.

Gri sistem teorisi, sistemleri hâlihazırda mevcut olan bilgi düzeylerine göre üç farklı kategoriye ayırmaktadır. Bunlardan birincisi beyaz sistemlerdir. Beyaz sistemler

hakkındaki tüm bilgilerin mevcut olduğu sistemlerdir.

İkinci gruptaki sistemler gri sistemlerdir. Gri sistemler hakkında kimi bilgiler mevcutken kimi bilgiler mevcut değildir. Bir başka deyişle, bu sistemler hakkında kısmi bilgi bulunan sistemleri tarif etmektedir.

Üçüncü tip sistemler ise hakkında hiçbir bilgi bulunmayan sistemlerdir. Bu sistemler siyah sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler kimi zaman kara kutu olarak da adlandırılmaktadır.

Gri sistem teorisinin diğer yöntemlere göre avantajı az miktarda veri kullanılarak yüksek kesinlik derecesine sahip olan sonuçlar elde edilebilmesidir. Asıl olarak, birçok sistem belirsizliklere sahiptir ve bu sistemler hakkında kısmi bilgi bulunur. Bu nedenle gri sistem teorisi; enerji, ekonomi, finans, sosyal bilimler, ekoloji, medikal, sanayi ve meteoroloji gibi birçok alanda uygulama olanağı bulmaktadır.

Gri sistem teorisi yaklaşımı ile yapılan analizde, sisteme ait veriler esas alınarak sistem davranışı incelenmekte ve sistemin matematiksel özellikleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Gri sistem teorisi, model geliştirme, gri üretim, tahmin gerçekleştirme, sistem kontrolü, ilişkisel analiz ve karar verme gibi bilimsel araştırma amaçları çerçevesinde kullanılabilmektedir.

Periyodik aralıklarla elde edilen gözlem değerlerinin kronolojik olarak sıralanmasıyla oluşturulan seriler, zaman serileri olarak tanımlanmaktadır. Buradaki periyotlar genel olarak saat, gün, ay veya yıl gibi süre aralıkları olmaktadır. Zaman serileri, tek değişkenli ya da çok değişkenli yapıya sahip olabilirler. Zaman serileri ayrıca doğrusal veya doğrusal olmayan özellikte olabilmektedir.

Zaman serileri, gözlemlenen verinin yapısına göre sürekli veri özelliğine sahip zaman serileri ve kesikli veri özelliğine sahip zaman serileri olmak üzere iki gruba ayrılır. Sürekli serilerde veri, gözlemin yapıldığı süre boyunca kesintisiz olarak elde edilir. Kesikli serilerde ise ölçüm genel olarak eşit süre aralıkları ile belirlenmiş noktalarda gerçekleştirilmektedir. Ekonomik zaman serileri ve finansal zaman serileri genel olarak kesikli zaman serileri grubunda yer almaktadır.

Zaman serileri analizi çeşitli amaçlarla gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi serinin tanımlanmasıdır. Serinin zaman grafiği çizdirilerek seriye ait mevsimsel dalgalanmalar ve trend gibi özellikler araştırılır.

Bunlardan bir diğeri serinin modellenmesidir. Seriye ait değişkenin zaman içindeki almış olduğu değerlerin değişiminin incelenmesi, serinin deterministik ve stokastik özelliklerinin belirlenmesi gibi işlemler sonucunda seriyi temsil edecek bir model geliştirilir.

Bu amaçlardan başka bir tanesi ise tahmin yapılması işlemidir. Tahmin işleminde, serinin geçmişte sahip olduğu değerleri belirleyen özelliklerin gelecekte de aynı şekilde mevcut olacağı varsayılır. Tahmin işlemi için uygun bir tahmin yöntemi seçilir. Daha sonrasında, zaman serisine ait geçmişteki veriler kullanılarak gelecekteki seri değerleri tahmin edilir.

Bu amaçlardan diğer bir tanesi kontrol işlemidir. Sanayi alanında ürün kalite kontrolü veya ekonomi alanında belirli bir zaman aralığında gerçekleştirilen satış miktarları gibi proseslerin kontrol edilmesi amacıyla bu proseslere ait zaman serileri analiz edilebilir. Yapılan analiz sonucunda, zaman serisini temsil edebilecek stokastik bir model geliştirilerek proseslerin gelecekteki durumu tahmin edilir ve buna göre iş planlaması yapılır.

Zaman serilerindeki verilerin özellikleri tahmin işleminin performansını da etkilemektedir. İstatistik yöntemler ve yapay zekâ yöntemleri, zaman serileri ile tahmin işleminde kullanım alanına sahip olan yaklaşımlardır.

Tahmin işlemi amacıyla kullanılacak zaman serisine ait verilerin stokastik olma, düzensiz olma, gürültülü olma, doğrusal olmama ve durağan olmama gibi çeşitli özelliklere sahip olması durumunda istatistik yöntemler ve yapay zekâ yöntemleri yeterli düzeyde tahmin performansı sağlayamayabilir. Gri sistem teorisinin kullanım alanlarından önemli bir tanesi zaman serisi bazlı tahmin işlemi olup gri sistem yaklaşımı, belirtilen özelliklere sahip olan veriler kullanılarak yapılacak tahmin işlemlerinde yüksek performans göstermesinden dolayı tercih edilmektedir.

Gri sistem yönteminin önemli bir avantajı, bu yaklaşım kullanılarak en az dört adet veriyle tahmin işlemi gerçekleştirilebilmesidir. Bir başka deyişle, gri sistem yaklaşımı kullanılarak

zaman serisi bazlı tahmin yapılabilmesi için çok fazla sayıda veriye gereksinim duyulmamaktadır.

Gri sistem teorisi kapsamında çok çeşitli tahmin modelleri geliştirilmiş olmakla birlikte, GM(1,1) modeli, tahmin işlemi için tercih edilen en temel model olmaktadır. GM(1,1) ifadesinde yer alan parantez içindeki ilk değer diferensiyel denklemin derecesini, ikinci değer ise değişken adedini göstermektedir.

GM(1,1) yaklaşımında, orijinal veri setinin doğrudan kendisi değil, dönüştürülmüş veri seti kullanılmaktadır. Bu dönüşüm işlemi için kümülatif üreten operatör kullanılır ve böylece seri monoton olarak artan üstel bir seriye dönüştürülür. Bu işlemle birlikte, seriye ait veride rastgelelik bakımından düzgünleştirme gerçekleştirilmekte olup bu şekilde sistematik düzende artış sağlanmaktadır. Bu dönüşüm neticesinde birinci dereceden gri diferensiyel eşitlik oluşturulabilmektedir.

Gri sistem teorisinde, stokastik süreçlerde yer alan değişkenler gri sayılar olarak değerlendirilmektedir. Gri sistem teorisi veriye ait istatistiksel dağılım gibi özellikler ve istatistik kuralları incelememekle birlikte düzensiz veriyi düzenli bir biçime getirmektedir.

Gri diferensiyel eşitliğin sistemin dinamik davranışını en iyi düzeyde temsil edebilme niteliğini haiz olması amaçlanır. Bu nedenle, en uygun parametre değerlerinin araştırılması önem arz etmektedir. İşlem adımlarının sonuncusunda, tersine kümülatif üreten operatör kullanılarak seriye ait gelecekteki değerler elde edilmektedir.

Yöntemin avantajlarından bir diğeri ise ekonomi alanındaki zaman serisi tahmin işlemlerinde doğrusal olmayan ve düzensiz olan verilerle kullanılabilmesidir. Gri tahmin gri sistem teorisinin zaman serileri konusunda, özellikle yetersiz bilgi karakteristiğine sahip olan sistemler ve aşağıda prosedürü özetlenmiş olan GM(1,1) [43, 44] tek değişkenli diferensiyel modelini dikkate alan bir uygulama alanıdır.

Adım 1. Zaman dizisi verisi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad n \geq 4 \tag{3.4}$$

Kümülatif üreten operatör vasıtasıyla monoton olarak artan $x^{(1)}$ elde edilir.

$$x^{(1)} = \left(x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\right), \quad n \geq 4 \tag{3.5}$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{k} x^{(0)}(i), \quad k = 1,2,3, \dots, n \tag{3.6}$$

Adım 2. $z^{(1)}$ dizisini elde etmek amacıyla $x^{(1)}$'e ortalama operatörü uygulanır.

$$z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)) \tag{3.7}$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1), \quad k = 2,3, \dots, n \tag{3.8}$$

Adım 3. Aşağıda verilen diferensiyel denklem kullanılarak GM(1,1) elde edilir.

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \tag{3.9}$$

Adım 4. Eş. 3.9 ile verilen eşitliğe ait $[a, b]^T$ parametre dizisi aşağıda verilen en küçük kareler yöntemiyle bulunur.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = [B^T B]^{-1} B^T Y \tag{3.10}$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Adım 5. Eş. 3.14 ile verilen gri tahmin eşitliğini elde etmek amacıyla, elde edilen a ve b parametreleri kullanılarak eşitlik Eş. 3.13 çözülür.

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \tag{3.13}$$

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(1)}(0) - \frac{b}{a}\right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \tag{3.14}$$

Tahmin edilen değerler tersine kümülatif üreten operatör kullanılarak elde edilir.

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k+1), \quad k = 2,3,\dots,n \tag{3.15}$$

GPRM, gri tahmin yönteminin geliştirilmiş bir versiyonudur. GPRM ile ilgili prosedür aşağıda gösterildiği gibi tanımlanmaktadır [18, 19].

Yuvarlanma mekanizması, göreceli olarak en yakın geçmişteki verileri dikkate alarak daha isabetli bir tahmin sağlamaktadır. GM(1,1) ile tahmin işleminde tüm zaman dizisi verisi kullanılmaktadır. GPRM ile tahmin işleminde ise $x^{(0)}(k+1)$'in tahmin edilmesi amacıyla, $k < n$ olduğu durumda; GM(1,1), $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(k))$'e uygulanır.

Tahmin edilen en yeni veri olan $x^{(0)}(k+1)$ veri seti sonuna eklenerek ve en eski olan $x^{(0)}(1)$ veri setinden çıkarılarak prosedür tekrar edilir. Daha sonra $x^{(0)} = (x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(k+1))$ kullanılarak $x^{(0)}(k+2)$ tahmin edilir.

Verilen $k = l, l+1, \dots, n-1$ için, $(k+1)$ zaman noktası için ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$er(k+1) = \left|\frac{x^{(0)}(k+1) - \hat{x}^{(0)}(k+1)}{x^{(0)}(k+1)}\right| \times \%100 \tag{3.16}$$

Burada $k+1 \leq n$ olmaktadır.
Ortalama yuvarlanma hatası ise aşağıda gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$er = \frac{1}{n-l}\sum_{k=l}^{n-1} er(k+1) \times \%\,100 \tag{3.17}$$

3.3. TOPSIS Yöntemi

ÇKKV, karmaşık karar verme işlemlerini inceleyen, yöneylem araştırılmaları alanına ait bir alt disiplindir. ÇKKV, çok boyutlu bir probleme ait boyutların hepsinin aynı anda dikkate alınacak şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayan sistematik bir yaklaşımdır.

ÇKKV, probleme ait çözümün süreklilik durumuna göre değerlendirilmesine bağlı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi, çok nitelikli karar verme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda çözüm ayrık yapıdadır ve önceden tanımlamış alternatifler arasından bir seçim yapılmaktadır.

Bunlardan ikincisi, çok amaçlı karar verme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda ise çözüm ayrık yapıda değildir. Dolayısıyla, karar uzayı sürekli yapıya sahiptir ve sonsuz sayıda alternatif mevcuttur. Öte yandan, ÇKKV yaklaşımında en uygun çözüm elde edilmekle beraber, ideal çözüme ulaşmak mümkün olmayabilmektedir.

ÇKKV, birden fazla ve çoğunlukla birbirleriyle çelişen kimi kriterlerin bulunduğu bir karar verme probleminde, çeşitli alternatifler arasından en uygun seçeneğin belirlenmesinde kullanılan bir problem çözme yaklaşımıdır.

Problem çözümünde amaç en uygun alternatifin seçiminin yapılmasının yanı sıra sıralama ve sınıflandırma işlemi de olabilir. Sıralama işleminde, puanlama veya başka bir sıralama yöntemi kullanılarak ilk tercihten son tercihe doğru alternatifler sıralanır. Sınıflandırma işleminde ise seçenekler daha önceden belirlenmiş olan kategorilere ayrılırlar.

Geliştirilmiş çok sayıda ÇKKV tekniği bulunmakla birlikte problem çözümünde gerçekleştirilen işlemler genel olarak benzer olmaktadır. Bu işlemler öncelikle problemin tanımlanması ile başlamaktadır.

Problemin tanımlanmasından sonra amaç belirlenir. Amaç gerçekleştirilen karar verme

işlemi neticesinde nihai olarak ulaşılması beklenen sonuçtur. Hedefler ise bu amaca ulaşmak amacıyla gerçekleştirilen çeşitli işlemler olarak tanımlanabilir.

Hedefler, ölçülebilir nitelikte olup değerlendirme dâhilindeki tüm hedeflere ulaşılması neticesinde değerlendirme belirlenmiş olan amaca ulaşmış olmaktadır. ÇKKV yaklaşımında, hedeflerin belirlenebilmesi için öncelikle alternatiflerin ve kriterlerin seçilerek değerlendirme çerçevesinin oluşturulması gerekmektedir.

Problem çözümüne ait sonraki aşamada alternatifler ve kriterler belirlenir. Kriterler için veri toplanarak kriterlerin her bir alternatife karşılık gelen sayısal değerleri belirlenmiş olur. Kriterlerin önem dereceleri belirlenerek her bir kritere önem derecesiyle orantılı olacak şekilde sayısal bir ağırlık değeri atanır.

Bir sonraki aşama modelin oluşturulması aşamasıdır. Problemi temsil eden model, alternatifleri ve ağırlıklandırılmış kriter değerlerini içeren bir matrisle oluşturulabilir. Daha sonra, uygun bir ÇKKV yöntemi seçilerek alternatifler, kriterlere göre değerlendirilir.

ÇKKV ile gerçekleştirilen değerlendirmede, alternatifler için kriter bazında hedef amaçla uyumlu olarak tercihe göre maksimum değer olabileceği gibi minimum değer de olabilir. Öte yandan, problemin ideal bir çözüme sahip olması durumu kesinlik taşımadığından karar verme işlemi genellikle uzlaşık bir çözümün belirlenmesiyle tamamlanır.

ÇKKV kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, alternatiflerin sıralanması işlemi gerçekleştirilir. Buna göre ilk sırada yer alan alternatif en uygun alternatif olarak belirlenmiş olur.

Geliştirilen bir ÇKKV modeli için belirleyici faktörler olan alternatifler, kriterler ve ağırlık değerlerinin yanı sıra diğer bir önemli faktör ise karar alıcı olmaktadır. Karar alıcı mekanizma bir karar alıcıdan veya bir gruptan oluşabilir. Karar alıcıyı önemli kılan, problemin amacının ve hedeflerinin belirlenmesinde karar alıcıya ait tercihlerin ve önceliklerin dikkate alınmasıdır.

ÇKKV yaklaşımının uygulanmasında kullanılan her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Çözüm yöntemi problemin tipi itibariyle seçim, karar,

sınıflandırma veya sıralama kategorilerinden hangisinde yer aldığı belirlenerek ilgili kategoriye uygun olacak biçimde seçilmektedir. Buna ilaveten, problemin konusu itibariyle enerji, çevre, pazarlama, ekonomi, finans veya ulaştırma gibi araştırma alanlarından hangisi ile ilgili olduğu belirlenerek seçilmesi planlanan yöntemin belirlenen araştırma alanındaki performansı da dikkate alınır.

TOPSIS çok nitelikli karar verme yöntemlerinden bir tanesidir. Yöntem, en uygun çözümün belirlenmesinde geometrik mesafe yaklaşımını esas almaktadır. Bu nedenle bu yöntem geometrik bir sistem olarak da değerlendirilmektedir. TOPSIS, sıralama problemlerinin çözümünde kullanılan bir tekniktir.

TOPSIS, değişik alternatifleri değerlendirmede altı adet ardışık adımdan oluşan bir prosedüre sahiptir ve tekniğin konseptine göre, uygulanan prosedürün sonunda negatif-ideal çözümden en uzak olan fakat aynı zamanda ideal çözüme en yakın olan seçenek seçilmektedir [45].

TOPSIS yöntemi kullanılarak yapılan değerlendirmede, kriterler C_j $(j = 1,2, \dots, n)$ ve alternatifler A_i $(i = 1,2, \dots, m)$ D ile gösterilen bir karar matrisiyle temsil edilir.

$$D = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \tag{3.18}$$

Adım 1. Normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur.

Normalizasyon işlemi farklı kriterlere boyutsuz olma özelliği kazandırarak bu kriterlerin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Normalize edilmiş karar matrisi R ile gösterilir ve R matrisine ait r_{ij} girdisinin hesaplanması aşağıda verilen şekilde gerçekleştirilir.

$$r_{ij} = x_{ij} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2} \tag{3.19}$$

Adım 2. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi aşağıdaki şekilde oluşturulur.

Burada, $w = (w_1, w_2, \dots, w_j, w_m)$, $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$ olacak şekilde bir ağırlık seti oluşturulur. Daha sonra, aşağıda görüldüğü üzere V ile gösterilen ağırlıklandırılmış normalize karar matrisini elde etmek için, bu sette yer alan her bir w_j ağırlık değeri, R matrisinde bulunan, kendisine karşılık gelen kolonda yer alan değerlerle çarpılır.

$$v_{ij} = r_{ij}(.)w_j \tag{3.20}$$

Adım 3. Negatif ideal çözüm ve ideal çözüm belirlenir.

Maliyet-fayda yaklaşımı temelinde, her bir kriter için en uygun olmayan değerler belirlenerek negatif çözüm seti olan $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\}$ ve en uygun değerler belirlenerek ideal çözüm seti olan $A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\}$ oluşturulur.

Adım 4. Ayrım ölçüleri hesaplanır.

Öklid mesafelerinin hesaplanması yaklaşımıyla ideal çözüm için S_{i*} ile gösterilen ayrım ölçüsü değeri ve negatif ideal çözüm için S_{i-} ile gösterilen ayrım ölçüsü değeri bulunur.

$$S_{i*} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^*\right)^2} \qquad i = 1,2, \dots, m \tag{3.21}$$

$$S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \qquad i = 1,2, \dots, m \tag{3.22}$$

Adım 5. Yakınlık katsayısı hesaplanır.

Her bir alternatif için aşağıda verildiği şekilde yakınlık katsayısı hesaplanır.

$$C_{i*} = S_{i-}/(S_{i*} + S_{i-}) \qquad i = 1,2, \dots, m \tag{3.23}$$

Adım 6. Sıralama işlemi gerçekleştirilir.

Alternatifler, C_{i*} için en yüksek değerden en düşük değere doğru sıralanır.

4. UYGULAMA

4.1. Tahmin Modeli

Bu alt bölümde, oluşturulan tahmin modelinde yer alan bağımsız değişkenler, bu bağımsız değişkenlere ait veri seti ve YSA-GPRM kombine yöntemi yaklaşımıyla tahmin işleminin gerçekleştirilmesi konularına yer verilmiştir.

4.1.1. Tahmin modelinde kullanılan veri seti

Bu tez çalışmasında, elektrik enerjisi talebiyle temsil edilen bağımlı değişkenin tahmin işlemi için model kurulmasında, sosyal bir faktör olan nüfus ve ekonomik faktörler olan GSYH, ithalat, ihracat ve SÜE bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. YSA modeli 1970-2017 yıllarını kapsayan bir bağımsız değişken veri seti kullanılarak geliştirilmiştir.

