



**TÜRKİYE İÇİN BİR ENERJİ ve EMİSYON MODELİ  
ÖNERİSİ: SİSTEM DİNAMİĞİ YAKLAŞIMI**

**Özlem KARADAĞ ALBAYRAK**

**Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN  
Yüksek Lisans Tezi  
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TÜRKİYE İÇİN BİR ENERJİ ve EMİSYON MODELİ ÖNERİSİ: SİSTEM DİNAMİĞİ  
YAKLAŞIMI**

(An Energy And Emission Model Proposal For Türkiye: System Dynamics Approach)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özlem KARADAĞ ALBAYRAK

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN

Erzurum  
Mart, 2024

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Özlem KARADAĞ ALBAYRAK tarafından hazırlanan “TÜRKİYE İÇİN BİR ENERJİ ve EMİSYON MODELİ ÖNERİSİ: SİSTEM DİNAMİĞİ YAKLAŞIMI” başlıklı çalışması 29 / 03 / 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında, yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç Dr. Muhammet Emre KESKİN Aslı ıslak imzalıdır  
*Atatürk Üniversitesi*

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN Aslı ıslak imzalıdır  
*Atatürk Üniversitesi*

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut TUTAM Aslı ıslak imzalıdır  
*Erzurum Teknik Üniversitesi*

Enstitü Yönetim Kurulunun  
.../.../.... tarihve ..... sayılı  
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım

**Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN**

**Enstitü Müdürü**

Aslı ıslak imzalıdır

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı,5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Burak ERKAYMAN danışmanlığında sunulan “TÜRKİYE İÇİN BİR ENERJİ ve EMİSYON MODELİ ÖNERİSİ: SİSTEM DİNAMİĞİ YAKLAŞIMI” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	16	30
Kuramsal Temeller	30	30
Materyal ve Yöntem	25	35
Bulgular	2	20
Tartışma	2	20
Tezin Geneli	16	25

*Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

<b>Tez Yazarı (Öğrenci)</b>	<b>Tez Danışmanı</b>
<b>Özlem KARADAĞ ALBAYRAK</b>	<b>Doç. Dr. Burak ERKAYMAN</b>
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Tezimi hazırlama sürecinde danıőmanlıđımı yapan hocam Sayın Doç. Dr. Burak ERKAYMAN' a sonsuz sayđı ve teőekkürlerimi sunuyorum.

Özlem KARADAĞ ALBAYRAK



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ TÜRKİYE İÇİN BİR ENERJİ ve EMİSYON MODELİ ÖNERİSİ: SİSTEM DİNAMİĞİ YAKLAŞIMI

Özlem KARADAĞ ALBAYRAK

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN

**Amaç:** Sistem Dinamiği yaklaşımı kullanılarak bir simülasyon modeli oluşturmak ve bu simülasyon modeli ile Türkiye'nin farklı enerji politikaları uygulaması sonucu enerji ve emisyon çıktılarını belirlemek.

**Yöntem:** Bu çalışmada Türkiye için enerji politikalarının oluşmasını sağlayan faktörler belirlenip Sistem Dinamiğine dayalı bir model tasarlanmıştır. Araştırmaya konu olan model oluşturulurken kullanılan değişkenler, fonksiyonlar ve başlangıç değerleri için literatür ve farklı veri kaynakları kullanılmıştır.

**Bulgular:** Simülasyon model dört farklı senaryo için sonuçlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

**Sonuç:** Türkiye için farklı enerji politikalarının farklı enerji üretim miktarları ve emisyon miktarlarına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sistem Dinamiği, Enerji, Yenilenebilir Enerji, Emisyon.

Mart 2024, 49 sayfa

## ABSTRACT

### MASTER THESIS

#### AN ENERGY AND EMISSION MODEL PROPOSAL FOR TURKEY: SYSTEM DYNAMICS APPROACH

Özlem KARADAĞ ALBAYRAK

Supervisor: Assoc. Prof. Burak ERKAYMAN

**Purpose:** To create a simulation model using the System Dynamics approach and to determine the energy and emission outputs as a result of Turkey's implementation of different energy policies with this simulation model.