Nüfus bağımsız değişkeni

Nüfus, enerji tüketimini [46] ve benzer şekilde elektrik enerjisi tüketimini etkilemektedir, dolayısıyla nüfus artışı elektrik enerjisi tüketiminde artışa yol açmaktadır [2].

Dünyada teknolojik buluşların ve inovasyonların katkılarıyla başlıca sağlık, tarım ve gıda alanlarında meydana gelen gelişmeler neticesinde geçtiğimiz yüzyıl boyunca nüfusta hızlı bir artış yaşanmıştır.

İnsan sağlığı alanında kaydedilen bilimsel ilerlemelerden özellikle yeni ilaçların geliştirilmesi ve halk sağlığı konusunda gerçekleştirilen ilerlemeler nüfusun artmasına katkıda bulunmuştur.

Antibiyotiklerin ve aşıların geliştirilmesiyle yüksek mortalite oranları ile sonuçlanan çeşitli bulaşıcı hastalıkların etkin olmalarının önüne geçilmiştir. Halk sağlığı konusu çerçevesinde önem arz eden temiz içme suyu altyapıları ve sanitasyon altyapıları geliştirilmiştir. Bu altyapılar yaygınlaştırılarak bulaşıcı hastalıkların yayılması azaltılmıştır. Bu gelişmeler ortalama yaşam süresinde yükselme sağlamış olup, mortalite oranlarında azalma olmuştur, dolayısıyla nüfus artışı gerçekleşmiştir.

Dünya üzerinde, sanayileşme başlamadan önce enerji ihtiyacının karşılanmasında biyokütle enerjisi, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi ve yük hayvanları önemli bir yere sahipti. Ancak on dokuzuncu yüzyılda sanayileşmenin başlamasıyla birlikte yoğun enerji içeriğine sahip olan fosil yakıtlar belirtilen geleneksel enerji türlerinin yerini almaya başlamıştır. Tarih içinde fosil yakıtlardan sırasıyla önce kömür, sonra petrol ve daha sonra ise gaz kullanılmaya başlanmıştır.

Sanayileşme birçok sektörde olduğu gibi tarım sektöründe de gerçekleşmiştir. Sonuç olarak zaman içinde, konvansiyonel tarıma kıyasla daha verimli olan endüstriyel tarım büyük oranda konvansiyonel tarımın yerini almıştır.

Tarımda pestisit, gübre ve makine kullanımının başlamasıyla birlikte, verim artışına bağlı olarak birim alandan elde edilen tarımsal ürün miktarları yüksek seviyede artış göstermiş olup böylece gıdaya erişim kolaylaşmıştır. Söz konusu tarımsal ürün artışının gerçekleştirilmesinde enerji kullanımı ve bu çerçevede özellikle fosil yakıtlar önemli bir rol oynamıştır.

Gıdanın son tüketiciye ulaşmasına kadar olan aşamalar enerji kullanımını içermekte olup bunlar tarımsal üretim için gerekli olan girdilerin üretilmesi işlemleri, tarımsal üretim işlemleri ve nakliye gibi üretim sonrası işlemleridir.

Tarım sektöründe enerji doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Doğrudan enerji kullanımı kategorisi tarımsal üretim aşamasında tarımsal makine ve ekipmanlarda, otomobil, kamyonet ve kamyon gibi taşıtlarda enerji kullanılmasını içermektedir. Tarımsal işlemler olan toprağın işlenmesi, ekim işlemi, sulama işlemi, kültivasyon işlemi, pestisit uygulanması, hasat işlemleri ve ayrıca yükleme-boşaltma ve depolama, işleme ve nakliye gibi hasat sonrasında yer alan işlemler de bu kategoride yer almaktadır.

Pestisit, gübre ve makine üretimi için gerekli olan enerji ise esas olarak fosil yakıtlardan elde edilmektedir ve belirtilen işlemlerde kullanılan enerji dolaylı enerji kullanımı kategorisinde yer almaktadır.

Tarımsal alandaki sanayileşme tarım sektörüne ait iş gücü talebinde azalma olmasına

neden olmuştur. Bu durum ise tarım yapılan kırsal kesimlerden şehirlere olan insan göçünü arttırmıştır.

Günümüzde dünyada şehirlere ait nüfus miktarı kırsal kesime göre daha yüksektir. Yakın gelecekte şehirlerde nüfusun daha da artması beklenirken kırsal kesimde daha da azalması beklenmektedir. Temel olarak, günümüzde nüfusun şehirlerde yoğunlaşması ve dolayısıyla şehirleşmenin artması enerji tüketiminde artışa neden olmaktadır.

Elektrik enerjisi şehir hayatında evsel kullanım ve sanayide kullanım gibi çeşitli enerji tüketimi alanları itibariyle önemli bir yere sahiptir. Öte yandan, hayat standardında meydana gelen yükselme ve bu standardın belirli bir seviyede sürdürülmesi bakımından elektrik enerjisi önemli bir rol oynamaktadır.

Hayat standardının yükselmesi elektrikle çalışan çeşitli teknolojik cihazların kullanımının artmasına ve dolayısıyla bu durum da daha çok enerji tüketilmesine neden olmaktadır.

Nüfus ve enerji tüketimi arasındaki ilişki, belirli bir ülkenin gelişmişlik seviyesi ile ilgilidir. Genel olarak gelişmiş ülkelerde kişi başı enerji tüketimi diğer ülkelere göre fazla olmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde ise hayat standardı yükselmektedir, bu ise bu ülkelerde enerji tüketiminin artması sonucunu doğurmaktadır.

Elektrik enerjisine ulaşım da diğer bir önemli konudur. Kimi ülkelerde, artan nüfusa rağmen elektrik şebekesi altyapısının yetersiz gelişim göstermesi enerjiye olan ulaşımı kısıtlayabilir. Öte yandan, elektrik şebekesi altyapısının yeterli olmasına rağmen gelir seviyesinin yetersiz olması elektrik enerjisinin en düşük seviyede kullanılmasına neden olabilir. Bunlar gibi durumlar belirli koşullar altında elektrik enerjisi tüketimi ve nüfus artışı arasında daha karmaşık bir ilişkinin mevcut olabileceğine işaret etmektedir.

Nüfus artışının devam etmesi, aynı zamanda üretim ve tüketim artışının devam etmesi anlamına geldiğinden bu durum dünya üzerindeki kaynakların daha yoğun bir şekilde kullanılması ve böylece hızlı bir biçimde azalması sonucunu doğurmaktadır.

Bir yerleşim yerinin nüfus taşıma kapasitesi su, besin maddeleri ve alan gibi faktörlere bağlı olarak o yerde yaşayabilecek en yüksek sayıda popülasyonu tanımlamaktadır. Bu

çerçevede, dünya üzerinde nüfus artışı belirtilen kaynakların mevcudiyeti ile ilişkili olması nedeniyle ancak belirli bir sınıra kadar gerçekleşebilir.

Bu çalışmada nüfus verisi olarak Türkiye İstatistik Kurumu verileri kullanılmıştır [47]. İlgili veri setinde, genel nüfus sayımı sonuçlarına göre 1970, 1975, 1980, 1985, 1990 ve 2000 yıllarına ait değerler mevcuttur. Buna ilaveten, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi dâhilinde 2007-2018 yıllarına ait veriler mevcuttur. Nüfus verisi olmayan yıllar için nüfus değerleri doğal artış formülü Eş. 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır [48].

$$P_n = P_o \times e^{rn} \tag{4.1}$$

Gayrisafi yurtiçi hasıla bağımsız değişkeni

Ekonomik kalkınma; bir ülkeye ait insani gelişme düzeyi, okuryazarlık düzeyi, eğitim standartları, sağlık hizmetleri, beklenen yaşam süresi, kişi başına düşen reel GSYH, istihdam olanakları, çevre standartları, yaşam standardı, konut kalitesi ve ürün kalitesi gibi çeşitli faktörleri içeren kalitatif ve kantitatif özelliğe sahip çok boyutlu bir kavramdır.

Ekonomik kalkınma, ekonomik büyümeyi de içermekle birlikte esas olarak sosyoekonomik faktörleri kapsayan ve bu açıdan ekonomik büyümeye göre daha geniş kapsama sahip olan bir kavram olmaktadır.

Ekonomik kalkınma kavramı bir ülkedeki yaşam kalitesi düzeyinin ve hayat standardı düzeyinin yükselmesini ifade etmektedir. Ekonomik kalkınma uzun dönemi kapsayan bir olgudur, kademeli olarak gerçekleşir ve sürekliliğe sahiptir. Ekonomik kalkınma, belirlenen kalkınma stratejileri doğrultusunda gerçekleştirilir. Bu çerçevede, ekonomik kalkınmanın planlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kavram, esas olarak gelişmekte olan ülkeleri ilgilendiren bir kavram olmaktadır.

Ekonomik büyüme ise daha çok, gelişmiş olan ülkeler ve gelişmekte olan ülkeler için geçerli olan bir kavramdır. Ekonomik büyüme kısa dönemi kapsayan, kantitatif ve bir boyutlu bir kavramdır. Ekonomik büyüme gerçekleştiğinde işletmelerin kârlılığı yükselmektedir. Bu durum ise yeni yatırım olanaklarının artması ve dolayısıyla istihdamda artış olması anlamına gelmektedir. Öte yandan, ekonomik büyüme kaynakların

tükenmesini dikkate almamaktadır.

GSYH, belirli bir dönemi kapsayacak şekilde, ülke sınırları içinde gerçekleştirilen tüm nihai üretimin toplam piyasa değerini ifade eder. GSYH kapsayıcılığı bakımından önde gelen bir ekonomik göstergedir, dolayısıyla ekonomik büyüme kavramıyla da özdeşleştirilmektedir.

GSYH ekonomik büyümenin ölçüsünü yansıtmasına rağmen, yine ekonomik büyüme ile ilgili kavramlar olan gelir eşitsizliği, ürün kalitesi, iklim değişikliği, çevresel etkiler ve insan sağlığı üzerindeki etkiler hakkında bilgi içermemektedir.

GSYH bir ülkenin ekonomisinin belirli bir zamandaki durumunu yansıtan bir göstergedir. GSYH en temel makroekonomik gösterge olup ilgili ekonominin göreceli büyüklüğü ve sağlığı hakkında fikir vermektedir.

GSYH merkez bankaları, ekonomistler, yatırımcılar, karar vericiler, işletme sahipleri tarafından ekonominin değerlendirilmesi ve nihayetinde karar verme işlemi amacıyla kullanılan bir göstergedir.

GSYH ülkeler tarafından periyodik bir biçimde düzenli olarak hesaplanmaktadır. GSYH üç farklı yaklaşım kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bunlar üretim yaklaşımı, harcama yaklaşımı ve gelir yaklaşımıdır. Netice itibariyle, her üç yaklaşımla gerçekleştirilen hesaplama sonucunda da aynı GSYH değeri elde edilmektedir.

Genel olarak GSYH dünyadaki hemen her ülke tarafından kullanılan bir gösterge olma özelliğine sahiptir. GSYH farklı ülkelerin ekonomilerinin karşılaştırılmasında da kullanılmaktadır.

GSYH ülkeler bakımından karşılaştırmanın mümkün olabilmesi amacıyla belirli bir para birimi cinsinden hazırlanmaktadır (ABD Doları). Burada para birimi çevrimi için tercih edilen çeşitli yöntemler mevcut olup bu yöntemlerden bir tanesi satın alma gücü paritesi yaklaşımıdır. Satın alma gücü paritesi yaklaşımıyla gerçekleştirilen çevrim işlemiyle belirli bir para biriminin ülkelere göre farklılık gösterebilen alım gücü dikkate alınmış olur.

GSYH değeri yüksek olan ülkeler genel itibariyle yüksek nüfusa sahip olup sanayileşmeyi belirli bir ölçüde gerçekleştirmiş olan ekonomik kalkınma seviyesi yüksek ülkeler olmaktadır. Bununla birlikte, GSYH değerleri değerlendirilirken ilgili ülkelerin nüfus miktarları da dikkate alınmalıdır. GSYH değeri yüksek olmasına rağmen, bir ülkenin nüfus miktarı yüksekse kişi başı GSYH, aynı GSYH değerine sahip olmakla birlikte nüfusu daha az olan bir ülkeye göre daha düşük olacaktır.

GSYH değerinin yüksek olması yüksek seviyede harcamaların gerçekleştirilebileceğini ve istihdam olanaklarının fazla olduğunu gösterir. GSYH genel itibariyle, toplumdaki yaşam standardı düzeyinin de değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu değerlendirme işlemi için kişi başına düşen GSYH göstergesi ya da düzeltme yapılmış değer olan kişi başına düşen reel GSYH göstergesi tercih edilmektedir.

GSYH değerinde oluşan yıllık değişimler ekonomik büyüme veya daralmanın bir göstergesidir. Geçmişteki GSYH değerleri analiz edilerek ekonominin gelecekteki durumu hakkında da öngörüde bulunmak mümkündür. Türkiye'deki ekonomik büyüme ve enerji tüketimi ilişkisi çoğunlukla GSYH dikkate alınarak araştırılmıştır.

Soytas ve Sari [49] 1950-1992 döneminde nedensellik yönünün enerji tüketimi-GSYH doğrultusunda olduğunu öne sürmüşlerdir.

Lise ve Van Montfort [50] 1970-2003 yıllarını kapsayan dönemde nedensellik ilişkisi yönünün GSYH'den enerji tüketimine doğru olduğunu öne sürmüşlerdir.

Altinay ve Karagol [51] 1950-2000 yılları süresince enerji tüketimi ve reel GSYH arasında bir nedensellik ilişkisi olmadığını bulmuştur.

Yalta [52] 1950-2006 dönemi için enerji tüketimi ve reel GSYH arasında bir nedensellik ilişkisi bulunmadığı sonucuna varmıştır.

Altinay ve Karagol [53] 1950-2000 yılları için nedensellik yönünün elektrik enerjisi tüketiminden reel GSYH'ye doğru olduğunu öne sürmüşlerdir.

Aslan'ın çalışması [54] 1968-2008 yılları arasında elektrik enerjisi tüketimi-reel GSYH

arasında iki yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Mevcut bilimsel çalışmalar gerek enerji tüketimi-GSYH arasında ve gerekse elektrik enerjisi tüketimi-GSYH arasında nedensellik ilişkisi bakımından bulguların çeşitliliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelde satın alma gücü paritesine göre kişi başı GSYH göstergesi yer almakta olup İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı (OECD) verileri [55] kullanılmıştır.

İthalat ve ihracat bağımsız değişkenleri

Uluslararası ticaret bir ülkede yerel olarak mevcut olmayan ürünlere erişimi mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, başka bir ülkede üretilen bir ürünün fiyatının daha uygun olması veya ürünün kalitesi gibi faktörler nedeniyle ürünün uluslararası ticaret yoluyla temin edilmesi seçeneği tercih edilebilmektedir.

Ülkeler, uluslararası ticaret için mevcut kaynaklarını en verimli şekilde kullanarak en uygun fiyatlı ürünü üretmeyi hedeflerler. Bu şekilde fiyat bakımından rekabetçilik artar ve son kullanıcılar için ürünleri daha ucuza satın alma imkânı oluşur.

Uluslararası ticaret açısından önemli diğer bir faktör olan yeterli seviyede ürün kalitesinin sağlanması amacıyla inovatif yaklaşımlar kullanılır ve yeni teknolojiler geliştirilir. Böylece, ülkeler için aynı zamanda pazarlarını genişletme imkânı sağlanmış olur.

Eğer bir ülke için bir ürünün üretimi için gerekli olan maliyetler, uluslararası pazardaki maliyetlerin üzerinde ise o ülke ilgili ürünü üretmek yerine uygun fiyatla bu ürünü üreten başka bir ülkeden temin etme yolunu tercih edebilir. Bu bakımdan öne çıkan iki kavram karşılaştırmalı üstünlük ve uzmanlaşmadır. Karşılaştırmalı üstünlük bir ülkenin belirli bir ürünü ticaret yaptığı diğer ülkelere göre daha düşük fırsat maliyeti ile imal etmesidir. Sonuç olarak, karşılaştırmalı üstünlük durumuna göre ürünün imalatında uzmanlaşma meydana gelmektedir.

Uluslararası ticaretin gerek ülkeler gerekse tüketiciler için birçok faydaları bulunmaktadır. Ülkeler fiyatı en uygun ürünleri üretmek amacıyla en verimli üretim yöntemlerini seçerler. Benzer şekilde, üretimde kullanılacak kaynaklar da en verimli şekilde kullanılır.

İhracat için üretim yapan firmalar uluslararası pazarlarda deneyim elde ederler. İş yeri çalışanları, ilgili ürünlerin üretimi için gerekli olan mesleki vasıfları kazanırlar. Buna ilaveten, bu firmaların pazar payının genişlemesi durumunda üretim kapasiteleri artar. Böylece, yerel sanayi desteklenmiş olmaktadır. Dış ticaret sonucunda teknoloji transferi olanağı sağlanır, döviz elde edilir ve fiyat dalgalanmasının önüne geçilerek fiyat istikrarı sağlanır.

Uluslararası ticaretle birlikte yeni sektörlerin gelişmesi ve ürün yelpazesinin genişlemesi sonucunda yeni istihdam olanakları sağlanır. Tüketiciler için çok çeşitli ürün alternatifleri olacağından farklı ürünleri değerlendirme ve bu ürünler arasından en uygun olanını seçme olanağı doğar.

Uluslararası ticaret sonuç itibariyle ekonomik kalkınma, ekonomik büyüme ve hayat standartlarında yükselme konularında rol oynayabilmektedir. Uluslararası ticaret ve enerji tüketimi de çeşitli yönlerden birbirleriyle ilişkili kavramlardır.

İhracatı gerçekleştirilen kimi ürünlerin imal edilebilmesi için enerji kullanımı gerekli olmaktadır. Bu ürünlerin nakliye işlemlerinde yine enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

İthalatı gerçekleştirilen elektrikli cihazlar gibi kimi ürünler enerji tüketmektedir. Ayrıca ithal edilen ürünler için de ülke içerisinde nakliye işlemine gereksinim duyulabilmekte olup bu durum ise beraberinde enerji ihtiyacını getirmektedir.

Ticaret, enerji tüketimi üzerinde kompozisyon, teknik ve ölçek etkileri bakımından etkili olabilir [56]. Huang ve diğerleri [46] 1980-2014 yılları için Çin'de net ihracatın enerji tüketimini etkilediğini öne sürmüşlerdir.

Dedeoğlu ve Kaya [57] 1980-2010 yıllarını kapsayacak şekilde 25 OECD ülkesinde enerji kullanımı-ithalat arasındaki nedensellik ilişkisini ve enerji kullanımı-ihracat arasındaki nedensellik ilişkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, her iki set arasında iki yönlü nedensellik ilişkisi bulmuşlardır.

Topcu ve Payne [56] 1990-2015 yılları için 34 OECD ülkesi için ticaret ve enerji tüketimi ilişkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar ticaret ve enerji tüketimi arasında doğrusal

olmayan ters-U ve doğrusal olarak yatay kesit bağımlılık ilişkisinin mevcut olduğunu bulmuşlardır. Bu tez çalışmasında ithalat ve ihracat için Türkiye İstatistik Kurumu [58] verileri kullanılmıştır.