**Method:** In this study, the factors that enable the formation of energy policies for Turkey are determined and a model based on System Dynamics is designed. Literature and different data sources were used for the variables, functions and initial value used when creating the model subject to the research.

**Findings:** Simulation model results were obtained and interpreted for four different scenarios.

**Result:** It has been concluded that different energy policies for Turkey cause different energy production amounts and emission amounts.

**Key Words:** System Dynamics, Energy, Renewable Energy, Emission.

**March 2021, 49 pages**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....	x
GİRİŞ.....	1
KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
MATERYAL ve YÖNTEM .....	8
Sistem ve Simülasyon Kavramı .....	8
Sistem Dinamiği Kavramı.....	9
Sistem Dinamiği Bileşenleri .....	10
Sebep-sonuç döngüleri .....	10
Nedensel döngü diyagramları .....	10
Stok ve akış diyagramları.....	11
Enerji Kaynakları .....	13
Fosil enerji kaynakları.....	14
Yenilenebilir enerji kaynakları.....	15
Diğer enerji kaynakları.....	16
Emisyonlar .....	16
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	18
Veri Seti .....	18
Enerji ve Emisyon Simülasyon Modelinin Oluşturulması.....	19
Enerji ve Emisyon Modelinin Nedensel Döngü Diyagramı .....	19
Enerji ve Emisyon Modelinde Stok Akış Diyagramı.....	20
Enerji ve Emisyon Modelinde Farklı Senaryo Analizleri.....	24
Model Geçerliliği .....	27

Tartışma.....	28
SONUÇ.....	30
KAYNAKLAR.....	31
EKLER.....	36
EK 1. Veriler.....	36
ÖZGEÇMİŞ.....	37



## TABLÖLAR DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> 2022 Yılı Sonu İtibarıyla Kaynak Bazında Kurulu Güç ve Üretim Değerleri .....	14
<b>Tablo 2.</b> Modelde Kullanılan Değişkenler ve Açıklamaları .....	18
<b>Tablo 3.</b> Enerji ve Emisyon Modelindeki Stoklar .....	22
<b>Tablo 4.</b> Enerji ve Emisyon Modelindeki Akışlar .....	22
<b>Tablo 5.</b> Enerji ve Emisyon Modelindeki Parametreler ve Dinamik Değişkenler .....	23
<b>Tablo 6.</b> MAPE Sonuçları.....	28
<b>Tablo 7.</b> Simülasyona Ait Senaryo Sonuçları .....	29



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Nüfus nedensel döngü diyagramı örneği .....	11
Şekil 2. Stoklar ve akışlar.....	12
Şekil 3. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Koç ve Şenel, 2013).....	13
Şekil 4. Türkiye toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu .....	17
Şekil 5. Enerji ve emisyon modelinin nedensel döngü diyagramı .....	20
Şekil 6. Enerji ve emisyon modelinin stok akış diyagramı .....	21
Şekil 7. Birinci Senaryo 2035 Simülasyon sonucu. ....	24
Şekil 8. İkinci senaryo 2035 Simülasyon sonucu.....	25
Şekil 9. Üçüncü senaryo 2035 Simülasyon sonucu.....	26
Şekil 10. Dördüncü senaryo 2035 Simülasyon sonucu. ....	27

## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

<b>BP</b>	: British Petroluom
<b>CE</b>	: Enerji Tüketimine Bağlı Karbondioksit Emisyonu
<b>EIH</b>	: Enerji İhracatı
<b>EIT</b>	: Enerji İthalatı
<b>EJ</b>	: Exajoule
<b>EPDK</b>	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
<b>ET</b>	: Enerji Tüketimi (Kişi Başı)
<b>ETKB</b>	: T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
<b>EU</b>	: Enerji Üretimi
<b>EUC</b>	: Kömürden Enerji Üretimi
<b>EUG</b>	: Doğalgazdan Enerji Üretimi
<b>EUO</b>	: Petrolde Enerji Üretimi
<b>EUS</b>	: Güneşten Enerji üretimi
<b>EUR</b>	: Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretimi
<b>EURU</b>	: Rüzgârdan Enerji Üretimi
<b>EUDYE</b>	: Diğer Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretimi
<b>GDP</b>	: Gayri Safi Milli Hasıla
<b>GtCO2</b>	: Gigaton Karbondioksit Eşleniği
<b>GWh</b>	: Gigawatt saat
<b>LNG</b>	: Uzun Dönemli ve Spot
<b>İEA</b>	: International Energy Agency
<b>MAPE</b>	: Ortalama Yüzde Hata
<b>N</b>	: Nüfus
<b>NDD</b>	: Nedensel Döngü Diyagramı
<b>SD</b>	: Sistem Dinamiği
<b>TUİK</b>	: Türkiye İstatistik Kurumu
<b>Twh</b>	: Terewattsaat
<b>YEKDEM</b>	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Desteklenmesi Mekanizması

## GİRİŞ

Ekonomik, teknolojik, sosyal ve çevresel değişimdeki hız, yöneticileri ve politika yapıcılarını artan oranlarda öğrenmeye zorlarken, aynı zamanda içinde yaşadığımız sistemlerin karmaşıklığı da arttırmaktadır. Büyüyen dinamik karmaşıklığın olduğu bir dünyada etkili karar verme ve öğrenme, sistem düşünürleri olmamızı, yani zihinsel modellerimizin sınırlarını genişletmemizi ve karmaşık sistemlerin yapısının davranışlarını nasıl oluşturduğunu anlamak için araçlar geliştirmemizi gerektirir (Sternan 2000). Giderek daha fazla zorlaşan karmaşık sistemlerin doğru yorumlanabilmesi için doğru analiz edilmeleri gereklidir. Bunun yapılabilmesi için geliştirilen yeni yöntemlerden bir tanesi de Sistem Dinamiği kavramıdır. Sistem Dinamiği sistem düşüncesi kavramı ile ilişkilidir. Sistem düşüncesi, tüm kalıpları daha net hale getirmek ve onları etkili bir şekilde nasıl değiştireceğimizi görmemize yardımcı olmak için son elli yılda geliştirilen kavramsal bir çerçeve, bir bilgi ve araçlar bütünüdür. Araçlar yeni olsa da, temeldeki dünya görüşü son derece sezgiseldir; küçük çocuklarla yapılan deneyler, onların sistem düşüncesini çok çabuk öğrendiklerini gösteriyor (Senge 1990). Sistem Dinamiği yönteminin ana unsurları, stokları ve akışları ve nedensel ilişkileri sunan matematiksel denklemlerdeki değişkenlerdir. Kısa, orta ve uzun vadeli nedensel döngülerin kullanımıyla temsil edilirler. Bu şekilde, değişkenler geri besleme döngülerinde birbirine bağlanır (Jäger vd. 2009).

Enerji kaynakları ile ülkelerin kalkınmaları arasında doğru orantı vardır. Enerji kullanım oranları kalkınma göstergelerinden biridir. British Petroleum (BP) (2023), istatistiklerine göre 2019 yılında sektörlerin enerji talebi taşımacılık için 119, sanayi için 188.3, hammadde için 37.6 ve binalar için 132.4 Exajoule (EJ) olarak gerçekleşmiştir. 2040 yılına kadar küresel enerji ihtiyacının Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü dışında kalan ülkeler için %25 artacaktır (ExxonMobil 2018).