Sanayi üretim endeksi bağımsız değişkeni

İş çevrimi bir ekonomide meydana gelen genişleme ve daralmaların oluşturduğu döngü olarak tanımlanmaktadır. Genişleme süresince üretim artar, bu artışa bağlı olarak istihdamda artış yaşanır, daha sonrasında gelirlerde artış yaşanır ve satış miktarları artar. Ekonomik büyüme belirli bir en yüksek seviyeye ulaştıktan sonra daralma başlar.

Ekonomik daralma sırasında üretimin azalması sonucunda istihdam azalır, gelirler düşer ve buna bağlı olarak da satış miktarları azalır. Ekonomide düzelmenin başlamasıyla birlikte bu çevrim olumlu yönde gelişir.

SÜE belirli bir zaman aralığındaki üretim miktarlarını ve üretimde oluşan dalgalanmaları göstermesi bakımından iş çevrimi analizi için kullanılan bir göstergedir. İş çevrimine ait faktörlerden bir tanesi olan üretimin durumundan iş çevriminde yer alan diğer faktörlerin de etkilenmesi nedeniyle SÜE önemli bir gösterge olmaktadır. Sonuç itibariyle, SÜE ekonomik aktivitenin durumunun değerlendirilmesinde kullanılabilen bir gösterge olmaktadır.

SÜE verileri sanayi üretimine ait spesifik alt sektörlere dair detay bilgiler içermektedir. SÜE imalat, madencilik, elektrik, gaz ve su gibi ekonomiye ait farklı sanayi sektörlerini kapsamaktadır. Tüm sektörler arasında imalat sektörüne ait üretim yüzdesi genel olarak en yüksek orana sahip olmaktadır. SÜE temel olarak kısa dönemi kapsayan bir göstergedir. Bu endeks yatırımcılar, ekonomistler ve iş yöneticileri tarafından kullanılmaktadır.

SÜE göstergesine ait diğer bir önemli özellik ise gösterge birimi olarak üretim hacimlerinin esas alınmasıdır. SÜE, belirli bir yıla ait endeks değeri 100 alınarak hesaplanır ve böylece yıllar bazında üretim hacmi değişikliği kıyaslanabilir. SÜE göstergesinin hesaplanmasında belirli iş yerlerinden edinilen üretim değerlerine ait veriler baz alınarak hazırlanan Aylık Sanayi Üretim Anketi kullanılmaktadır.

Sanayi sektörü, Türkiye'de yakın geçmişteki on yılı kapsayan bir periyotta elektrik tüketiminde en yüksek orana sahiptir [59], Çizelge 4.1.

Çizelge 4.1. 2008-2017 yılları için Türkiye'nin sektörlere göre net elektrik enerjisi tüketimi oranları [59]

Yıl	Toplam (GWh)	Mesken (%)	Ticaret (%)	Resmi Daire (%)	Sanayi (%)	Aydınlatma (%)	Diğer (%)
2008	161948	24,4	14,8	4,5	46,2	2,5	7,6
2009	156894	25,0	15,9	4,5	44,9	2,5	7,2
2010	172051	24,1	16,1	4,1	46,1	2,2	7,4
2011	186100	23,8	16,4	3,9	47,3	2,1	6,5
2012	194923	23,3	16,3	4,5	47,4	2,0	6,5
2013	198045	22,7	18,9	4,1	47,1	1,9	5,3
2014	207375	22,3	19,2	3,9	47,2	1,9	5,5
2015	217312	22,0	19,1	3,7	47,6	1,9	5,7
2016	231204	22,2	18,8	3,9	46,9	1,8	6,4
2017	249023	21,8	19,8	4,1	46,8	1,8	5,7

Soytas ve Sari'ya [60] göre elektrik, Türkiye'nin imalat sanayisi için elzem olan bir öğedir. Araştırmacılar, 1968-2002 döneminde elektrik tüketiminden imalat katma değerine doğru bir nedensellik bulmuşlardır.

Sun ve Anwar [61] Singapur için Ocak 1983-Şubat 2014 dönemi için elektrik enerjisi tüketiminden sanayi üretimine doğru bir nedensellik ilişkisinin bulunduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu tez çalışmasında, SÜE için imalat sektörüne ait, 2015 yılı baz yıl alınarak oluşturulmuş olan OECD [62] verileri kullanılmıştır.

4.1.2. YSA-GPRM kombine yöntemiyle talep tahmini

Bu tez çalışması kapsamında ÇKA yapısına sahip olan bir YSA mimarisi seçilmiştir. Seçilmiş olan ağ geri yayılımlı olup ağ mimarisi, bilgi akışı yönü bakımından ileri beslemeli özelliğe sahiptir. YSA mimarisi belirlendikten sonra en iyi performansı elde etmek amacıyla uygun bir topoloji araştırılmıştır. YSA modelinin tasarımında MATLAB programı kullanılmıştır.

Min-Maks normalizasyon tekniği kullanılarak girdi verisi [0-1] aralığında olacak şekilde normalize edilmiştir. Veri setleri rastgele paylaştırılmak üzere %70 oranında eğitim için, %15 oranında doğrulama için ve %15 oranında test için ayrılmıştır.

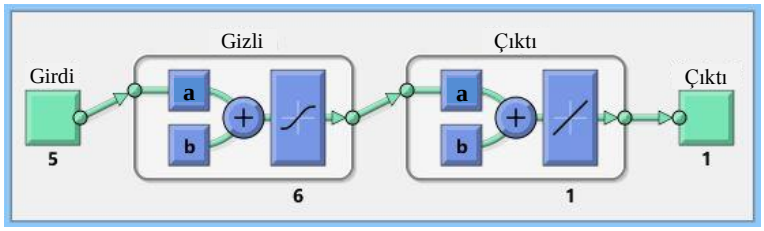
YSA eğitiminde LM, Bayes regülarizasyonu ve SCG algoritmaları denenmiştir. YSA yapısında beş adet girdi katmanı nöronu bulunmaktadır. Bağımlı değişken sayısı bir olup çıktı nöronu sayısı da bir adet olmaktadır. Bir, iki ve üç adet gizli katmana sahip YSA modelleri kurulmuştur. Bu gizli katmanlar için 2 ve 20 dâhil olmak üzere bu aralıktaki sayılarda nöronlar seçilerek farklı modeller denenmiştir. Bu çalışma kapsamında, aktivasyon fonksiyonları olarak hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu ve doğrusal fonksiyon kullanılarak denemeler yapılmıştır.

Özetle, bu çalışmada farklı sayılarda katmanlara ve nöronlara sahip olan ve ayrıca farklı eğitim algoritmalarına ve farklı aktivasyon fonksiyonlarına sahip olan çeşitli YSA modelleri geliştirilmiştir.

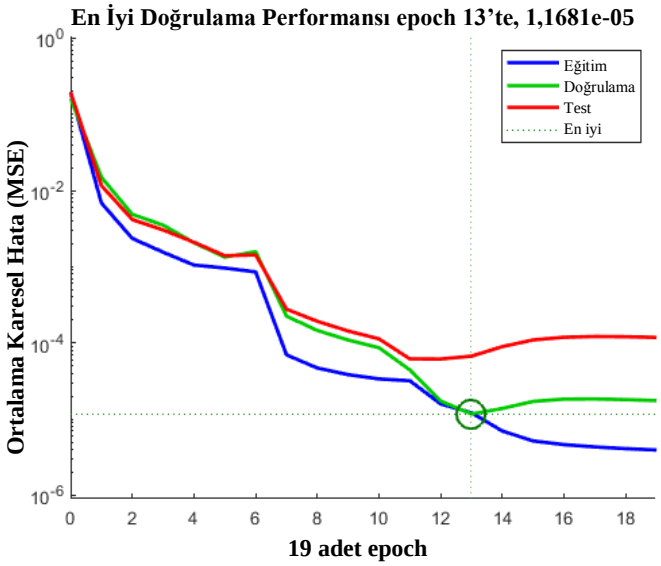
Geliştirilen modellerin tahmin performansları temel olarak iki farklı performans göstergesi kullanılarak analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu performans göstergeleri korelasyon katsayısı (R) ve ortalama karesel hata (MSE) olarak belirlenmiştir.

Algoritma performanslarının karşılaştırılması sonucunda LM algoritmasına ait performansın diğer algoritmalara kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür. Gizli katman için hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu ve çıktı katmanı için doğrusal fonksiyon seçildiği durumda en yüksek performans elde edilmiştir. Deneme yanılma işlemi sonuçlarına göre Şekil 4.1'de gösterilen bir adet gizli katmanı bulunan ve bu gizli katmanda 6 adet nörona sahip olan model seçilmiştir.

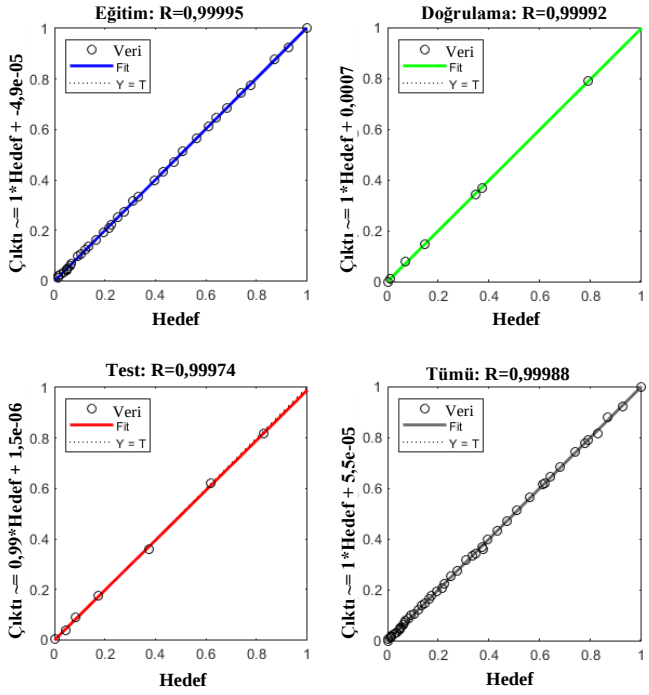
Seçilen model en yüksek performansa sahip olup bu performans değerine 13'üncü epoch itibariyle ulaşılmıştır, Şekil 4.2. Bu model aynı zamanda en yüksek R değerine sahip olan model olmaktadır, Şekil 4.3.



Şekil 4.1. YSA modeli mimarisine ait şematik



Şekil 4.2. YSA modeline ait performans grafiği



Şekil 4.3. YSA modeline ait regresyon grafiği

Çizelge 4.2'de seçilen modelin eğitim, doğrulama ve test aşamalarına ait MSE ve R değerleri verilmiştir. Sonuç olarak bu modelin çok düşük MSE değerlerine sahip olması ve buna ilaveten R değerlerinin 1 değerine yakın olması sebebiyle tahmin işlemi için uygun bir model olduğu bulunmuştur.

Çizelge 4.2. Seçilen YSA modeline ait MSE ve R değerleri

İşlem	MSE	R
Eğitim	$1{,}2123\times10^{-5}$	0,99995
Doğrulama	$1{,}1681\times10^{-5}$	0,99992
Test	$6{,}7173\times10^{-5}$	0,99974

Bu çalışmada, nüfus, GSYH, ithalat, ihracat ve SÜE bağımsız değişkenlerinin 2019-2030 yıllarına ait değerlerini, bu değişkenlerin 1970-2018 yıllarına ait değerlerini kullanarak bulmak için GPRM yöntemi kullanılmıştır.

İlk olarak, GPRM zaman serisi modelinde her bir bağımsız değişken için en uygun zaman noktası değerinin bulunabilmesi için deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Bunun için zaman noktası değeri 4 alınarak daha sonra bu değer yükseltilmiş ve her bir değer için MAPE performans göstergesinin aldığı değer incelenmiştir. Sonuç olarak her bir bağımsız değişken için MAPE değerinin en düşük olduğu değere karşılık gelen zaman noktası değeri bulunmuştur.

Çizelge 4.3'te en düşük MAPE değerlerine karşılık gelen zaman noktası değerleri yer almaktadır. İkinci olarak, bulunan zaman noktası değeri dikkate alınarak her bir bağımsız değişkenin gelecekteki değerleri tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.3. Her bir bağımsız değişkene ait en düşük MAPE değeri ve bu değere karşılık gelen zaman noktası

Bağımsız değişkenler	MAPE (%)	Zaman noktası
Nüfus	0,1585	4
GSYH	5,3512	4
İthalat	15,4458	10
İhracat	11,6037	8
SÜE	5,4004	13

2018 yılı için mevcut olan bağımsız değişken değerleri ve GPRM yöntemiyle tahmin işlemi gerçekleştirilen 2019-2030 yıllarını kapsayan değerler geliştirilmiş olan YSA modelinde yerine konulmuştur. Sonuç olarak bağımlı değişken olan elektrik enerjisi talebine ait 2018-2030 yıllarına ait değerler elde edilmiştir. Bu talep değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Önerilen YSA modeliyle yapılan tahmin işlemi sonucu Türkiye'nin 2030 yılı için elektrik

enerjisi talebi ≈ 384569 GWh olarak bulunmuştur.

Türkiye'de toplam elektrik enerjisi tüketiminin, elektrik enerjisi arzına oranına ait olan değer; 2005, 2010, 2015 ve 2016 yıllarına ait değerler kullanılarak hesaplanmış ve ≈ 0,8543 değeri bulunmuştur [63]. Sonuç olarak bu değer dikkate alındığında 2030 yılı için brüt elektrik enerjisi üretimi değeri ≈ 450157 GWh olmaktadır.

Çizelge 4.4. Bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkene ait tahmin edilen değerler

Yıl	Nüfus	GSYH (Kişi başına ABD doları)	İhracat (Bin ABD doları)	İthalat (Bin ABD doları)	SÜE (İmalat, 2015=100)	Elektrik enerjisi talebi (GWh)
2018	82003882	28454,63156	167920613,5	223047094,5	113,8667	246976,5227
2019	83089837	29705,7001	159528783,9	225079179,6	124,07793	294756,6377
2020	84272020	30326,72069	162773925,1	213651654,6	133,17336	322618,8445
2021	85415036	31408,08259	166559935,2	210609500	142,54037	348814,561
2022	86609424	32224,75568	173378760,7	207157508,1	150,36526	361652,651
2023	87795160	33260,8163	176957889	209029367	158,81464	372618,682
2024	89012561	34195,00806	177796571,2	212386939,1	168,66851	379341,5827
2025	90235078	35242,48153	180376538	209485406	178,91346	382507,6448
2026	91480727	36261,1341	186152918,9	202153375,6	189,96463	383916,6158
2027	92737830	37346,83994	189852842,1	201445596,8	201,82375	384467,6527
2028	94014499	38436,99634	193254394,1	199748847,6	214,60907	384632,5831
2029	95305662	39574,58548	196350668	199715857,5	227,77213	384616,3791
2030	96615039	40732,29511	200325853,8	198287227,5	242,28974	384569,0158

4.2. Çok Kriterli Karar Verme Modeli

Bu alt bölümde, ÇKKV modeli kapsamında geliştirilen elektrik enerjisi karması senaryoları, seçilen değerlendirme kriterleri ve bunlara ait veri seti ve TOPSIS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirme işlemi konuları yer almaktadır.

4.2.1. Elektrik enerjisi karması senaryolarının oluşturulması

Bu çalışma özellikle elektrik enerjisi karması sürdürülebilirliği üzerine odaklanmaktadır ve aynı tipteki enerji üretim teknolojilerinin yer aldığı dört farklı senaryo içindeki en iyi seçeneği belirlemeyi hedeflemektedir.

Birinci bölümde belirtildiği üzere bu tez çalışmasında elektrik enerjisi senaryolarının

geliştirilmesinde temel olarak Türkiye'nin yakın geçmişteki elektrik enerjisi karması dikkate alınmıştır [4, 5], Çizelge 4.5, Çizelge 4.6.

Çizelge 4.5. Enerji kaynaklarının Türkiye'nin brüt enerji üretimindeki 2018 yılına ait payları [4]

Kaynak	Elektrik üretimi (GWh)	Katkı (%)
İthal kömür	62988,5	20,67
Taş kömürü+Asfaltit	5173,1	1,70
Linyit	45087,0	14,79
Doğal gaz	92482,8	30,34
Sıvı yakıtlar	329,1	0,11
Barajlı	40972,1	13,44
D. göl ve Akarsu	18966,4	6,22
Rüzgâr	19949,2	6,54
Yenilenebilir+Atık+Atık ısı	3622,9	1,19
Jeotermal	7431,0	2,44
Güneş	7799,8	2,56
Toplam	304801,9	100,00

Çizelge 4.6. Enerji kaynaklarının Türkiye'nin kurulu gücü içindeki 2018 yılına ait payları [5]

Kaynak	Kurulu güç (MW)	Katkı (%)
İthal kömür	8793,85	9,93
Taş kömürü+Asfaltit	782,50	0,88
Linyit	9456,09	10,68
Sıvı yakıtlar	370,60	0,42
Çok yakıtlılar	5206,83	5,88
Atık ısı	197,03	0,22
Doğal gaz	21479,89	24,26
Yenilenebilir Atık+Atık	621,87	0,70
Rüzgâr	7005,39	7,91
Güneş	5062,84	5,72
Barajlı	20536,10	23,19
D. göl ve Akarsu	7755,29	8,76
Jeotermal	1282,52	1,45
Toplam	88550,78	100

Henüz Türkiye'de işletme aşamasında olan bir NES bulunmamaktadır. Öte yandan, 2023-2035 yıllarını kapsayan dönemde üç adet NES'in işletmeye alınması planlanmaktadır [6].

Bu çalışmada Türkiye'nin yakın geçmişteki elektrik enerjisi karmasında mevcut olan enerji üretim teknolojilerinden seçim yapılırken temel olarak iki faktör dikkate alınmıştır. Bu faktörler bir enerji üretim teknolojisi için bu teknolojinin elektrik enerjisi karması içindeki

oranı ve ilgili teknoloji için gereksinim duyulan, kriterlere ait verilerin mevcudiyetidir. Türkiye'nin yakın geçmişteki elektrik enerjisi karmasında göreceli olarak daha yüksek orana sahip olan enerji üretim teknolojileri seçilmiştir.

Gerek kömür ve gerekse linyit Türkiye'nin yakın geçmişteki elektrik enerjisi karmasında önemli oranlara sahiptir, bununla birlikte literatürde linyit için yeterli veri bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, bu iki teknoloji sadece kömür seçeneğiyle temsil edilmektedir.

Hidroelektrik santraller yapı tipine göre ya da kurulu güce göre sınıflandırılabilmektedir, ancak kurulu gücün büyüklüğü dikkate alınarak yapılan, global ölçekte kabul görmüş bir sınıflandırma bulunmamaktadır [64]. Özellikle nehir tipi olmak üzere, bazı hidroelektrik santral yapı tipleri için yeterli veri olmaması ve ayrıca bu santrallerle ilgili büyüklük sınırlarıyla ilgili farklı tanımlar olması sebebiyle literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda [24, 27, 36] olduğu gibi bu tez çalışmasında hidroelektrik seçeneğine herhangi bir sınıflandırma olmadan yer verilmiş olup sadece sevk edilebilir üretim kriteri bu yaklaşımın dışında bırakılmıştır.