Enerji kaynaklarında dışarıya bağlı olmak ülkeler için ciddi problemlere sebep olmaktadır. Bunun birinci olumsuz etkisi cari açığıdır. Türkiye'nin son beş yılda cari açığının 220 milyar dolara yaklaştığı ve bu açığın büyük kısmı 213 milyar dolar ile enerji faturası oluşturmuştur. 2022 yılında enerji ithalatına 94,2 milyar dolar olarak gerçekleşmiş ve oluşan açık 79,8 milyar dolara ulaşmıştır. Bu artışta Türkiye'nin gelişmesi ile paralel olarak enerji talebinin artması ve Rusya-Ukrayna savaşında emtia fiyatlarında oluşan yükseliş neden olmuştur (Dünya Gazetesi, 2022).

Enerjide dışa bağıllık, ülkelerin kalkınmasını olumsuz etkilerken bu etkiler ekonomi ile sınırlı kalmaz. Enerji kaynaklarının sürdürülebilir olması gerekir. Yani enerji arzı düzenli ve güvenli sağlanmalıdır. Rusya Ukrayna savaşı hem Türkiye hem de dünya için enerji arzında aksaklıklara neden olmuştur. Rusya-Ukrayna savaşı öncesinde Rusya dünyanın en büyük enerji ihracatçısıydı. Savaşın etkisi ile Rusya'nın hem petrol hem de doğal gaz üretimini azalmıştır. Fakat Rusya'ya uygulanan yaptırımlar bu ülkenin Batı teknolojisine ve yatırımına erişimi üzerindeki etkisinden dolayı diğer ülkeleri etkilemiştir. Avrupa'ya giden Rus gazının %80' i Ukrayna üzerinden gitmektedir. Bu birlik ülkelerinin gaz talebinin nerdeyse %30' dur. Bununla birlikte fosil enerji kaynakları tükeneceklerdir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı rakamlarında 2017 yılında Kömür için 114 yıl, doğalgaz için 53 yıl, petrol 51 yıllık rezerv kaldığı açıklanmıştır. Bu kaynakların sürekli bir enerji arz kaynağı olmayacakları açıktır.

2022 yılında Türkiye' de 408 milyon m<sup>3</sup> doğal gaz üretimi yapılmasına karşın 54,6 milyar m<sup>3</sup> doğal gaz ithalatı yapılmıştır. Yine ülkemizde 3,58 milyon ton ham petrol üretimi yapılmasına karşın 33,49 milyon ton ham petrol ithalatı yapılmıştır. Bu verilerden yola çıkarak ülkemizin %90 oranında ham petrol ithalatına bağımlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu verilerden yola çıkarak ülkemizin %99 oranında doğal gaz ithalatına, %90 oranında ham petrol ithalatına bağımlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Türkiye 2023 yılında elektrik üretiminin %36,3'ü kömürden, %21,4'ü doğal gazdan elde etmiştir (ETKB, 2024). Bu verilerden de anlaşıldığı gibi ülkemizde enerji ikinci sırada doğal gazdan üretiliyor ve biz doğal gaz konusunda başka ülkelere bağımlıyız. Türkiye 2022 yılında, 54.661,67 milyon Sm<sup>3</sup> doğal gaz ithal edilmiştir. Doğal gaz ithalatı 2021 yılına kıyasla %6,89 oranında azalmıştır. 2022 yılında, ithalat %39,47'lik payla en fazla Rusya'dan yapılmıştır. 2022 yılında 15.170,69 milyon Sm<sup>3</sup> LNG (Uzun Dönemli ve Spot) ithalatı yapılmış olup, söz konusu miktar toplam ithalatın %27,75'idir (EPDK, 2024).

Bir değer faktör enerji kaynaklarının çevresel etkisidir. Dünyada enerjiye olan hızlı talep ve bu talebin büyük oranda fosil kaynaklardan karşılanıyor olması CO<sub>2</sub> emisyonundaki artışında en önemli etkendir. Sanayi Devriminde yakıtların yanması ile oluşan yıllık CO<sub>2</sub> emisyonları sıfıra yakinken 2015 yılında 33 GtCO<sub>2</sub> (Gigaton Karbondioksit-Eşleniği) yükselmiştir (IEA 2017). Karbondioksit emisyonu ile mücadele edebilmek için Türkiye pek çok anlaşmanın tarafı olmuştur. Bu anlaşmalara 2009 yılında Kyoto Protokolü, 2017 yılında Paris Anlaşması, belediye bazında Covenant of Mayors anlaşması örnek olarak verilebilir.