Geliştirilmiş olan dört adet elektrik enerjisi karması senaryosu Senaryo-(A), Senaryo-(B), Senaryo-(C) ve Senaryo-(D) olarak adlandırılmış olup bu senaryolarda kömür, doğal gaz, nükleer, hidroelektrik, rüzgâr ve solar-PV teknolojilerine yer verilmiştir. Bu senaryolara ait elektrik enerjisi üretim oranları Çizelge 4.7'de, senaryolara ait kurulu güç oranları ise Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Senaryolara göre teknoloji bazında elektrik enerjisi üretim oranları ve miktarları

Enerji üretim teknolojisi	Senaryo-(A)		Senaryo-(B)		Senaryo-(C)		Senaryo-(D)	
	Miktar (MWh)	Katkı (%)	Miktar (MWh)	Katkı (%)	Miktar (MWh)	Katkı (%)	Miktar (MWh)	Katkı (%)
Kömür	157554950	35	180062800	40	135047100	30	130545530	29
Doğal gaz	135047100	30	162056520	36	108037680	24	90031400	20
Nükleer	40514130	9	40514130	9	121542390	27	40514130	9
Hidroelektrik	81028260	18	45015700	10	54018840	12	99034540	22
Rüzgâr	27009420	6	18006280	4	22507850	5	54018840	12
Solar-PV	9003140	2	4501570	1	9003140	2	36012560	8
Fosil yakıtlar Toplam	292602050	65	342119320	76	243084780	54	220576930	49
Nükleer Toplam	40514130	9	40514130	9	121542390	27	40514130	9
Yenilenebilir Toplam	117040820	26	67523550	15	85529830	19	189065940	42
Genel Toplam	450157000	100	450157000	100	450157000	100	450157000	100

Çizelge 4.8. Senaryolara göre teknoloji bazında kurulu güç oranları ve miktarları

Enerji üretim teknolojisi	Senaryo-(A)		Senaryo-(B)		Senaryo-(C)		Senaryo-(D)	
	Miktar (MW)	Katkı (%)	Miktar (MW)	Katkı (%)	Miktar (MW)	Katkı (%)	Miktar (MW)	Katkı (%)
Kömür	34561	28	39499	36	29624	27	28637	18
Doğal gaz	29624	24	35549	32	23699	21	19749	12
Nükleer	5744	5	5744	5	17231	16	5744	4
Hidroelektrik	30751	25	17084	16	20500	18	37584	24
Rüzgâr	10676	9	7117	6	8897	8	21352	14
Solar-PV	10969	9	5484	5	10969	10	43874	28
Fosil yakıtlar Toplam	64185	52	75048	68	53323	48	48386	30
Nükleer Toplam	5744	5	5744	5	17231	16	5744	4
Yenilenebilir Toplam	52396	43	29685	27	40366	36	102810	66
Genel Toplam	122325	100	110477	100	110920	100	156940	100

Senaryo-(A) Türkiye'nin yakın geçmişteki elektrik enerjisi karmasına benzerlik taşımakta olup bunun yanında NES seçeneğini içermektedir. Enerji üretimi dikkate alındığında fosil yakıtlar, nükleer ve yenilenebilir enerjiler sırasıyla Senaryo-(B), Senaryo-(C) ve Senaryo-(D) elektrik enerjisi karmalarında karşılaştırmalı olarak daha yüksek oranlara sahiptir.

4.2.2. Çok kriterli karar verme modelinde kullanılan veri seti

Sürdürülebilirlik değerlendirmesi çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal boyutlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu boyutlarla ilgili 10 farklı kriter seçilmiş olup her bir enerji üretim teknolojisi bazında, kriterler için ihtiyaç duyulan değerler literatürden alınmıştır. Güç birimine sahip kriterlere ait değerlerle hesaplama yapılabilmesi amacıyla her bir enerji üretim teknolojisine ait kurulu güç oranları hesaplanmıştır.

Çevresel boyut kriterleri

İnsanların gıda, su ve hava gibi temel ihtiyaçlarının sağlıklı bir biçimde karşılanmasında çevre önemli bir role sahiptir. Çevresel sürdürülebilirlik, insanların ihtiyaçlarının doğanın kendini yenileme kapasitesi aşılmayacak bir biçimde, doğal sermayenin korunarak gerek bugün gerekse gelecekte karşılanabilmesini amaçlayan bir yaklaşım olarak tarif edilebilir.

Çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımının uygulanması sonucunda küresel ısınmanın olumsuz etkileri belirli bir ölçüde azaltılabilir, atık oluşumunda ve çevre kirliliğinde azalma sağlanabilir ve ekosistemlerin sağlığı korunmuş olur.

Çevresel boyut yaşam döngüsü değerlendirmesi temelinde CO_2 eşdeğer (CO_2-eş) emisyonu kriterini ve azot oksit bileşikleri (NO_x) emisyonu kriterini kapsamaktadır.

CO_2-eş emisyonu kriteri

Sera gazları ısıyı muhafaza etme özellikleri nedeniyle sera sistemlerinde oluşan ısınma etkisine benzer bir etki oluşturmalarından dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır. Esas olarak sera gazlarından kaynaklanan ısınmanın oluşmasına ait proses sera sistemlerinden çeşitli özellikleri bakımından farklı olmaktadır.

Güneş ışığına ait elektromanyetik spektrumda gama ışınları, X-ışınları, ultraviyole ışık, görünür ışık, kızılötesi ışık, mikrodalgalar ve radyo dalgaları yer almaktadır. Dünya atmosferine ulaşan güneş ışığı %29 oranında geri yansıtılmakta ve kalan kısım yeryüzüne ulaşabilmektedir. Öte yandan, Dünya atmosferini geçen ve yeryüzüne ulaşan elektromanyetik radyasyon esas olarak ultraviyole ışık, görünür ışık ve kızılötesi ışıktan oluşmaktadır.

Yeryüzüne ulaşan güneş ışığı karalar ve okyanuslar tarafından soğurulur. Daha sonra, soğurulan elektromanyetik radyasyon ısınan karalar ve okyanuslar tarafından kızılötesi ışık olarak yayılır. Atmosfere ulaşan kızılötesi ışığın az oranda olmak üzere bir kısmı atmosferden uzaya geçer. Kızılötesi ışığın önemli bir kısmı atmosferde bulunan sera gazları tarafından soğurulur ve sonrasında tekrar yeryüzüne yayılır. Sonuç olarak, atmosferin en alt tabakası olan troposfer ve yeryüzü ısınır. Bu olgu sera etkisi olarak adlandırılmaktadır.

Doğal sera etkisi, yeryüzünde yaşamın devam edebilmesi için önemlidir. Sera etkisi sayesinde yeryüzü ortalama bir sıcaklık değerine sahip olmaktadır. Öte yandan, sanayileşmenin başlamasıyla birlikte fosil yakıt tüketiminde oluşan artış, atmosferde belirli değerler arasında olan sera gazı konsantrasyonunda önemli ölçüde artışa sebep olmuştur. Sera gazlarının konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak sera etkisinde de artış olmuştur. Bu durum geniş ölçekli bir sorun olan küresel ısınmanın ortaya çıkmasında etkili olmuştur.

Sera gazları doğal yollardan oluşabildiği gibi insan faaliyetleri sonucunda da oluşmaktadır. Enerji alanında yer alan elektrik üretimi, ulaşım, sanayi, konutlarda ve ticari binalarda

ısıtma gibi fosil yakıtların kullanıldığı insan faaliyetleri neticesinde sera gazı emisyonları gerçekleşmektedir. Başlıca sera gazları CO_2, metan (CH_4), nitröz oksit (N_2O) ve endüstriyel gazlar olan hidroflorokarbonlar (HFCs), perflorokarbonlar (PFCs) ve sülfür hekzaflorür (SF_6) bileşikleridir.

İklim değişikliği küresel ısınmayı ve bununla birlikte küresel ısınma nedeniyle meydana gelen çeşitli iklimsel gelişmeleri de kapsayan ve küresel ısınmaya kıyasla daha uzun döneme yayılan bir inceleme alanına sahip olan bir kavramdır. İklim değişikliğinin sonucunda doğada çeşitli değişimler gerçekleşmektedir. Esas olarak, doğada meydana gelen bir değişim doğada diğer çeşitli değişimlere neden olabilmekte ve sonuç itibariyle bu gelişmeler de ekosistemleri, ekonomileri, sosyal yaşamı ve insan sağlığını etkilemektedir.

İklim değişikliği sonucunda meydana gelen doğadaki değişimlerden bazıları deniz su seviyelerinin yükselmesi, deniz yüzeylerinde sıcaklık artışı, kriyosferde yer alan farklı türlerdeki buz kütlelerinin erimesi, aşırı yağmur yağışı, kuraklık ve okyanus asitlenmesi olmaktadır.

Deniz su seviyeleri artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak deniz suyunun genleşmesi ve ayrıca buzulların ve buz tabakalarının erimesi neticesinde yükselmektedir. Bu durum fırtına, sel ve erozyon oluşumuna sebep olabilir.

Denizlerin karasal alanlarda genişlemesi sonucunda, bu alanlarda kalan içme suyu kaynakları ve tarımsal ürün ekim alanları deniz suyunun tuzlu olması nedeniyle bu durumdan olumsuz etkilenir. Öte yandan, bu alanlarda bulunan ekosistemler de etkilenmektedir. Sonuç olarak kıyı bölgelerindeki yerleşim alanları etkilendiğinden, bu bölgelerin sakinleri bu bölgelerden taşınabilirler. Turizm gibi ekonomik faaliyetler de bu durumdan olumsuz yönde etkilenirler.

Deniz yüzeylerinde sıcaklık artışı olgusu kimi zaman okyanus yüzeylerinde sıcaklık artışı olarak da adlandırılmaktadır. Deniz yüzeylerinin ısınması deniz sıcak dalgalarının oluşumuna neden olmaktadır. Deniz sıcak dalgaları ise akuakültür sistemler üzerindeki etkileri ve alg artışına sebebiyet vermeleri gibi çeşitli nedenlerle insan sağlığını olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir.

Deniz su yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı çeşitli ekosistemleri etkilemektedir. Bunlardan önemli bir tanesi mercan resifleridir. Mercan resiflerinin mevcudiyeti birçok deniz canlısının yaşamını sürdürmesi bakımından önem arz etmektedir. Mercan resiflerinin azalması, bu canlıların yaşam şartlarını olumsuz yönde etkilemektedir.

Kriyosfer Dünyadaki deniz buzu, buzul ve permafrost gibi donmuş su kütlelerinin bütününü adlandırmakta kullanılan bir kavramdır. Kuzey kutup bölgesinde esas olarak okyanus bulunmakta olup bu okyanusta deniz buzu oluşumu mevcuttur ancak sıcaklık artışları nedeniyle deniz buzu erimektedir.

Buzul ve permafrost kütlelerinde de artan sıcaklıklar nedeniyle olağan durumdan daha fazla oranda erime meydana gelmektedir. Buzullar karalarda yer alan, yağışlar sonucu oluşan tatlı su kütleleridir. Buzullarda meydana gelen aşırı erime, tatlı su kaynaklarının da tükenmesi anlamına gelmektedir. Buna ilaveten, erime sonucunda buzullarda bulunan CH_4 doğaya salınmakta ve bu durum küresel ısınmayı daha da hızlandırmaktadır. Benzer bir durum, permafrost kütlelerinin içerdiği karbon ve CH_4'ün kütlelerin aşırı erimesi sonucunda serbest kalması nedeniyle de gerçekleşmektedir.

Aşırı yağmur yağışları iklim değişikliğine bağlı olarak yeryüzünün daha fazla ısınması sonucu, olağan miktardan daha fazla miktarda buharlaşma olması ve atmosferde tutulan yüksek miktardaki nemin yeryüzüne ulaşması nedeniyle meydana gelmektedir. Aşırı yağışlar çevreye, insanların yerleşim alanlarına ve insan sağlığına zararlı olabilecek sel ve ani sel oluşumlarına yol açmaktadır.

Kuraklık çeşitli nedenlerle oluşabilmektedir. İklim değişikliğinin etken faktör olduğu ekstrem kuraklık; kuraklık oluşumuna yatkın olan bölgelerde, yükselen sıcaklığa bağlı olarak toprakta bulunan suyun hızlı bir biçimde buharlaşması sonucunda oluşmaktadır. Kuraklık tarımsal üretimi, ekosistemleri ve insan sağlığını etkilemektedir.

Okyanuslarda asitlenme atmosferde artış göstermiş olan sera gazlarından CO_2'nin okyanuslarda çözünmesi sonucu karbonik asit (H_2CO_3) oluşturması nedeniyle gerçekleşmektedir. Bu durum, okyanuslarda bulunan çeşitli ekosistemlerin işleyişini ve bunun yanı sıra ekonomik bakımdan balıkçılık gibi çeşitli sektörleri etkilemektedir.

Genellikle sera gazı olarak fosil yakıt kullanımından kaynaklanan sera gazları içinde yüksek orana sahip olması nedeniyle CO_2 üzerinde durulsa da, yanma işlemi sonucu oluşan diğer bazı sera gazlarını da dikkate almak gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada sadece CO_2 emisyonu değil sera gazları emisyonu kriter olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, enerji üretim teknolojileri için yaşam döngüsü analizi sonucunda hesaplanan sera gazları emisyon değerleri tercih edilmiştir. Bir enerji santrali için yaşam döngüsü genel itibariyle inşaat faaliyetleri çerçevesinde kullanılacak olan ham maddelerin çıkarılmasından başlayarak bu malzemelerle yapı malzemesi imalatlarının gerçekleştirilmesi, santralin inşa edilmesi, yakıt üretimi ve yakıtın santrale taşınması, santralin işletilmesi, santralin sökülmesi ve santralin geri dönüşümü gibi aşamaları kapsar.

En çok sera gazı emisyonunun gerçekleştiği yaşam döngüsü aşamaları enerji üretim teknolojisinin türüne göre değişmektedir. Bu bakımdan, sadece bir aşamadaki emisyon değerleri yerine daha detaylı olan yaşam döngüsü boyunca oluşan emisyon değerlerinin kullanılması daha doğru bir yaklaşım olmaktadır.

Farklı sera gazları küresel ısınma üzerinde farklı derecelerde etkilere sahiptir. Bir sera gazına ait enerji soğurma kapasitesi ve atmosferde kalma süresi parametrelerine bağlı olarak bu etkinin değeri belirlenir. Bu etki değeri CO_2 için 1 değeri alınarak ve genellikle 100 yıllık bir süreyi kapsayacak biçimde hesaplanan oransal bir değer olup küresel ısınma potansiyeli olarak tanımlanmaktadır.

CO_2-eş birbirinden farklı sera gazlarının küresel ısınma potansiyelini [65] ortak bir ölçekle [66] belirlemeye yarayan bir tür ölçüdür. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan kriter her bir enerji üretim teknolojisinin küresel ısınma üzerindeki etkisini üretilen birim elektrik enerjisi çıktısı başına CO_2-eş olarak göstermektedir.

Kömür, doğal gaz, hidroelektrik ve rüzgâr için CO_2-eş değerleri, Türkiye için değerlerin hesaplanmış olduğu [28]'den alınmıştır. Hidroelektrik için küçük rezervuar, büyük rezervuar ve nehir tipi hidroelektrik santral için verilen değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Kömür için kömür ve linyite ait değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Doğal gaz ve rüzgâr için değerler doğrudan kullanılmıştır.

Nükleer ve solar-PV için kriterlere ait değerler Turconi, Boldrin ve Astrup'a [67] ait olan derleme çalışmasından alınmış olup her bir güç üretim teknolojisi için maksimum ve minimum değerlerin ortalaması kullanılmıştır.

NO_x emisyonu kriteri

Hava kirliliği insan sağlığına ve doğaya olumsuz etkileri olan kirletici maddelerin atmosferde bulunması olarak tanımlanabilir. Hava kirletici maddeler kaynaklarına göre iki gruba ayrılmaktadır. Emisyon yoluyla atmosfere karışan kirleticiler birincil kirleticiler olarak adlandırılmaktadır. Birincil kirleticiler volkanik püskürme gibi doğal yollardan oluşabilmekte olup ayrıca ulaşım araçları ve fosil yakıtlarla çalışan enerji santralleri bu gruptaki kirleticilerin oluşumunda rol oynamaktadır.

Birincil kirleticilerin atmosferde mevcut olan çeşitli kimyasal maddelerle gerçekleşen kimyasal reaksiyonları neticesinde oluşan kirleticiler ikincil kirleticiler olarak adlandırılmaktadır.

Hava kirleticiler fiziksel özelliklerine göre gazlar, aerosoller ve partikül maddeler olarak da sınıflandırılmaktadır. Hava kirleticiler; insanlar, hayvanlar, bitkiler, malzemeler ve ekonomi üzerinde etkiye sahiptir.

İnsanlar üzerindeki başlıca etki sağlık bakımından olmaktadır. Kardiyovasküler sistemin etkilenmesi sonucunda kalp hastalıkları, solunum sisteminin etkilenmesi neticesinde ise kronik bronşit, astım ve nefes darlığı ortaya çıkabilir. Gastrointestinal sistem, endokrin sistem, hematolojik sistem ve nörolojik sistem hava kirliliğinden etkilenen diğer sistemler arasında yer almaktadır.

Hava kirliliği hayvanları iki şekilde etkilemektedir. Birinci durum kuşların solunum sisteminin hava kirleticilerden etkilenmesi gibi olguları kapsayan, hayvanların sağlığının doğrudan etkilenmesidir. İkinci durum hava kirleticilerin besinlere nüfuz etmesi ve bu besinlerle beslenen hayvanlarda bu besinlerin toksik etki göstermesi sonucunda ya da ekosistemin etkilenmesi nedeniyle hayvan sağlığının dolaylı olarak etkilenmesidir. Bazı hava kirleticiler akuatik canlıların yaşam ortamı olan suya karışmaları halinde ekosistemin özelliklerini bu canlılar için olumsuz olacak biçimde değiştirebilir. Hava kirliliği ayrıca

vahşi hayvanların habitatlarını değiştirmelerine de neden olabilmektedir.

Hava kirleticiler bitkilere, bitkinin kök sistemi ya da yapraklarında bulunan gözenekler vasıtasıyla nüfuz edebilir. Hava kirleticiler bitkilerin yetiştiği toprağın pH değerini etkileyerek asiditesini yükseltebilir. Bu durum ise toprakta bulunan, bitkinin ihtiyaç duyduğu besinlerin miktarının azalmasına neden olabilmektedir.

Bitkilerde gözeneklerden geçen kirleticiler kimyasal reaksiyonlar oluşturabilir. Bitkiler, kirletici madde geçişini engellemek amacıyla gözeneklerini kapatabilmektedir. Öte yandan, gözeneklerden geçen kirleticilerin fotosentez reaksiyonlarını etkilemesi ve bitkinin gözeneklerini kapatması sonucunda, fotosentez için bitkinin dış ortamdan sağladığı gerekli reaktant miktarında azalma olması nedeniyle bitkinin gelişiminde yavaşlama meydana gelebilmektedir.

Hava kirliliği; metal, plastik, cam, yapı taşları, kauçuk, deri, boya, seramik, tekstil ürünü ve kâğıt gibi malzemeleri çeşitli biçimlerde etkilemektedir. Bir kirletici, belirli bir malzemede; kabuk oluşumu, renk değişimi, korozyon oluşumu, çatlak oluşumu ve kararma oluşumu gibi etkilere neden olabilmektedir.

Hava kirliliğinin ekonomik bakımdan oluşturduğu etkilerin önemli bir oranını insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri sonucunda meydana gelen sağlıkla ilgili maliyetler oluşturmaktadır. Sağlık problemleri iş gücünü de etkilemekte olup bu alanda da ekonomik kayıplar meydana gelmektedir.