Türkiye için enerji politikalarının ve ulusal enerji planının oluşturulması enerji kaynakları konusunda dışa bağıllığımız nedeniyle çok önemlidir. Belli özellikleri ile hidroelektrik kaynaklar, rüzgâr, jeotermal, güneş, biyokütle, dalga ve diğer yenilenebilir enerji

kaynaklarının değerlendirilmesi ve enerji verimliliği konusunda çalışmalar genişletilmektedir. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak için 2011 yılında Yenilenebilir Enerji Kaynakları Desteklenmesi Mekanizması (YEKDEM)’e ilişkin bir yönetmelik hazırlanmıştır. Türkiye 2023 yılında elektrik üretiminin %19,6’sı hidrolik enerjiden, %10,4’ rüzgardan, %5,7’si güneşten, %3,4’ jeotermal enerjiden ve %3,2’si diğer yenilenebilir kaynaklardan elde etmiştir (ETKB, 2024).

Türkiye ulusal enerji planını belli periyotlarla yayınlanmaktadır. En son 2022 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından “Türkiye Ulusal Enerji Planı” yayınlanmıştır. Bu rapora göre 2020-2035 yıllarında

- Birincil enerji tüketimi 205,3 Mtep’e yükselmekte,
- Elektrik tüketimi 510,5 TWh’e ulaşmakta,
- Elektrik enerjisinin nihai enerji tüketimi içindeki payı %24,9 oranına erişmekte,
- Enerji yoğunluğu %35,3 oranında azalmakta,
- Elektrik kurulu gücü toplamda 189,7 GW’a,
- Güneş enerjisi kurulu güç 52,9 GW’a,
- Rüzgar enerjisi kurulu g29,6 GW’a,
- Nükleer enerji kurulu güç 7,2 GW’a çıkmaktadır (ETKB 2022).

Bu araştırmada oluşturulan Sistem Dinamiği modeli ile dört farklı senaryo için enerji ve emisyon simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar 2010 yılı baz alınarak hesaplanmış artış oranlarına göre farklılaştırılmıştır. Birinci senaryoda 2010 yılı baz yılı artış oranları durumu, ikinci senaryo 2010 baz yılı yenilenebilir enerji kaynaklarının artış oranlarının iki katına çıkması durumu, cnc senaryo 2010 baz yılı hidrolik enerji kaynaklarının artış oranlarının iki katına çıkması durumu ve dördüncü senaryo 2010 baz yılı fosil enerji kaynaklarının artış oranlarının iki katına çıkması durumunun simülasyon sonuçlarını vermiştir. Simülasyon programı 2035 yılına kadar çalıştırılmıştır. Daha sonra ilk senaryo sonuçları ile Enerji ve Tabii kaynaklar bakanlığının ulusal enerji planını ile uyumluluğu tartışılmıştır.

## KAYNAK ÖZETLERİ

Ülkeler enerji ile ilgili politikaları geliştirirken veya karar alırken problemin karmaşık ve dinamik doğası nedeniyle zorlanmaktadırlar. Karar vericilerin, karar verirken bilimsel ve uzmanlık içeren bilgileri kullanmaları çok önemlidir. Çünkü karmaşıklık kanıtların toplanma, yorumlanma ve eyleme dönüştürülmesi adımlarını geciktirir ve kanıta dayalı karar almayı engelleyebilir (Sterman 2006). Sistem Dinamiği uygulamaları pek çok sektörde kendine uygulama alanı bulmuştur. Son yıllarda pek çok şirket, danışmanlık firmaları ve devlet kurumları politika yapımı için bu yöntemden faydalanmışlardır. Sistem Dinamiği yaklaşımı enerji ve emisyon politikalarını oluşturmakta önemli bir araçtır. Sistem Dinamiği modellemesi, karar vericilerin etkili politika eylemlerinin geliştirilmesini desteklemek amacıyla karmaşık sistemlerin dinamik davranışını anlamalarına ve tahmin etmelerine yardımcı olmak için bir dizi farklı alanda önemli bir değer olduğunu göstermiştir (Currie vd 2018). Enerji ile ilgili çalışmalar enerji etkinliği, yenilenebilir enerji yaygınlaştırılması, kapasite yeterliliği, politika yapımı, talep tepkisi vs. gibi konuları kapsamaktadır.