Ekonomik değeri olan deniz ürünlerinin yer aldığı ekosistemlerin, tarımsal ürünlerin, mimari yapıların ve malzemelerin hava kirliliğinden olumsuz yönde etkilenmesi beraberinde çeşitli ekonomik maliyetleri de getirmektedir. Öte yandan, hava kirliliğinin önlenmesi için gerekli olan yatırımlar da ayrıca maliyet oluşturmaktadır.

NO_x, asit içeren atmosferik yağış ve hava kirliliği gibi çeşitli biçimlerde çevreyi etkileyen azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) bileşiklerini kapsamakta olup ayrıca bu bileşik grubu insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilmektedir [68].

NO_x oluşumu yanma işlemi sırasında, yakıtın ihtiva ettiği azottan kaynaklanabilir. Öte

yandan, NO_x oluşumunda esas etken yüksek sıcaklıkta yanma işleminde gerçekleşen atmosferik oksijen ve azotun reaksiyonu olmaktadır. Dolayısıyla, yanma işleminde hava yerine oksijen kullanılması bu durum nedeniyle ortaya çıkan emisyonların oluşumunu önleyebilmektedir.

NO_x atmosferde su buharı ile birleşerek nitrik asit (HNO_3) kimyasal bileşiğini oluşturur. Bu bileşik yağmur ve kar gibi atmosferik olaylarla yeryüzüne taşınır. Günümüzde, bu durum için daha yaygın olarak asit yağmuru ifadesi kullanılmaktadır. Asit yağmurları orman alanları, tarım alanları, akarsu ve göller gibi doğal oluşumlar üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Asit yağmurları ayrıca binalar üzerinde aşındırıcı etkiye neden olmaktadır.

NO_x, güneş ışığında uçucu organik bileşiklerle tepkimeye girerek ozon (O_3) oluşumuna sebep olmaktadır. Bu şekilde oluşan O_3, zemine yakın seviyelerde bulunmakta olup fotokimyasal duman-sis olarak ifade edilmektedir.

Zemine yakın seviyede O_3 mevcudiyeti olması hava kirliliğine yol açmaktadır. Çeşitli bitkilerde O_3'e karşı hassasiyet mevcut olup bu bitkiler duman-sis oluşumundan olumsuz biçimde etkilenirler. Dolayısıyla bu durum ekosistemi de etkiler. Duman-sis, insanlarda solunum sistemi sağlığı ve kardiyovasküler sistem sağlığını etkilemektedir.

Bu çalışmada, NO_x emisyonu değerleri doğal gaz, nükleer, hidroelektrik, rüzgâr ve solar-PV için [67]'de verilen maksimum ve minimum değerlerin ortalaması hesaplanarak bulunmuştur. Kömür değeri için kömür için ortalama değerin ve linyit için ortalama değerin ortalaması hesaplanarak, bulunan ortalama değer kullanılmıştır.

Ekonomik boyut kriterleri

Genel itibariyle, bir ekonomik sistemin tümü için ekonomik sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi işlemi ekonomik büyümenin bir göstergesi olan GSYH değeri esas alınarak gerçekleştirilmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik yaklaşımının uygulanmasındaki amaç yaşam standardının yükseltilmesi olup GSYH seviyesinin yüksek olması ekonomik sürdürülebilirlik için önemli olmaktadır.

Ekonomik sürdürülebilirlik bir ekonomik sistemin tümünün yanı sıra, işletme düzeyinde de tanımlanabilen bir kavramdır. Bir işletmede, ekonomik sürdürülebilirliğin gerçekleştirilebilmesi esas olarak işletmenin finansal performans bakımından elde ettiği başarıyla ilgilidir. İşletmenin faaliyetlerine devam edebilmesi için kâr elde edebilmesi gerekmektedir.

Ekonomik sürdürülebilirlik çerçevesinde, işletmenin finansal performansına ilaveten çevresel ve sosyal açıdan sürdürülebilirliğinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Bu bakımdan işletmenin, varlıklarını ve sınırlı olan doğal kaynakları en verimli şekilde kullanması önemlidir. İşletme düzeyinde gerçekleştirilen ekonomik sürdürülebilirlik daha geniş ölçekte, ekonomik büyümeye katkı sağlayarak ekonomik sistemi de olumlu yönde etkileyebilmektedir.

Enerji üretimi yatırımları genel olarak yüksek maliyetli, uzun sürede tamamlanan ve uzun ömre sahip olan yatırımlardır. Bu bakımdan enerji üretimi yatırımlarının ekonomik olarak sürdürülebilir olması önemlidir.

Enerji santrali yatırımına ait maliyetler; enerji santralinde üretilen elektrik enerjisinin birim maliyetini de etkilemektedir. Bu maliyetler kapsamında santrale ait yatırım maliyeti; santrale ait yakıt, işletme ve bakım maliyeti, hava durumuna bağlı olarak üretim ve talep miktarlarında oluşan değişikliklerden kaynaklanan maliyetler, iletim ve dağıtım sistemlerine ait yatırım maliyetleri ve işletme ve bakım maliyetleri yer almaktadır.

Öte yandan, yakıtla çalışan santraller için yakıt fiyatlarının uzun dönemdeki belirsizliği gibi faktörler dikkate alınarak ekonomik bakımdan yatırım planlamasının yapılması önem taşımaktadır.

Ekonomik boyut üç kritere sahiptir. Bunlar sırasıyla, yatırım maliyeti kriteri, yakıt, işletme ve bakım maliyeti kriteri ve santral ömrü kriteri olmaktadır.

Yatırım maliyeti kriteri

Yatırım maliyeti genel anlamda, gerçekleştirilmesi planlanan bir yatırımın getirisi hakkında öngörüde bulunulması amacıyla değerlendirilen bir maliyet hesaplaması türüdür.

Bir yatırımın gerçekleştirilebilmesi için yatırıma ait getirinin, yatırım maliyeti ve diğer maliyetler olan işletme maliyetleri gibi giderlerin toplamından daha fazla olması gerekmektedir.

Yatırım maliyetinin hesaplanması gerçekleştirilmesi planlanan bir yatırımın, diğer yatırım alternatifleri ile karşılaştırılmasına da olanak sağlamaktadır, böylece getirisi en yüksek olan yatırımın seçilebilmesi olanaklı olmaktadır.

Yatırım maliyetinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşım sektörlere göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan yatırım maliyetleri, enerji ekonomisi literatüründe gecelik maliyet olarak tanımlanan, faiz etkisinden kaynaklanan maliyet içermeyen değerlerdir.

Günümüzde, enerji yatırımlarının yüksek maliyetli olması sebebiyle yatırımın finansal giderlerinin karşılanmasında kredi kullanımı bir seçenek olmaktadır. Dolayısıyla bu durum beraberinde bir faiz yükü getirmektedir. Enerji projeleri için gecelik maliyet, kredi kullanımından kaynaklanan ya da farklı bir faiz maliyeti içermeyen, yatırımın bir gecede gerçekleştirilmesi durumunda oluşacak yatırım maliyeti olarak tanımlanmaktadır.

Yatırım maliyeti genel olarak bazı inşaat öncesi maliyetler, mühendislik, tedarik ve inşaat işlerine ait maliyetler ve yapım işlerinin gerçekleştirilmesi sırasında çeşitli belirsizliklere bağlı oluşabilecek öngörülemeyen ya da beklenmedik bazı maliyetleri kapsar. Bu maliyetler, ülkeden ülkeye ve aynı ülkede, bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilmektedir.

Bu çalışmada solar-PV, rüzgâr, nükleer, doğal gaz ve kömür için 2018 Uluslararası Enerji Ajansı Dünya Enerji Modeli girdi verilerinden [69] alınan, Avrupa Birliği bölgesi için yakın geçmişe ait olan değerler kullanılmıştır.

Bu kritere ait olan değerler rüzgâr haricinde doğrudan alınmıştır. Rüzgâr enerjisi santrali için karasal rüzgâr enerjisi santrali ve deniz üstü rüzgâr enerjisi santraline ait değerlerin ortalaması hesaplanarak elde edilen değer kullanılmıştır.

Bu veri setinde hidroelektrik için değer yer almamaktadır. Bu nedenle hidroelektrik yatırım maliyeti için [70]'te yer alan ve esas olarak global maliyet değerleri olan küçük

hidroelektriğe ait ortalama değerin ve büyük hidroelektriğe ait ortalama değerin ortalama değeri hesaplanmış olup, bulunan değer kullanılmıştır.

Yakıt, işletme ve bakım maliyeti kriteri

Nükleer, kömür ve doğal gaz enerji santralleri için yakıt önemli bir gider türüdür. Öte yandan, genel olarak solar-PV ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji santralleri için bu durum geçerli değildir.

Kullanılan yakıt miktarı ve dolayısıyla yakıt maliyeti santralin enerji çıktısına göre değişir. Bir enerji santralinde kullanılan yakıtın maliyetinin hesaplanmasında yer alan maliyet kalemleri kullanılan yakıtın türüne göre değişmekle birlikte, genel itibariyle yakıtın satın alındığı yerdeki satış fiyatını, yakıtın santrale nakliyesinden kaynaklanan maliyetleri ve yakıtın santralde kullanıma hazır hale getirilmesi ile ilgili maliyetleri kapsamaktadır.

Yakıt maliyetinin genel santral maliyetine oranı santral türüne göre çok yüksek bir değerde olabilir. Enerji santralinin işletilmesi süresince yakıt kullanılacağından yakıt birim fiyatlarındaki oynaklığın en az seviyede olması istenmektedir. Enerji üretiminde kullanılan yakıtın türüne göre yakıt fiyatını etkileyen faktörler değişiklik gösterebilmektedir.

Kömür birim fiyatını etkileyen asıl faktör talep miktarı olmaktadır. Enerji santralleri, kömür kullanımında önemli bir paya sahip olduğundan elektrik enerjisi talebindeki artışlar kömür fiyatını etkilemektedir. Dünya üzerinde, kömür kaynaklarının yaygın olması ve diğer yakıtlara kıyasla daha fazla miktarda bulunması nedeniyle arz miktarı kömür fiyatları üzerinde talep miktarı kadar etkili olmamaktadır.

Kömürün madenden çıkarılmasında kullanılan yöntem ve kömür madeni yataklarının zemin tabakaları içindeki konumu da kömür birim fiyatını etkileyen faktörler olmaktadır. Kömür tabakalarının zemin yüzeyine yakın olması ve kalın tabakalar halinde bulunması durumunda çıkarma maliyeti azalmakla birlikte daha derinde yer alan ince tabakalar için maliyet yüksek olmaktadır.

Doğal gaz birim fiyatı mevsimsel talebe bağlı olarak değişmektedir. Kış aylarında hava sıcaklığının düşük seyrettiği periyotlarda, ısınma amaçlı olan doğal gaz kullanımının

artması, yaz aylarında ise hava sıcaklığında artış olan periyotlarda klima kullanımında artış olması ve bu talebin doğal gazla çalışan enerji santralleri ile karşılanması durumunda, talebin yükseldiği zaman dilimleri için doğal gaz birim fiyatında artışlar olabilmektedir.

Ekstrem hava koşullarına bağlı olarak oluşan doğa olayları doğal gaz arz miktarlarını etkileyebilmektedir. Kasırga ve fırtına gibi doğa olayları doğal gaz çıkarılan alanlarda, çalışmaların durmasına sebep olabilmektedir. Düşen arz miktarları ise doğal gaz birim fiyatını yükseltebilmektedir.

Nükleer santral yakıtı birim fiyatını etkileyen başlıca faktör talep miktarı olmaktadır. Arz miktarı ise birim fiyatı etkileyen diğer bir faktördür. Nükleer yakıt üreten firmaların üretiminin belirli sürelerde durması sonucunda arz yetersizliği riski oluşabilmektedir. Sektörde yer alan bir enerji üretim şirketi, şayet bünyesinde nükleer yakıt envanteri mevcutsa arz yetersizliği riskine karşı önlem alabilmektedir. İhtiyaç halinde bu stoklar kullanılmakta olup bu durum ise nükleer yakıt birim fiyatlarını etkileyebilmektedir.

Nükleer yakıt birim miktarındaki enerji içeriği fosil yakıtlara kıyasla çok yüksek seviyede olmaktadır. Bu durum nedeniyle, nükleer yakıtın göreceli olarak nakliye maliyetleri daha düşüktür ve bundan dolayı, nakliye işlemi yakıt fiyatı üzerinde düşük seviyede bir etkiye sahiptir.

İşletme maliyetleri işletmenin günlük faaliyetlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan harcamalar olmaktadır. İşletme maliyetleri, işletmenin kâr ve zarar durumu çerçevesinde önemli bir maliyet grubu olup işletmenin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için bu maliyetleri ilgilendiren planlamaların uygun bir biçimde yapılması ve ayrıca bu maliyetlerle ilgili işlemlerin verimli ve etkin bir biçimde idare edilmesi gerekmektedir.

İşletme ve bakım maliyetleri, sabit ve değişken maliyetler olarak ikiye ayrılmaktadır. Sabit maliyetler, enerji santralinin enerji üretim miktarından etkilenmemektedir. Değişken maliyetler ise enerji santralinin enerji üretim miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterirler.

Sabit maliyetlere örnek olarak personel maaş giderleri, düzenli bakım faaliyetlerine ait giderler ve sigorta giderleri verilebilir. Tamirat işlemlerine ait giderler, su kullanımına ait giderler ve sarf malzemesi giderleri ise değişken maliyetlere verilebilecek örneklerdendir.

Bakım işlemi, bir sistemin kullanım ömrü süresince güvenli bir biçimde çalışabilmesine ve performansının korunmasına katkı sağlamaktadır. Buna ilaveten, bakım sayesinde sisteme ait bileşenlerin ömürleri uzatılabilmektedir.

Bakım işlemi için geliştirilmiş olan çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çerçevede başlıca yaklaşımlar düzeltici bakım, önleyici bakım, kestirimci bakım, duruma bağlı bakım ve önceden belirlenen bakım olmaktadır.

Düzeltici bakım bir sisteme ait bir bileşende arızalanma olması durumunda gerçekleştirilen reaktif bakımdır. Bir parçada hata tespit edilmesi durumunda ilgili parça tamir edilir. Gerekli olduğu durumlarda ise hatanın tespit edildiği parça yeni bir parçayla değiştirilir. Bu bakım plansız türde bir bakım olduğundan sistemin durdurulmasına neden olabilmektedir.

Önleyici bakım bir sistemde oluşabilecek arızaların önceden belirlenmesi amacıyla periyodik olarak gerçekleştirilen bir bakım türüdür. Sistemde yırtılma ve aşınma gibi belirtiler gösteren parçalar tespit edilerek sistemin sorunsuz çalışabilmesi için gerekli tedbirler alınır.

Kestirimci bakım, bir sistemin performansının sensörler aracılığıyla sürekli olarak ölçülmesiyle elde edilen verilerin bilgisayar yazılımları vasıtasıyla analiz edilerek; meydana gelme ihtimali olan arızaların önceden tespit edilmesi yaklaşımını esas almaktadır.

Duruma bağlı bakım, bir sistemin durumunun sensörler vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak takip edilerek belirli bir sistem bileşeninde ölçülen bir değerin veya değerlerin sistemde arızaya yol açabilecek kritik seviyelere gelmesi durumunda, arızanın giderilmesi amacıyla sistemin incelemeye alınmasına yönelik bir yaklaşım olarak tanımlanabilir.

Önceden belirlenen bakım, sistemin üreticisinin gerek sistemle ilgili ve gerek sisteme ait bileşenlerle ilgili olarak belirlemiş olduğu esaslar dikkate alınarak gerçekleştirilen bir bakım türüdür. Bu bakım yaklaşımı, sistem üreticisinin önerdiği, arıza istatistiklerine ait veriler esas alınarak oluşturulmuş olan bir program dâhilinde belirli zamanlarda yapılan inceleme işlemlerini kapsamaktadır.

Bu çalışmada yatırım maliyeti için kullanılan değer hesaplama yaklaşımı; yakıt, işletme ve bakım maliyeti kriteri için de aynı şekilde uygulanmıştır.

Hidroelektrik için işletme ve bakım maliyetleri, yatırım maliyetinin %1-4 aralığında yer alan bir oranına eşit olarak kabul edilmekte olup bu tez çalışmasında bu değer %2,5 olarak alınmıştır [71]. Hidroelektrik için [28]'de olduğu gibi, yakıt maliyeti olmamasından dolayı, bu kriter için bu maliyet kalemi hesaplamaya dâhil edilmemiştir.

Santral ömrü kriteri

Bir elektrik üretim santralinin ömrü, yatırım planlaması bakımından önemli faktörlerden bir tanesidir. Dolayısıyla, bu faktör gerek santrale ait giderlerin hesaplanması gerek santrale ait getirilerin hesaplanması bakımından gerekli olan parametrelerden bir tanesi olmaktadır.

Her elektrik üretim teknolojisinin kendine özgü olan bir beklenen ömür süresi vardır. Elektrik üretim santralleri çeşitli mekanik ve elektrik aksamın birlikte kullanıldığı sistemler olduğundan, santralin beklenen ömür süresi sistemi oluşturan bileşenlerle ilgili olmaktadır.

Bir enerji santralinin tasarım aşamasında belirlenen bir ekonomik ömrü mevcut olmakla birlikte işletme aşamasını ilgilendiren çeşitli faktörler de bu sürenin miktarı üzerinde etkili olmaktadır. Santralin kullanımı süresince aksamda kaçınılmaz olarak yıpranma meydana geleceğinden çevresel faktörler, kullanım süresi ve sıklığı ve bakım gibi faktörler santralin ömrünü etkileyebilmektedir.

Yatırım konusu olan bir makine, ekipman ya da proje tasarımda belirlenmiş bir süre için teknik olarak fonksiyonel olmaya devam edebilir. Öte yandan, yatırım konusu olarak bir makine ele alınacak olursa teknolojik gelişmeler dolayısıyla, belirli bir süre kullanılan makinenin teknik olarak ömrü mevcut olmasına rağmen teknolojisi artık yetersiz olabilir veya yeni teknolojilerin kullanımıyla sağlanabilecek ekonomik fayda daha fazla olabilir. Dolayısıyla, belirtilen makine ekonomik bakımdan artık tercih edilmeyebilir ve yeni teknolojiye sahip bir makine ile değiştirilebilir. Bir başka deyişle, bu durum bir sistemin ekonomik ömrünün, beklenti değerinden daha kısa olabileceği anlamına gelmektedir.

Yatırım projelerinde, esas olarak yatırım konusu işletmenin işletildiği süre itibariyle kendini amorti etmesi ve kâr sağlaması amaçlanmaktadır. Bir elektrik üretim santrali yatırımı için yatırımın ekonomik fayda sağlayacağı tahminî süre santral ömrü olarak değerlendirilerek maliyet hesaplamalarında bu değer kullanılır. Daha sonrasında, santrale ait birim elektrik üretim maliyeti belirlenebilir. Gerçekleştirilen maliyet hesaplamalarında santralin ekonomik ömrü, santralin teknik ömrüne eşit olarak alınabilmektedir.

Elektrik üretim santralinin ömrü, yatırımın maliyetinin karşılanması bakımından önemli olmaktadır. Daha uzun santral ömrü, daha fazla elektrik üretimi anlamına geldiğinden, bu özellik birim üretim maliyetinin azalmasını sağlamaktadır.

Elektrik santralinin ömrünün beklenen ömürden daha kısa olması halinde, santrale ait maliyetin karşılanamaması durumu ortaya çıkabilir. Bu bakımdan santralin ömrünün en az beklenen ömür uzunluğunda olması önem arz etmektedir. Bu kriter için değerler [70]'ten alınmıştır.

Teknik boyut kriterleri

Teknik olarak sürdürülebilirlik, teknolojik sistemler olan enerji santrallerinin genel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesinde önemli bir sürdürülebilirlik boyutudur. Enerji santrallerinin verim özelliği gibi çeşitli teknik özellikleri ve bu özelliklere ait limitler üretilen enerji miktarı üzerinde etkili olmaktadır.

Teknik olarak sürdürülebilir olan bir teknolojinin, yeterli bir performansla, belirlenen fonksiyonunu yerine getirmesi amaçlanır. Bu bakımdan, bir teknolojinin tasarım ve imalat aşamaları teknik sürdürülebilirlik için belirleyici olan faktörler olmaktadır. Bunlara ilaveten, tasarlanan teknolojinin büyük ölçekli olumsuz dışsallıklar üretmemesi, dolayısıyla doğal kaynakları verimli bir biçimde kullanması ve çevresel etkilerinin en düşük seviyede olması da sürdürülebilirliğe katkı sağlayan diğer bazı faktörler olmaktadır.

Teknik boyut için üç adet kriter belirlenmiş olup bunlar verim kriteri, kapasite faktörü kriteri ve sevk edilebilir üretim kriteri olmaktadır.

Verim kriteri

Enerji üretimi verimi sistemin enerji çıktısının, enerji girdisine oranı olarak tanımlanabilir. Sistemin enerji veriminin yüksek olması farklı elektrik üretim teknolojileri için farklı faydalar sağlar.

Yakıtla çalışan enerji santrallerinden, aynı birim enerji çıktısı değeri için verimi yüksek olan santral daha az yakıt kullanır. Dolayısıyla, fosil yakıt kullanan santraller için bu aynı zamanda daha az sera gazı emisyonu ve hava kirletici oluşması anlamına gelmektedir. Daha az yakıt kullanımı, ekonomik faydanın da daha fazla olmasını sağlamaktadır. Bunlara ilaveten, verim artışı fosil yakıt kaynaklarının tükenme hızını azaltarak kaynakların daha uzun süre kullanılabilmesini de sağlar.

Solar-PV santrallerde ise yüksek verime sahip PV güneş enerjisi panellerinin kullanılması, birim panel alanından elde edilen enerjiyi arttıracağı için santral için gerekli alandan tasarruf edilmesini sağlar.

Enerji, bir formdan başka bir forma dönüşürken enerji kayıpları oluşur. Enerji üretiminde enerji verimini belirleyen bu durumdur ve temel olarak verimin yükseltilmesi enerji kayıplarını azaltmakla mümkün olabilir. Öte yandan, rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi sistemin kendinden kaynaklı olan genel bir verim üst sınırı bulunabilir. Dolayısıyla böyle bir durumda, sistemde gerçekleştirilen iyileştirmelerle en fazla belirli bir limite kadar verim artışı sağlanabilir.

Enerji çevriminde kullanılan teknoloji şayet türbin ve jeneratör gibi çeşitli bileşenlerden oluşan bir enerji sistemiyse sistemin toplam verimi belirli parçaların verim değerlerine bağlı olup bu verim değerleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Buhar çevrimli termik enerji santrallerinde, yakıtta bulunan kimyasal enerji yanma işlemi sonucunda ısıl enerjiye dönüştürülmektedir. Bu ilk enerji formu değişimi aşamasında ısıl enerji kayıpları meydana gelir. Elde edilen ısıl enerjiyle buhar kazanında buhar üretilir ve ısıl enerji böylece kinetik ve potansiyel enerjiye çevrilir. Üretilen buhar kullanılarak bu defa türbinde mekanik enerjiye dönüşüm gerçekleştirilir. Bu durumda da termodinamik çevrim kaynaklı olarak enerji kayıpları oluşur. Son aşamada mekanik enerji, jeneratörde

elektrik enerjisine çevrilir ve manyetik enerji kaybı gibi çeşitli enerji kayıpları meydana gelir.

Gaz çevrimli enerji santrallerinde, yakıtın kimyasal enerjisi yanma odasında ısıl enerjiye çevrilerek elde edilen ısıl enerji sıcak hava elde etmek amacıyla kullanılır. Daha sonra, gaz türbininde mekanik enerji formuna çevrim gerçekleştirilir. Son adımda, jeneratör vasıtasıyla mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Gaz çevrimli santrallerde de her bir enerji formu dönüşümü aşamasında enerji kayıpları oluşur.

NESlerde ilk olarak nükleer reaktörlerde fisyon reaksiyonu gerçekleşmektedir. Bu aşamada, nükleer yakıt olarak kullanılan fisil maddeden açığa çıkan nükleer enerji ısıl enerjiye dönüşmektedir. Bu aşamadan sonra buhar çevrimli termik enerji santrallerine benzer biçimde nükleer reaksiyon sonucunda elde edilen ısıl enerjiden faydalanılarak buhar kazanında buhar elde edilir ve kinetik ve potansiyel enerjiye dönüşüm gerçekleştirilir. Kinetik ve potansiyel enerji türbinde mekanik enerjiye ve mekanik enerji de jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülür.

NESlerde, elektrik enerjisi elde edilmesindeki ilk aşama olan fisyon reaksiyonu sırasında kütleden enerjiye dönüşüm olmaktadır. Öte yandan, sonraki aşamalarda teknik olarak buhar çevrimli termik santrallere benzer biçimde bir enerji formundan başka bir enerji formuna dönüşüm gerçekleşmekte olup bu işlemler esnasında enerji kayıpları meydana gelmektedir.

Hidroelektrik santrallerde öncelikle suyun potansiyel enerjisi hidrolik türbinlerde mekanik enerjiye dönüştürülür. Suyun hidrolik türbinlere iletilmesi sırasında, potansiyel enerjisinde hidrolik enerji kayıpları meydana gelir. Türbinlerde mekanik enerjiye dönüşüm esnasında enerji kayıpları meydana gelir. Daha sonra, jeneratörlerde mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleştirilir ve bu aşamada da enerji kayıpları oluşur.

Rüzgâr enerjisi santrallerinde, sistemin enerji kaynağı rüzgâr akımıdır. Bir rüzgâr türbinine gelen rüzgâr akımı, türbinden ayrılırken enerjisini tamamen kaybetmemektedir. Sonuç itibariyle, rüzgâr akımından elde edilebilecek enerjinin, rüzgâr akımının kinetik enerjisine oranı teorik bir üst limit değerine sahiptir. Rüzgâr türbini kanatlarına gelen rüzgâr akımının kinetik enerjisi mekanik enerjiye daha sonrasında jeneratörde mekanik enerjiden elektrik

enerjisine dönüştürülür ve her iki dönüşüm aşamasında da enerji kayıpları meydana gelir.

Solar-PV santrallerde, santral sistemini oluşturan esas bileşenler PV panellerdir. Bir PV panel; teorik olarak belirli bir verim değerine sahiptir. Bu değer panelin sahip olduğu teknoloji ile ilgili olup farklı teknolojiler için farklı verim değerleri mevcut olabilmektedir. PV panellerde, PV etkisi olarak adlandırılan bir mekanizma sonucunda fotonların sahip olduğu enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm esnasında enerji kayıpları genel itibariyle spektrum, kara cisim ışıması ve rekombinasyon kayıpları neticesinde meydana gelmektedir.

Bu kriter için [72]'de yer alan solar-PV, rüzgâr, doğal gaz ve kömür için alt ve üst sınır değerlerinin ortalaması hesaplanarak bulunan değerler kullanılmıştır. Hidroelektrik için verim %90 değerinin üzerinde olacak şekilde verilmiş olup bu değer, bu tez çalışmasında %90 olarak alınmıştır. Nükleer enerji için verim değeri [73]'ten alınmıştır.

Kapasite faktörü kriteri

Teknik boyut kapsamında yer alan ikinci kriter olan kapasite faktörüne ait değerler [63]'ten alınmıştır. Bir enerji santrali için bu değer yıllık brüt elektrik çıktısının, net kapasitenin 8760 sayısıyla çarpılmasıyla elde edilen sonuca olan oranına eşittir.

Kapasite faktörü, diğer bir yaklaşımla, santralin bir yıl içerisinde gerçekleşen elektrik enerjisi üretiminin, santralin tüm yıl boyunca hiç durmadan çalışması halinde gerçekleşebilecek elektrik enerjisi çıktısına olan oranı olmaktadır.

Kapasite faktörü, aynı kurulu güç değerine sahip olmakla beraber farklı teknolojilere sahip olan santrallerin bir yıl içerisinde aynı miktarda enerji üretemeyebileceğini ifade etmektedir. Kapasite faktörü çeşitli teknik ve ekonomik koşullardan etkilenmektedir. Enerji santralinde meydana gelen arızalar ve bakım ve onarım işlemleri santralin tam kapasite ile çalışamamasına neden olabilir.

Enerji piyasası koşulları da bir enerji santraline ait kapasite faktörü üzerinde etkili olabilmektedir. Elektrik enerjisi talebinin belirli süreler zarfında yeterli seviyede olmaması santralin daha düşük kapasitelerde çalışmasına neden olmaktadır. Değişken özellikteki

yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışan enerji santralleri için kurulumun gerçekleştirildiği sahaya ait özellikler de kapasite faktörü değeri açısından önem arz etmektedir.

Kapasite faktörü değeri, santral kurulumuna karar verilmesi aşamasında yatırımın ekonomik getirisi açısından dikkate alınmaktadır. Yüksek kapasite faktörü daha fazla enerji üretimi anlamına geldiğinden, teorik olarak birim enerji üretimi için yatırım maliyetinin azalmasını sağlamaktadır.

Baz yük santralleri göreceli olarak genellikle daha yüksek kapasite faktörü değerlerine sahiptir. Öte yandan, sadece talep olması durumunda devreye giren puant yük santralleri ise daha düşük kapasite faktörü değerlerine sahiptir.

Göreceli olarak daha düşük kapasite faktörüne sahip olan diğer santraller güneş enerjisi santralleri ve rüzgâr enerjisi santralleridir. Güneş enerjisi santralleri yalnızca gün ışığında enerji üretebildiğinden süre olarak günün sadece yarısında çalışabilirler. Dolayısıyla kapasite faktörü için üst sınır değeri 0,5 olmaktadır. Bununla birlikte, güneş ışınlarının bulutlanma gibi sebeplerle kesintiye uğraması üretilen enerji miktarını düşürür. Öte yandan, santral eğer tasarım özelliği olarak güneş takip sistemine sahipse daha fazla enerji üretir.

Kapasite faktörü üzerinde etkili olabilen; belirli bir sahaya ait olan güneş enerjisinden faydalanma potansiyeli genel hatlarıyla öngörülebilmektedir. Öte yandan, sahanın mikro klima özellikleri de güneş enerjisinden faydalanma potansiyelini etkiyebilmektedir. Bu nedenle saha seçiminde, yerinde yapılan güneş enerjisi potansiyeli ölçümlerinden de faydalanılmaktadır.

Bir enerji kaynağı olan rüzgâr akımının değişken özellikte olması ve bu çerçevede özellikle rüzgâr hızı, rüzgâr enerjisi santrallerinin kapasite faktörü değerleri üzerinde etkili olmaktadır. Bununla birlikte, rüzgâr türbinlerine ait tasarım özellikleri de kapasite faktörünü etkilemektedir.

Göreceli olarak, daha düşük rüzgâr hızlarında enerji üretebilecek şekilde tasarlanmış olan türbinlerin kapasite faktörü daha yüksek olmaktadır. Rüzgâr hızı belirli bir konumda yüksekliğe bağlı olarak arttığından daha yüksek kuleye sahip olan bir türbin daha fazla

enerji üretme kapasitesine sahip olmaktadır. Bir diğer tasarım özelliği olan rüzgâr türbinine ait kanat uzunluğunun yüksek bir değerde seçilmesi süpürme alanını genişleterek enerji üretim miktarında artış sağlar. Türbülans koşullarının etkisini azaltma özelliğine sahip olan tasarımlar da enerji üretimi miktarında artış sağlamaktadır.

Santral kurulması planlanan sahada rüzgâr akımının mevcudiyeti yanında, belirli bir periyottaki rüzgâr hızı değerlerinin bilinmesi santralin projelendirilmesi ve uygulanabilirliği bakımından öngörü sağlamaktadır. Bu nedenle, enerji santrali için yatırım kararı alınmadan önce sahada uzun süreli rüzgâr kapasitesi ölçümleri yapılmaktadır. Rüzgâr hızı dağılımı, yatırımın planlandığı bölge için daha önceden belirlenmişse hız dağılımına ait parametre de bu amaçla kullanılabilmektedir. Bunlara ilaveten, sahada rüzgâr akımını etkileyebilecek fiziksel engellerin olmaması da daha yüksek kapasite faktörü için önemli olmaktadır.

Piyasa ekonomik koşulları çerçevesinde elektrik enerjisi birim fiyatı, fosil yakıtlı santrallerin kapasite faktörü değerleri üzerinde etkili olabilmektedir. Fosil yakıt kullanan bir santral, yakıt maliyeti sebebiyle elektrik enerjisi birim fiyatının düşük olduğu durumlarda çalışmayabilir. Dolayısıyla bu durum kapasite faktörü değerinde düşüşe neden olur.

Bu çalışmada doğal gaz, kömür, hidroelektrik ve rüzgâr teknolojilerinin her birine ait olan 2005, 2010, 2014, 2015 ve 2016 yıllarına ait değerlerin ortalaması hesaplanarak bu teknolojiler için kapasite faktörü değerleri bulunmuştur.

Solar-PV için sadece 2014, 2015 ve 2016 yıllarına ait veriler bulunmakta olup kapasite faktörü değeri bu üç yıla ait değerlerin ortalaması hesaplanarak bulunmuştur.

Veri setinde yanıcı yakıtlar için ortak bir kapasite faktörü kategorisi verilmiştir. Bu bakımdan doğal gaz ve kömür kapasite faktörleri bu kategoride karşılık gelen her bir yıla ait değere eşit olarak alınmıştır. Bu teknolojiler için Türkiye için verilmiş olan veriler kullanılmıştır.

NES için OECD Avrupa için verilmiş olan 2005, 2010, 2014, 2015 ve 2016 yıllarına ait değerlerin ortalaması hesaplanarak kapasite faktörü değeri bulunmuştur.

Sevk edilebilir üretim kriteri

Sevk edilebilirlik, bir enerji santralinin gerek duyulduğu herhangi bir zamanda devreye girme ve devreden çıkma kapasitesini ifade etmekte olup kömür, doğal gaz, NES ve barajlı hidroelektrik santral, sevk edilebilir özellikteki enerji santralleri olarak sınıflandırılabilir [74].

Elektrik arz ve talep dengesinin elektrik sistem operatörü tarafından sürekli olarak sağlanması gerekmektedir. Bu dengenin korunması elektrik enerjisinin son kullanıcıya kesintisiz olarak iletilebilmesi bakımından önemlidir.

Sevk edilebilir üretim özelliğine sahip olan enerji santralleri ve büyük ölçekli enerji depolama sistemleri arz ve talep dengesinin sürekli olarak sağlanması için fayda sağlamaktadır. Öte yandan, günümüzde enerji depolama sistemleri gelişme aşamasında olup yaygın değildirler. Dolayısıyla, kesintisiz enerjinin sağlanmasında esas olarak sevk edilebilir santraller önemli bir role sahiptir.

Güç kalitesi elektrik şebekelerinin ve tüketicilere ait olan elektrik enerjisi kullanan çeşitli cihazların verimli bir biçimde fonksiyonlarını yerine getirmelerini temin eden özellikleri kapsayan bir kavramdır. Elektrik şebekesi frekansı bu özelliklerden bir tanesidir. Elektrik şebekelerinde, değişken yenilenebilir enerji üretimi ve değişken yük olguları nedeniyle frekans dalgalanmaları oluşabilmekte olup elektrik güç kalitesi bu durumdan olumsuz yönde etkilenmektedir.

Gün içinde, elektrik şebekesi frekansında meydana gelen dalgalanmaların değerlendirilerek en kısa sürede şebeke frekansın regüle edilmesi ve stabil bir duruma getirilmesi güç kalitesinin korunması bakımından gerekli olmaktadır. Bu çerçevede, sevk edilebilir özellikteki enerji santralleri frekans regülasyonunun sağlanmasında kullanılabilmektedir.

Ekonomik sevk edilebilirlik enerji piyasalarında elektrik enerjisi fiyatının belirlenmesinde kullanılan uygulanmasında santrallerin sevk edilebilir üretim özelliğinden faydalanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, elektrik enerjisi birim fiyatının sürekli olarak mümkün olan en düşük seviyede tutulması hedeflenir. Böylece, son kullanıcıya en uygun fiyatla elektrik enerjisi sağlanmış olur.

Ekonomik sevk edilebilirlik yaklaşımında enerji karmasında yer alan kömür, doğal gaz ve nükleer gibi farklı teknolojilere sahip olan santrallerin elektrik enerjisi fiyatları karşılaştırılarak en düşük fiyata sahip olan ilk sırada ve en yüksek fiyata sahip olan son sırada olacak şekilde tercih sıralaması oluşturulur. Elektrik şebekesinde, enerji talebinin karşılanması için bu öncelik sıralaması dikkate alınır.

Bir enerji üretim santralinin esnekliği arz ve talep dengesinin verimli bir biçimde sağlanması için önem arz etmektedir. Elektrik enerjisi santralleri belirli bir periyottaki değişkenlik gösteren enerji talebinin karşılanmasında sahip oldukları fonksiyonları açısından baz yük santralleri, puant yük santralleri ve yük takip eden santraller olarak sınıflandırılmaktadır. Belirtilen kategorilerde yer alan santraller için sevk edilebilir üretim özelliği avantaj sağlamaktadır.

Elektrik enerjisi santrallerinin sevk edilebilir üretim için ihtiyaç duyduğu süreler, santrallerin türüne göre farklılık göstermektedir. Elektrik enerjisi santralinin esnekliği ile ilgili faktörler olan santralin başlatılması için gereken süre ve santralin belirli güç çıkışı değerlerine ulaşması için ihtiyaç duyulan süreler santralin baz yük santrali veya puant yük santrali veya yük takip eden santral olarak değerlendirilmesi için temel teşkil etmektedir.

Baz yük bir elektrik enerjisi arz sisteminde, belirli bir süre boyunca süreklilik gösterecek şekilde sağlanması gerekli olan minimum seviyedeki güç değeri olarak tanımlanmaktadır. Bir baz yük santralinin; göreceli olarak daha uzun başlatma süresine sahip olmasının yanı sıra belirli güç değerlerine ulaşması için gerekli sürelerin de daha uzun olması karakteristik özellikleri olmaktadır.

Elektrik enerjisi talebi günlük, aylık, mevsimsel ve yıllık periyotlarda dalgalanmalar gösterir. Puant yük, elektrik şebekesinde belirli bir periyottaki maksimum talebe karşılık gelen güç değeri olmaktadır. İklim koşulları ve coğrafi konum gibi faktörler puant yükün oluşum zamanları üzerinde etkili olabilmektedir.

Günlük periyot ele alınacak olursa gün içindeki puant yük genel olarak akşam saatlerinde oluşmaktadır. Akşam saatlerinde; aydınlatma gereksiniminin olması ve elektrikli ev aletlerinin yoğun bir biçimde kullanılması gibi faktörlere bağlı olarak özellikle evsel elektrik enerjisi tüketimi gündüz saatlerine kıyasla artış göstermektedir.