Enerji politikaları belirlenmesi konusunda dünyada ve Türkiye’ de pek çok farklı yöntemle araştırmalar yapılmıştır. An vd (2013) Avusturalya için doğru elektrik talebi tahmini yapabilmek için çok çıkışlı bir ileri beslemeli sinir ağı ampirik mod ayrıştırma tabanlı sinyal filtreleme ve mevsimsel ayarlama ile birleştiren yeni bir yaklaşım olan Ampirik Mod Ayrıştırması tabanlı sinyal filtreleme ve Mevsimsel ayarlama ile çok çıkışlı İleri beslemeli Sinir Ağı (MFES)’i önermektedirler ve bu modelin tahmin gücünün yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Avila vd (2013) Şili’nin Huatacondo şehrinde bulunan gerçek hayattaki bir mikro şebekede talep tahminini gerçekleştirmek için istikrarlı bir Takagi & Sugeno (T&S) bulanık modelinin kullanılmasını önermişlerdir. Bu modelin Kuzey Şili’de bulunan mikro şebekeden alınan gerçek verilere dayanarak bu modelinin uyarlanabilir bir sinir ağıyla karşılaştırıldığında daha iyi tahmin yeteneklerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Al-Qahtani ve Crone (2013) tahmin edilen günü iş günü veya iş günü olmayan gün olarak kategorize etmek için ikinci bir özellik olarak ikili kukla değişkenleri kullanan, Birleşik Krallık piyasasındaki elektrik talebini tahmin etmek için çok değişkenli bir k-NN regresyon yöntemi kullanmışlar. Hassani vd (2014), kısa vadeli elektrik talebi tahmini için karşılıklı bilgi tabanlı girdi seçimi algoritmasına sahip, kendine benzer bir yerel nöro-bulanık bir modeli önermişlerdir. Mtembo vd (2014) Zimbabve elektrik talebi için çoklu lineer regresyon modeline dayalı bir ekonomik model geliştirmişlerdir. Voronin, S. & Partanen (2014) elektrik talebini ve fiyatını eş zamanlı tahmin eden bir model

sunulmuştur. Model dalgacık dönüşümlerini, ARIMA modellerini ve sinir ağlarını birleşimidir. Efendi vd (2015) lengüistik yaklaşımının indeks sayılarını kullanarak dilsel örneklem dışı tahminin belirlenmesinde yeni bir yaklaşımı tanıtmışlardır. Malezya Ulusal Elektrik Kurumu'ndan alınan günlük yük verileri ampirik bir çalışma olarak kullanılmış ve önerilen yaklaşımın güvenilirliğini araştırmışlardır. Nazari vd (2015) İran'da konut ve ticari sektörlerin enerji talebini analiz etmek için farklı modeller geliştirmişlerdir. Barak & Sadegh (2016) İran'daki yıllık enerji tüketimi ARIMA-ANFIS temelli 3 modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Liu vd (2016) İspanyada endüstri sektörünün Gri Sinir Ağı ve Girdi-Çıktı Birleşik Tahmin Modeli (GNF-IO modeli) olarak adlandırılan Gri tahmin yöntemi ve sinir ağı geriye yayılım modelinin birleşimiyle enerji tüketiminin tahminini yapmışlardır. Ruiz vd (2018) Elman sinir ağı yöntemi ile konfor ve sağlığı etkilemeden enerji verimliliğini artırmak amacıyla kamu binalarında enerji tüketimi tahmini için bir model önermişler ve bu sayede enerji tasarrufu sağlamayı hedeflemişlerdir. Bugala vd (2018) Polonya'da fotovoltaik dönüşümden elektrik enerjisinin kısa vadeli tahmininde klasik istatistiksel yöntemlerin mevsimsel ve sinirsel modellemeye dayalı yöntemlerin kullanımını sunmuştur. Karadede vd (2017) Doğal gaz talebini daha küçük hata oranıyla tahmin etmek amacıyla doğrusal olmayan regresyon tabanlı yetiştirici genetik algoritması ve benzetilmiş tavlamadan oluşan bir yetiştirici hibrit algoritması önermişlerdir.