Puant yük santralleri, puant yük talebinin karşılanmasında kullanılan, göreceli olarak daha kısa başlatma süresine ve belirli bir güç değerine ulaşmak için daha az süreye ihtiyaç duyan santrallerdir. Genellikle, gaz türbinli santrallerin puant yük santralleri olarak kullanımı tercih edilmektedir.

Yük takip eden santraller, gün içinde elektrik enerjisi talebinin değişimine göre güç çıktısını ayarlayabilen santraller olarak tanımlanmaktadır. Baz yük ve puant yük arasında yer alan orta seviyedeki yüklerin karşılanmasında bu santraller tercih edilmektedir. Bu kategorideki santraller, genel olarak enerji talebinin yükselmeye başladığı sabah saatlerinden talebin azalmaya başladığı gece saatlerine kadar çalışmaktadırlar.

Rüzgâr enerjisi santralleri ve güneş enerjisi santralleri sevk edilebilir üretim özelliğine sahip değildir. Bunun başlıca nedeni, bu santrallerde kullanılan enerji kaynaklarının kesintili ve değişken yapıda olmasıdır. Dolayısıyla, bu santrallerin enerji üretebilmesi doğa koşullarına bağlı olup enerji kaynağının mevcut olduğu zaman aralıklarında mümkün olabilmektedir. Bu bakımdan, bu sistemler talebe göre enerji üretmekten ziyade enerji kaynağının mevcut olup olmamasına göre enerji üretmektedirler.

Sevk edilebilir üretim özelliğine sahip olan santrallerin enerji arz sistemi içinde yer alması, kesintili ve değişken enerji üretimi özelliğine sahip olan yenilenebilir enerji santrallerinin güç çıktılarının dengelenmesinde de fayda sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji santralleri enerji kaynağının yetersiz olduğu durumlarda enerji üretmelerine rağmen üretilen enerji miktarı talebi karşılamayabilir. Bir diğer durum ise bu santrallerde, olumsuz hava koşulları nedeniyle rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi enerji üretiminin tamamen durmasıdır. Rüzgâr türbinleri tasarım özelliği olarak belirli bir güvenli rüzgâr hızı değerine kadar çalışmayı sürdürmektedir. Rüzgâr hızının bu değeri aşması durumunda türbinler çalışmayı durdurmaktadır.

Bu tez çalışmasında her senaryo için sevk edilebilir enerji üretimi değeri literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda [32, 74, 75] olduğu gibi daha önce belirtilen sevk edilebilir enerji üretimi teknolojilerinin toplam kurulu gücünün elektrik enerjisi karması içindeki payı hesaplanarak bulunmuştur. Her bir senaryo için hidroelektrik santral payının belirli bir yüzdelik değeri baraj tipi hidroelektrik santral olarak kabul edilmiştir. Bu yüzdelik değer, Türkiye'deki yakın geçmişteki baraj tipi hidroelektrik santrallerin toplam kurulu gücünün,

toplam hidroelektrik santral kurulu gücü içindeki yüzdelik oranı hesaplanarak bulunmuştur [5].

Sosyal boyut kriterleri

Sosyal boyut bakımından sürdürülebilirlik insanların genel refah seviyesine odaklanan bir yaklaşım olmaktadır. Dolayısıyla bu yaklaşım eğitim, ekonomik rahatlık, yoksulluğun azaltılması, istihdam, mutluluk ve sağlık gibi insan refahını ilgilendiren konuları ele almaktadır.

Sürdürülebilirliğin sosyal boyutu çerçevesinde bu çalışmada doğrudan istihdam ve alan kullanımı olmak üzere iki adet kriter seçilmiştir.

Doğrudan istihdam kriteri

İstihdam, ekonomik büyüme ve nüfus artışı birbirleriyle ilgili kavramlardır. Genel itibariyle, bir ülkede ekonomik büyümenin gerçekleşmesi istihdam olanaklarında artış sağlamaktadır. Böylece, nüfus artışı sonucunda hâlihazırdaki iş gücüne katılan nüfus için ihtiyaç duyulan istihdam potansiyeli oluşturulmuş olmaktadır.

İstihdamda meydana gelen artış, üretimin artması ve ayrıca sayısı yükselen çalışanların gelirlerini kullanarak, üretilen çeşitli ürünleri satın alması sonucunda ekonomik büyümeyi olumlu yönde etkilemektedir.

Bir enerji santrali yaşam döngüsü süresince çeşitli istihdam olanakları sağlamaktadır. Enerji santrali kurulumu sonucunda doğrudan istihdam, dolaylı istihdam ve uyarılmış istihdam olmak üzere üç farklı kategoride yer alan iş olanakları ortaya çıkmaktadır.

Doğrudan istihdam kategorisi, enerji santralinin kurulması ve işletilmesi gibi santralin kendi bünyesinde yer alan istihdam olanaklarını kapsamaktadır.

Dolaylı istihdam olanakları santralin kurulmasında ve işletilmesinde gerek duyulan ara ürünlerin üretimi gibi doğrudan santral faaliyetleri arasında yer almayan işleri içermektedir. Bu bakımdan, dolaylı istihdam kategorisi enerji santralinin kurulumu için

gerekli olan destekleyici işleri kapsamaktadır.

Uyarılmış istihdam kategorisinde doğrudan veya dolaylı olarak istihdam edilen çalışanların gerçekleştirdiği tüketim ürünlerinin satın alınması gibi ekonomik faaliyetler sonucunda ilgili sektörde oluşan istihdam olanakları yer almaktadır.

Bu çalışmada, doğrudan istihdam değerleri enerji santralleri için inşaat, kurulum, imalat, işletme ve bakım, işletmeden çıkarma ve yakıt tedariki aşamalarını global bazda bir analiz temelinde dikkate alan [76]'dan alınmıştır. Doğal gaz, nükleer ve solar-PV için ortalama değerler hesaplanmış ve hesaplanan değerler kullanılmıştır.

Kömür için kömür ve linyite ait olan ortalama değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Rüzgâr için karasal rüzgâr enerjisi santrali ortalama değeri ve deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali ortalama değerinin ortalaması kullanılmıştır.

Hidroelektrik için büyük hidroelektrik santral ortalama değeri ve mini hidroelektrik santrali ortalama değerinin ortalaması kullanılmıştır.

Alan kullanımı kriteri

Yeryüzündeki arazilerin sürdürülebilir bir biçimde kullanımı günümüzde önemi artmakta olan bir konu olmaktadır. Sürdürülebilir arazi kullanımı yaklaşımı gerek doğal çevre ve gerekse yapılı çevre için sürdürülebilirlik konusunu kapsamaktadır.

Araziler yeryüzünde doğal yaşam döngüsünün gerçekleşmesinde birçok fonksiyona sahiptir. Enerji kaynaklarının da içinde bulunduğu çeşitli ham maddeler için araziler depo işlevi görmektedir. Arazilerde, canlılar için gerekli olan çeşitli besin kaynakları yetişmektedir. Bunlara ilaveten, araziler farklı habitatları bir arada bulundurmaları bakımından biyoçeşitliliğin oluşmasına katkı sağlamaktadır.

İnsanlar, hayvanlar ve bitkilerin yaşamlarını sürdürebilmeleri için özellikle yapılı çevre planlaması kapsamında, arazilerin kullanım amaçlarının sürdürülebilirlik yaklaşımı çerçevesinde belirlenmesi gerekmektedir.

Arazi kullanımı endüstriyel, ticari, tarımsal, rekreasyonel, ulaşım veya ikamet amaçlı olabilmektedir. Endüstriyel amaçlı arazi kullanımı kategorisinde yer alan bazı örnekler enerji üretim santralleri ve fabrikalara ait yapıların inşa edildiği sahalardır. İşletmeler, alışveriş merkezleri ve restoranlar gibi binaların bulunduğu sahalar ticari amaçlı arazi kullanımı kategorisinde yer almaktadır. Tarımsal amaçlı arazi kullanımı kategorisi tarım ve hayvancılık için kullanılan arazileri kapsamaktadır.

Rekreasyonel amaçlı arazi kullanımı kategorisine ait bazı örnekler parklar, yüzme havuzları ve spor sahaları olmaktadır. Ulaşım amaçlı arazi kullanımı kategorisi için havaalanları, tren yolları, metro istasyonları ve park yerleri örnek olarak verilebilir. Müstakil konut, apartman ve otel gibi yapıların inşa edildiği araziler ikamet amaçlı arazi kullanımı kapsamında yer almaktadır.

Arazi bozulumu doğal olaylar veya insan kaynaklı etkenler neticesinde, arazinin biyolojik veya ekonomik üretim kapasitesinin olumsuz bir biçimde etkilenmesidir. Arazi bozulumu sosyal boyut bakımından etkilere sahiptir.

Arazi bozulumuna bağlı olarak tarımsal üretimin azalması tarım sektörü çalışanlarının gelirinin azalmasına neden olarak çalışanların yeterli gelir elde etme imkânı olan diğer sektörlere yönelmeleri sonucunu doğurabilmektedir. Bu durum ise sosyal bir etki olarak iş olanaklarının daha fazla olması sebebiyle şehirlerde ikamet edilmesinin tercih edilmesine neden olabilmektedir. Öte yandan, söz konusu çalışanların istihdam imkânı bulamamaları neticesinde istihdam miktarında azalma meydana gelmesi de diğer bir olası durum olmaktadır.

Arazi bozulumunun diğer bir sosyal boyut olan sağlık üzerinde de etkileri mevcuttur. Bu etkilerden bazıları tarımsal üretimdeki verimsizlik nedeniyle azalan gıda üretimi ve düşen su kalitesi neticesinde hastalıklar ve beslenme yetersizliği problemlerinin ortaya çıkmasıdır.

Arazi bozulumu ekonomik ve çevresel etkilere sahiptir ve bu etkiler dolaylı olarak sosyal sürdürülebilirliği de etkilemektedir.

Bir enerji santralinin kurulumu için gerekli alan bir sosyal boyut kriteri olarak

sınıflandırılabilir [77]. Enerji santralleri santralin türüne göre çeşitli sosyal etkiler oluşturabilirler.

Enerji santralleri kuruldukları araziyi çeşitli biçimlerde etkilemektedirler. Enerji santrallerinin daha önce kullanılmamış bir arazi üzerinde inşa edilmeleri halinde arazinin temizlenmesi işlemine ihtiyaç duyulabilir. Bu durum ise doğal çevreye ait flora, fauna ve bunları içeren ekosistemlerin de etkilenmesi anlamına gelebilmektedir.

Kömür ve doğal gaz enerji santrallerinin ve NESlerin kurulduğu alanlar kirleticilerin neden olduğu çevresel etkilerden dolayı kahverengi alanlara dönüşebilmektedir. Bununla birlikte bu santrallerde kullanılan soğutma suyunun deşarj edilmesi işlemi doğayı etkileyen diğer bir faktördür.

Solar-PV santrallerde, panellerin temizlenmesi amacıyla arazideki su kaynaklarının ve ayrıca kimyasal temizlik malzemelerinin kullanılması ekosistemleri olumsuz yönde etkiyebilmektedir. Santrali oluşturan PV paneller ışık kirliliğine yol açabilmekte olup bu ise doğal hayatı ve insan sağlığını etkilemektedir. Solar-PV enerji santralleri ayrıca görüntü kirliliğine de neden olabilmektedir.

Barajlı hidroelektrik santraller su depolanması için geniş alanlara ihtiyaç duyabilir. Bu durumda, tarım ve hayvancılık gibi farklı bir ekonomik amaçla kullanılan çeşitli alanlar depolama alanı içinde kalabilirler ve dolayısıyla kullanılamazlar.

Rüzgâr enerjisi santralleri görsel ve estetik açılardan kaygılara yol açabilir. Rüzgâr enerjisi santrallerinin insanların yerleşim alanlarının yakınında kurulmaları halinde gürültü ve titreşim etkilerine bağlı olarak bu santraller çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilirler.

Bu çalışmada tüm güç üretim teknolojileri için değerler alan kullanımını sosyal bir kriter olarak değerlendiren [73]'ten alınmıştır.

4.2.3. TOPSIS yöntemiyle değerlendirme

Çalışmada seçilen kömür, doğal gaz, nükleer, hidroelektrik, rüzgâr ve solar-PV teknolojileri için kullanılan tüm kriterlere ait değerler Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. TOPSIS yöntemiyle değerlendirmede kullanılan kriterlere ait değerler [5, 28, 63, 67, 69-73, 76]

Enerji üretim teknolojisi	Çevresel		Ekonomik			Teknik			Sosyal	
	CO_2-eş emisyonu (g/kWh)	NO_x emisyonu (kg/MWh)	Yatırım maliyeti ($/kW)	Yakıt, işletme ve bakım maliyeti ($/MWh)	Santral ömrü (yıl)	Verim (%)	Kapasite faktörü (%)	Sevk edilebilir üretim (%) (Senaryo bazında hesaplanmıştır)	Doğrudan istihdam (iş-yıl/GWh)	Alan kullanımı (km^2/kW)
Kömür	1094	1,525	2000	45	40	38,5	52,04	Senaryo-(A) ≈ 75,52 Senaryo-(B) ≈ 84,42 Senaryo-(C) ≈ 77,1 Senaryo-(D) ≈ 51,97	0,6985	0,4
Doğal gaz	499	2	1000	55	30	49	52,04		0,3691	0,04
Nükleer	19	0,025	6600	35	60	33	80,52		0,2693	0,01
Hidroelektrik	5,53	0,032	4309,5	107,74	80	90	30,08		0,5445	0,13
Rüzgâr	7,3	0,065	3040	27,5	25	39	28,88		0,611	0,79
Solar-PV	101,5	0,275	1300	20	25	13	9,37		1,1277	0,12

TOPSIS yöntemiyle yapılan değerlendirme sonucunda dört farklı elektrik enerjisi karması senaryosu içinden en yüksek puanı Senaryo-(C) almıştır. Senaryolarda yer alan yenilenebilir enerji santralleri ile ilgili enerji kaynakları olan hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi doğada belirli kaynak potansiyeli değerlerine sahiptir. Bu bakımdan, senaryolarda yer alan yenilenebilir enerji santralleri için gerekli olan enerji kaynağı değerlerinin ilgili kaynak potansiyeli değerlerinden fazla olmaması gerekmektedir.

Türkiye'nin hidroelektrik kaynak potansiyeli 160 TWh/yıl, rüzgâr enerjisi kaynak potansiyeli 48000 MW ve güneş enerjisi kaynak potansiyeli ise 1500 kWh/m^2-yıl değerlerine sahiptir [78]. Bu değerler dikkate alınarak kontrol edilmesi amacıyla en yüksek puana sahip olan Senaryo-(C) için gerekli olan enerji kaynağı değerleri hesaplanmıştır.

Senaryo-(C) için hesaplanan gerekli hidroelektrik enerji kaynak potansiyeli ≈ 54 TWh/yıl olup bu değer üst limitin altında olan bir değer olmaktadır.

Rüzgâr enerjisi için hesaplanmış olan, ihtiyaç duyulan kaynak potansiyeli ≈ 8897 MW olup bu değer de ilgili üst limit değerini aşmamaktadır.

Solar-PV için bu çalışmada kullanılan verim değeri de dikkate alınarak hesaplama gerçekleştirilmiştir. Buna göre 0,13 verim değeri alınarak yapılan hesaplamaya göre ≈ 46,17 km^2 genişliğinde bir alan gerekmekte olup bulunan bu değerin uygun bir değer olduğu görülmüştür.

Duyarlılık analizi kapsamında dört farklı durum incelenmiştir. Her bir durum için çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal olmak üzere dört kategoriden farklı bir tanesi için ağırlık

değeri olarak 0,7 atanmış olup diğer üç kategoriye eşit olacak biçimde, ağırlık değeri olarak 0,1 atanmıştır.

Her bir ağırlık seti için kategorilere ait olan ağırlık değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelge 4.11'de her bir ağırlık seti için TOPSIS yöntemi kullanılarak yapılan değerlendirmelere ait sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 4.10. Asli ağırlık seti ve duyarlılık analizi için ağırlık setleri

Kategoriler	Ağırlık seti-(1)	Ağırlık seti-(2)	Ağırlık seti-(3)	Ağırlık seti-(4)	Ağırlık seti-(5)
Çevresel	0,25	0,7	0,1	0,1	0,1
Ekonomik	0,25	0,1	0,7	0,1	0,1
Teknik	0,25	0,1	0,1	0,7	0,1
Sosyal	0,25	0,1	0,1	0,1	0,7

Çizelge 4.11. Ağırlık setlerine göre senaryoların yakınlık katsayı değerleri ve sıralamaları

Elektrik enerjisi karması senaryoları	Ağırlık seti-(1)		Ağırlık seti-(2)		Ağırlık seti-(3)		Ağırlık seti-(4)		Ağırlık seti-(5)	
	C_{i*}	Sıralama	C_{i*}	Sıralama	C_{i*}	Sıralama	C_{i*}	Sıralama	C_{i*}	Sıralama
Senaryo-(A)	0,4886	3	0,4241	3	0,4888	3	0,6431	3	0,4796	3
Senaryo-(B)	0,3907	4	0,0871	4	0,6027	1	0,7428	1	0,4561	4
Senaryo-(C)	0,6793	1	0,8347	2	0,446	4	0,7395	2	0,4909	2
Senaryo-(D)	0,614	2	0,9121	1	0,5772	2	0,237	4	0,5475	1

4.3. Önerilen Yaklaşımın Mevcut Çalışmalarla Karşılaştırılması

Literatürdeki çalışmalar çoğunlukla elektrik üretim teknolojilerinin tekil olarak sıralanması üzerine odaklanmıştır. Çizelge 4.12'de yer alan karşılaştırmada görüldüğü üzere hidroelektrik üç çalışmada birinci sırada yer alırken diğer iki çalışmada ikinci ve beşinci sırada yer almaktadır. Rüzgâr bir çalışmada birinci sırada, üç çalışmada ikinci sırada ve bir çalışmada dördüncü sırada yer almıştır. Nükleer üç çalışmada yer almakta olup bu çalışmalarda birinci, üçüncü ve dördüncü sırada yer almıştır. Doğal gaz dört çalışmada değerlendirilmiş olup bir çalışmada ikinci sırada, iki çalışmada üçüncü sırada ve bir çalışmada ise dördüncü sırada yer almıştır. Kömür seçeneği dört çalışmada yer almaktadır ve bu çalışmalarda dördüncü, beşinci, altıncı ve tekrar altıncı sırada yer almıştır. Solar seçeneği üç çalışmada değerlendirilmiş olup bu çalışmalarda üçüncü, beşinci ve dokuzuncu sırada yer almıştır. Bu sonuçlar solar haricinde yenilenebilir enerjilerin, hidroelektrik ve rüzgârın en tercih edilebilir enerji üretim teknolojileri olduğunu göstermektedir. Hidroelektrik ve rüzgârı nükleer opsiyonu takip etmektedir. Fosil yakıtlar olan kömür,

linyit ve doğal gaz nükleer opsiyonundan sonra gelmektedir. Elektrik üretim teknolojilerinin tekil olarak değerlendirilmesi en uygun teknolojinin belirlenmesi için faydalı olsa da bu yaklaşım belirli bir teknolojinin elektrik enerjisi karması içindeki oranı hakkında bilgi vermemektedir.

Bu çalışmada Senaryo-(C)'nin Türkiye'nin yakın geçmişteki elektrik enerjisi karmasına benzerlik taşıyan Senaryo-(A) ile karşılaştırılmasına göre kömür ve doğal gaz oranları sırasıyla %5 ve %6 daha az olmaktadır (Bkz. Çizelge 4.7). Dolayısıyla her iki teknolojinin Çizelge 4.12'de verilmiş olan literatürdeki çalışmalara ait sıralamaları dikkate alındığında, Senaryo-(C)'ye ait olan azaltılmış değerler uygun olarak kabul edilebilir. Nükleer opsiyonu Senaryo-(A)'ya kıyasla Senaryo-(C)'de %18 daha fazla olmaktadır. Çizelge 4.12'de görüldüğü üzere literatürdeki çalışmalara göre nükleer opsiyonu tercih edilen bir opsiyon olup elektrik enerjisi karmasındaki yükseltilmiş nükleer oranı uygun olmaktadır. Senaryo-(C) ve Senaryo-(A) karşılaştırıldığında, hidroelektrik ve rüzgâr yüzdelik değerleri sırasıyla %6 ve %1 daha az olmaktadır. Solar-PV yüzdesi değişmemektedir. Bu değerler Çizelge 4.12'de verilmiş olan literatürde yer alan çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu değildir çünkü bu çalışmalarda tercih edilmiş olan opsiyonlar hidroelektrik ve rüzgâr olmaktadır. Çizelge 4.12'de verilen çalışmalara göre solar tercih edilen bir opsiyon olmamaktadır. Senaryo-(C)'deki solar-PV yüzdesi Senaryo-(A) ile aynı olsa da, bu değer elektrik enerjisi karmasındaki en düşük değer olan %2 olmaktadır. Bu bakımdan, bu değerin değinilen çalışmaların sonuçlarıyla aynı doğrultuda olduğu kabul edilebilir.

Çizelge 4.12. Önerilen yaklaşımın literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılması

Teknoloji	[23]	[25]	[26]	[27]	[29]	Önerilen yaklaşım, Senaryo-(C)
Kömür	5 (fosil yakıtlar)	4 (fosil yakıtlar)	Mevcut değil	6 (kömür/linyit)	6 (kömür/linyit)	Elektrik üretim payları (Kömür= %30, Doğal gaz= %24, Nükleer= %27, Hidroelektrik= %12, Rüzgâr= %5, Solar-PV= %2)
Doğal gaz	4	3	Mevcut değil	2	3	
Nükleer	3	Mevcut değil	Mevcut değil	1	4	
Hidroelektrik	1	1	2	5	1	
Rüzgâr	2	2	1	4	2	
Solar	5	Mevcut değil	3	Mevcut değil	9	
Jeotermal	Mevcut değil	5	4	3	8	
Biyokütle	Mevcut değil	Mevcut değil	5	Mevcut değil	5	
Akaryakıt	Mevcut değil	Mevcut değil	Mevcut değil	Mevcut değil	7	

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji alanındaki bilimsel araştırmalar açısından sürdürülebilirlik tüm enerji sistemini ilgilendiren ve dolayısıyla enerji arzı konusunu da kapsayan bir kavramdır. Bu tez çalışması esas olarak enerji arzının vazgeçilmez bir parçası olan elektrik enerjisi üretimi üzerine odaklanmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin 2030 yılındaki elektrik enerjisi karmasının sürdürülebilirliğini verimli bir biçimde değerlendirmek amacıyla elektrik enerjisi talep tahmini ve ÇKKV yöntemlerini esas alan bir yaklaşım önerilmiştir. Türkiye'nin 2030 yılındaki elektrik enerjisi talebinin tahmini YSA ve GPRM yöntemlerinden oluşan bir yöntem kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilmiş olan YSA modeli, bağımlı değişken olan elektrik enerjisi talebine ait değeri, her birinin gelecekteki değerleri bir GPRM modeliyle ayrı ayrı tahmin edilen nüfus, GSYH, ithalat, ihracat ve SÜE bağımsız değişkenleri temelinde tahmin etmektedir. Bağımsız değişkenlerin tahmin edilen değerlerinden oluşturulan veri seti elektrik enerjisi talebine ait değeri tahmin etmek amacıyla YSA modelinde kullanılmıştır.

Türkiye için 2030 yılına ait dört farklı elektrik enerjisi karması senaryosu oluşturulmuş olup elektrik enerjisi talep tahmininin gerçekleştirilmesi bu senaryolarda, seçilmiş olan enerji üretim teknolojilerinin oranlarının belirlenmesi için temel teşkil etmiştir.

Senaryoların sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi 10 adet kritere göre TOPSIS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kriterler çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal kategorilerinde yer almaktadır. Bu kategorilere eşit ağırlık değerleri atanmıştır.

Tez çalışmasında elde edilen bulgulara göre çıkarılan sonuçlar şu şekilde olmaktadır. Önerilen ÇKA YSA modeline ait performans sonuçları (Bkz. Çizelge 4.2) modelin Türkiye'nin uzun dönemdeki elektrik enerjisi talebini isabetli olarak tahmin edebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu model her bir bağımsız değişkene ait tahmin edilen değerlerden oluşturulan veri setine ihtiyaç duymaktadır. Bu çerçevede, özellikle ekonomik faktörler uzun dönemde belirsizliklere sahiptir.

GPRM modeline ait tahmin performansı sonuçlarına göre (Bkz. Çizelge 4.3) nüfus, GSYH ve SÜE için MAPE değerleri %10 değerinden daha düşük değerlere sahipken ithalat ve ihracat için MAPE değerleri %10-%20 aralığında olmaktadır. MAPE değeri, %10 değerinin altındaysa yüksek derecede isabetli tahmin olarak değerlendirilirken %10-%20 aralığında bulunuyorsa iyi seviyede bir tahmin olarak yorumlanmaktadır [79].

GPRM modelinin genel performansı dikkate alındığında bağımsız değişkenlere ait tahmin edilen değerlerden oluşturulan veri setleri YSA modelinde kullanım açısından uygun olmaktadır. Dolayısıyla GPRM, ekonomik faktörlerle ilgili olan önemli seviyedeki belirsizliğin üstesinden gelinmesi bakımından uygulanabilir bir yöntem olmaktadır.

Elektrik enerjisi karması senaryolarının TOPSIS yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda en sürdürülebilir olan senaryonun Senaryo-(C) olduğu bulunmuştur. Senaryo-(C)'yi ikinci sırada Senaryo-(D), üçüncü sırada Senaryo-(A) ve dördüncü sırada Senaryo-(B) takip etmektedir (Bkz. Çizelge 4.11).

Sırasıyla çevresel, ekonomik, teknik ve sosyal kategorilerine göreceli olarak daha fazla önem belirten bir ağırlık değeri atandığında (Bkz. Çizelge 4.10), birinci sırada yer alan senaryolar Senaryo-(D), Senaryo-(B), Senaryo-(B) ve Senaryo-(D) olmaktadır (Bkz. Çizelge 4.11). Bu bulgu, önem derecesini belirten ağırlık değerlerinin değiştirilmesinin senaryoların sıralamasını önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşım kapsamında elektrik enerjisi talebinin tahmin edilmesi, belirli bir elektrik enerjisi karması senaryosundaki yenilenebilir enerji teknolojilerine ait oranların, kaynak potansiyeli değerleriyle karşılaştırılmasına ve ayrıca Türkiye'nin yakın geçmişteki enerji üretim karması yapısının dikkate alınabilmesine imkân sağlaması bakımından elektrik enerjisi karmalarının oluşturulmasında elektrik üretim teknolojilerine ait oransal değerlerin daha gerçekçi bir biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşım elektrik enerjisi talebi tahmin işlemi için iki farklı yöntemden oluşan bir yöntem kombinasyonunu önermesi ve söz konusu tahmin işlemini ÇKKV işlemine entegre etmesi açısından enerji sürdürülebilirliği alanındaki mevcut bilimsel araştırmalara katkı sağlamaktadır.

Türkiye'de yakın geçmişteki elektrik tüketiminde mesken kategorisi ikinci sırada yer almaktadır [59], (Bkz. Çizelge 4.1). Bu kategori, gelecekte yapılacak elektrik enerjisi talep tahmini çalışmaları çerçevesinde bağımsız değişken seçiminde değerlendirilebilir. Gelecekteki çalışmalarda elektrik enerjisi talep tahmini için farklı yöntemler veya bunların kombinasyonları ve uzun dönemde farklı bir yıl için elektrik enerjisi karması değerlendirmesi için çeşitli ÇKKV yöntemleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Çunkaş, M. and Altun, A. A. (2010). Long Term Electricity Demand Forecasting in Turkey Using Artificial Neural Networks. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5(3), 279-289.

2. Kavaklioglu, K., Ceylan, H., Ozturk, H. K. and Canyurt, O. E. (2009). Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using Artificial Neural Networks. *Energy Conversion and Management*, 50(11), 2719-2727.

3. Cretì, A. and Fontini, F. (2019). *Economics of Electricity: Markets, Competition and Rules* (First edition). Cambridge: Cambridge University Press, 44.

4. İnternet: The Distribution of Turkey's Gross Electricity Generation by Energy Resources in 2018 URL: http://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2019-10/38ing.docx, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

5. İnternet: The Distribution of Turkey's Installed Capacity by Primary Energy Resources in 2018 (MW) URL: http://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2019-10/3ing.docx, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

6. İnternet: Country Nuclear Power Profiles URL: https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Turkey/Turkey.htm, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

7. Kaytez, F., Taplamacioglu, M. C., Cam, E. and Hardalac, F. (2015). Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 431-438.

8. Hsu, C. and Chen, C. (2003). Regional load forecasting in Taiwan—applications of artificial neural networks. *Energy Conversion and Management*, 44(12), 1941-1949.

9. Tso, G. and Yau, K. (2007). Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks. *Energy*, 32(9), 1761-1768.

10. Sözen, A., Arcaklioğlu, E. and Özkaymak, M. (2005). Turkey's net energy consumption. *Applied Energy*, 81(2), 209-221.

11. Sözen, A., Akçayol, M. A. and Arcaklioğlu, E. (2006). Forecasting Net Energy Consumption Using Artificial Neural Network. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(2), 147-155.

12. Sözen, A. and Arcaklioglu, E. (2007). Prediction of net energy consumption based on economic indicators (GNP and GDP) in Turkey. *Energy Policy*, 35(10), 4981-4992.

13. Sözen, A., Arcaklioglu, E. and Tekiner, Z. (2009). Estimation of Net Energy Consumption in Turkey Using Different Indicators. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 4(3), 261-277.

14. Sözen, A. and Arcaklioğlu, E. (2007). Prospects for Future Projections of the Basic Energy Sources in Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2(2), 183-201.

15. Kankal, M., Akpınar, A., Kömürcü, M. İ. and Özşahin, T. Ş. (2011). Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables. *Applied Energy*, 88(5), 1927-1939.

16. Uzlu, E., Kankal, M., Akpınar, A. and Dede, T. (2014). Estimates of energy consumption in Turkey using neural networks with the teaching–learning-based optimization algorithm. *Energy*, 75, 295-303.

17. Geem, Z. W. and Roper, W. E. (2009). Energy demand estimation of South Korea using artificial neural network. *Energy Policy*, 37(10), 4049-4054.

18. Akay, D. and Atak, M. (2007). Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey. *Energy*, 32(9), 1670-1675.

19. Boran, F. E. (2015). Forecasting Natural Gas Consumption in Turkey Using Grey Prediction. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 10(2), 208-213.

20. Li, G., Yamaguchi, D., Lin, H. and Nagai, M. (2006, 7-9 June). *The Simulation Modeling About The Developments of GDP, Population and Primary Energy Consumption in China Based on MATLAB*. 2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Bangkok, 1-6.

21. Pao, H., Fu, H. and Tseng, C. (2012). Forecasting of CO_2 emissions, energy consumption and economic growth in China using an improved grey model. *Energy*, 40(1), 400-409.

22. Wang, C. and Hsu, L. (2008). Using genetic algorithms grey theory to forecast high technology industrial output. *Applied Mathematics and Computation*, 195(1), 256-263.

23. Boran, F. E., Boran, K. and Dizdar, E. (2012). A Fuzzy Multi Criteria Decision Making to Evaluate Energy Policy Based on an Information Axiom: A Case Study in Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(3), 230-240.

24. Boran, F. E., Dizdar, E., Toktas, I., Boran, K., Eldem, C. and Asal, Ö. (2013). A Multidimensional Analysis of Electricity Generation Options with Different Scenarios in Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 8(1), 44-55.

25. Boran, K. (2017). An evaluation of power plants in Turkey: Fuzzy TOPSIS method. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(2), 119-125.

26. Boran, F. E. (2018). A new approach for evaluation of renewable energy resources: A case of Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 13(3), 196-204.

27. Atmaca, E. and Basar, H. B. (2012). Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP). *Energy*, 44(1), 555-563.

28. Atilgan, B. and Azapagic, A. (2016). An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. *Energy Policy*, 93, 168-186.

29. Kuleli Pak, B., Albayrak, Y. E. and Erensal, Y. C. (2017). Evaluation of sources for the sustainability of energy supply in Turkey. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(2), 627-637.

30. Shen, Y., Lin, G., Li, K. and Yuan, B. (2010). An assessment of exploiting renewable energy sources with concerns of policy and technology. *Energy Policy*, 38(8), 4604-4616.

31. San Cristóbal, J. R. (2011). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36(2), 498-502.

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

33. Hong, S., Bradshaw, C. J. A. and Brook, B. W. (2013). Evaluating options for the future energy mix of Japan after the Fukushima nuclear crisis. *Energy Policy*, 56, 418-424.

34. Santoyo-Castelazo, E. and Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80, 119-138.

35. Brand, B. and Missaoui, R. (2014). Multi-criteria analysis of electricity generation mix scenarios in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 251-261.

36. Kaya, T. and Kahraman, C. (2011). Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6577-6585.

37. Maxim, A. (2014). Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy*, 65, 284-297.

38. Nunes Silva, I., Hernane Spatti, D., Andrade Flauzino, R., Liboni, L.H.B. and dos Reis Alves, S.F. (2017). *Artificial Neural Networks: A Practical Course* (First edition). Cham: Springer, 21.

39. Baliyan, A., Gaurav, K. and Mishra, S. K. (2015). A Review of Short Term Load Forecasting using Artificial Neural Network Models. *Procedia Computer Science*, 48, 121-125.

40. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (Third edition). New Jersey: Pearson, 10.

41. Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H. and De Jesús, O. (2014). *Neural Network Design* (Second edition). Stillwater: Martin Hagan Publisher, II-6.

42. Ju-Long, D. (1982). Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1(5), 288-294.

43. Julong, D. (1989). Introduction to Grey system theory. *The Journal of Grey System*, 1, 1-24.

44. Kayacan, E., Ulutas, B. and Kaynak, O. (2010). Grey system theory-based models in time series prediction. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1784-1789.

45. Hwang C. L. and Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making* (First edition). Berlin: Springer-Verlag, 128-132.

46. Huang, X., Zhang, J., Luo, L., Tang, Q., Luo, B., Zhang, W., Deng, S., Shen, F., Yao, X. and Xiao, H. (2017). The influence of GDP, population, and net export value on energy consumption. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(9), 815-821.

47. İnternet: Yıllara, yaş grubu ve cinsiyete göre nüfus, 1935-2018 URL: http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1588, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

48. Say, N. P. and Yücel, M. (2006). Energy consumption and CO_2 emissions in Turkey: Empirical analysis and future projection based on an economic growth. *Energy Policy*, 34(18), 3870-3876.

49. Soytas, U. and Sari, R. (2003). Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets. *Energy Economics*, 25(1), 33-37.

50. Lise, W. and Van Montfort, K. (2007). Energy consumption and GDP in Turkey: Is there a co-integration relationship?. *Energy Economics*, 29(6), 1166-1178.

51. Altinay, G. and Karagol, E. (2004). Structural break, unit root, and the causality between energy consumption and GDP in Turkey. *Energy Economics*, 26(6), 985-994.

52. Yalta, A. T. (2011). Analyzing energy consumption and GDP nexus using maximum entropy bootstrap: The case of Turkey. *Energy Economics*, 33(3), 453-460.

53. Altinay, G. and Karagol, E. (2005). Electricity consumption and economic growth: Evidence from Turkey. *Energy Economics*, 27(6), 849-856.

54. Aslan, A. (2014). Causality Between Electricity Consumption and Economic Growth in Turkey: An ARDL Bounds Testing Approach. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9(1), 25-31.

55. İnternet: Gross domestic product (GDP) (indicator) URL: https://data.oecd.org/gdp/gross-domestic-product-gdp.htm, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

56. Topcu, M. and Payne, J. E. (2018). Further evidence on the trade-energy consumption nexus in OECD countries. *Energy Policy*, 117, 160-165.

57. Dedeoğlu, D. and Kaya, H. (2013). Energy use, exports, imports and GDP: New evidence from the OECD countries. *Energy Policy*, 57, 469-476.

58. İnternet: Yıllara göre dış ticaret, 1923-2018 URL: http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=621, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

59. İnternet: Net elektrik tüketiminin sektörlere göre dağılımı URL: http://www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1579, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

60. Soytas, U. and Sari, R. (2007). The relationship between energy and production: Evidence from Turkish manufacturing industry. *Energy Economics*, 29(6), 1151-1165.

61. Sun, S. and Anwar, S. (2015). Electricity consumption, industrial production, and entrepreneurship in Singapore. *Energy Policy*, 77, 70-78.

62. İnternet: Industrial production (indicator) URL: https://data.oecd.org/industry/ industrial-production.htm, Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.

63. IEA. (2018). *Electricity Information 2018.* Paris: OECD Publishing, III-57, III-503, III-510.

64. Wagner, H. J. and Mathur, J. (2011). *Introduction to Hydro Energy Systems: Basics, Technology and Operation* (First edition). Berlin: Springer-Verlag, 12-13.

65. Houghton, J. T., Jenkins, G. J. and Ephraums, J. J. (1990). *Climate change, The IPCC Scientific Assessment* (First edition). Cambridge: Cambridge University Press, 58-61.

66. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T. and Minx, J.C. (2014). *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (First edition). Cambridge: Cambridge University Press, 47.

67. Turconi, R., Boldrin, A. and Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 555-565.

68. Wang, J., Jing, Y., Zhang, C. and Zhao, J. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278.

69. IEA. (2018). *World Energy Outlook 2018*. Paris: IEA, 605.

70. NEA/IEA/OECD. (2015). *Projected Costs of Generating Electricity 2015*. Paris: OECD Publishing, 30, 37.

71. IFC. (2015). *Hydroelectric Power: A guide for Developers and Investors*. Washington, DC.: IFC, 7.

72. Evans, A., Strezov, V. and Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1082-1088.

73. Afgan, N. H. and Carvalho, M. G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), 739-755.

74. Santos, M., Ferreira, P., Araújo, M., Portugal-Pereira, J., Lucena, A. and Schaeffer, R. (2017). Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. *Journal of Cleaner Production*, 167, 938-950.

75. M. J. Santos, P. Ferreira and M. Araújo. (2015, 19-22 May). *Multicriteria scenario analysis on electricity production*. 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), Lisbon, 1-5.

76. Cartelle Barros, J. J., Lara Coira, M., de la Cruz López, M. P. and del Caño Gochi, A. (2017). Comparative analysis of direct employment generated by renewable and non-renewable power plants. *Energy*, 139, 542-554.

77. Genoud, S. and Lesourd, J. (2009). Characterization of Sustainable Development Indicators for Various Power Generation Technologies. *International Journal of Green Energy*, 6(3), 257-267.

78. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016). *Mavi Kitap*. Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 23.

79. Lewis, C. D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods: A Practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting* (First edition). London: Butterworth Scientific, 40.



GAZİ GELECEKTİR...