Türkiye içinde farklı enerji kaynakları için modeller geliştirilmiştir. Melikoğlu (2023) Türkiye'nin 2023 projeksiyonunda Ekonometriye dayalı iki yarı ampirik model, doğalgaza olan talep tahmin modeli geliştirmiştir. Gürbüz vd (2013) Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi yapay arı kolonisi algoritması (ABC) yaklaşımlarıyla tahmin etmişlerdir. Hamzaçebi ve Es (2014) Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi talebi, Optimize Edilmiş Gri Modelleme (1,1) adı verilen optimize edilmiş Gri Modelleme (1,1) tahmin tekniği kullanılarak 2013-2025 dönemi için tahmin edilmektedir. Es vd (2014) tarafından Yapay Sinir Ağları modeli ile çoklu doğrusal regresyon tekniği ile karşılaştırmalı olarak ortaya koyarak 2011-2025 yılları arası Türkiye net enerji talebi tahmin edilmiştir. Uzlu vd (2014) Türkiye'nin yıllık hidrolik enerji üretimini tahmin etmek için YSA (yapay sinir ağı) modelini ABC (yapay arı kolonisi) algoritmasıyla birlikte uygulamışlardır. Tutun vd (2015) “öngörülen senaryo yaklaşımı” adı verilen SARIMA (mevsimsel otomatik gerilemeli yinelemeli hareketli ortalama) yöntemi ve NARANN (doğrusal olmayan otoregresif yapay sinir ağı) yöntemini kullanarak gelecekteki bağımsız faktörleri ilk önce tahmin etmek için yeni bir çerçeve önermişlerdir. Daha sonra, bu senaryolara dayanarak, gelecekteki net elektrik tüketimi tahmin etmek için bir LADES (LASSO tabanlı uyarlanabilir evrimsel simüle edilmiş tavlama) modeli ve bir RADES (sırt tabanlı uyarlanabilir evrimsel simüle edilmiş tavlama) modeli uygulamışlardır. Günay (2016) Türkiye'nin yıllık brüt elektrik

talebi, nüfus, kişi başına düşen gayri safi yurtiçi hasıla, enflasyon yüzdesi, işsizlik yüzdesi, ortalama yaz sıcaklığı ve ortalama kış sıcaklığı fonksiyonu olarak çoklu doğrusal regresyon ve yapay sinir ağları kullanılarak modellenmiştir. Karadede vd (2017) doğal gaz talep tahmin modeli için Breeder hibrit algoritma yaklaşımını uygulamışlardır.

Dünyada enerji kaynakları ile ilgili pek çok farklı politika oluşturma konusu Sistem Dinamiği felsefesi ile araştırılmıştır. Kolombia için Morcillo vd. (2018) enerji piyasasının büyüdüğü ve enerjiye oluşan talebin makro ve mikro yapısal değişikten etkilendiği düşünerek ve bu dinamiklerinin ayrıntılı olarak belirlenmesi için elektrik piyasasının talep senaryoları oluşturmuşlardır. Timma vd. (2015) Sistem Dinamiği ile evler için enerji verimliliğini sağlayacak yenilik yayılımı modelini geliştirmişlerdir. Letonta için Blumberga vd. (2016) elektrik sektörü için uzun vadeli gelişimi belirlemek için mevcut politikalar ışığında modelleme yapmışlardır. Wu ve Xu (2013) araştırmalarında bölgesel düzeyde enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının tahmini için Sistem Dinamiği ve bulanık çok amaçlı programlamayla bütünleşik bir yaklaşımla bir ekonomi-enerji sistemini analiz etmek için genel bir Sistem Dinamiği modeli geliştirmişlerdir. Bu modelle Çin'deki bir dünya mirası alanının 2010-2020 yılları arasındaki enerji tüketimini tahmin etmek için kullanmışlar ve hızlı ekonomik büyümeyle birlikte enerji tüketiminin ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının önemli ölçüde arttığını ortaya koymuşlardır. Ansarive Seifi (2013) İran çimento endüstrisindeki enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonunu çeşitli üretim ve ihracat senaryoları altında analiz etmek için bir Sistem Dinamiği modeli sunmuşlar ve çimento sektöründe enerji sübvansiyonunun tamamen kaldırılması ve düzeltici politikaların uygulanmasının, potansiyel olarak doğal gaz ve elektrik tüketiminde sırasıyla %29 ve %21 oranlarında ve CO<sub>2</sub> emisyonunda %22 oranında azalmaya yol açabileceğini sonucuna ulaşmışlardır. Feng vd (2013) Pekin şehrinin 2005-2030 yılları arasındaki enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyon eğilimlerini modellemek için STELLA platformu kullanılarak bir Sistem Dinamiği modeli geliştirildi. Robalino-Lopez vd (2014) Ekvador'da 2020 yılına kadar önümüzdeki yıllardaki CO<sub>2</sub> emisyonlarına ilişkin model ile enerji matrisindeki ve Gayri Safi Yurtiçi Hasıladaki (GSYİH) değişikliklerin nasıl etkileneceğini ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Xiao vd (2016) Çin'deki enerji tüketimini, CO<sub>2</sub> emisyonunu ve azaltma seçeneklerini araştırmak için bir Sistem Dinamiği modeli oluşturmuşlardır. Sisodia vd (2016) Hindistan'da güneş enerjisinin geniş çapta kullanımı için Sistem Dinamiği temelli bir enerji talep modeli geliştirmişlerdir.

Flynn vd (2010) Massachusetts' te yenilenebilir enerji yatırımlarını arttırmak için açık artırmaya dayalı bir fiyat destek mekanizmasını destekleyerek önerilerde bulunmuşlar ve güneş enerjisi yenilenebilir enerji sertifikası piyasa koşullarını modellerken sistem dinamiklerini

kullanmışlardır. Sistem Dinamiği yaklaşımı ile Jimenez (2016) bir pil destek veya depolama sistemi olmadan çatı güneş enerji sistemlerinin yayılımı problemini araştırmışlardır. Tayvan'da güneş enerji kaynaklarının teşvik edilmesi politikalarının etkin olduğunu belirlemek için Hsu (2012) bir model geliştirmiştir. Petit et al. (2017) enerjiye olan taleple yenilenebilir kaynak kullanım oranlarının artırılmasının dengelenmesi için enerji arz güvenliğini sağlayacak enerji kaynak yatırım ve kapatma kararlarını optimize edecek bir karar sürecini simüle etmişlerdir. Vogstad (2005) İsveç'te yenilenebilir enerji kaynakları için oluşturulmuş hedeflerin serbest elektrik piyasalarına yönelik Takas Edilebilir Yeşil Sertifikalar pazarının yatırım faktörleri ve dinamik analizinde içgörülerini araştırmışlardır. Yine yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılacak yatırımlar için etkin kararların alınabilmesinde Liu ve Zeng (2017) yatırım risklerini analiz etmişlerdir. Liu et al. (2015) Sistem Dinamiği simülasyonu yoluyla Çin'deki enerji tüketimini, brüt CO<sub>2</sub> emisyonlarını ve CO<sub>2</sub> emisyon yoğunluğunu 2013'ten 2020'ye kadar tahmin etmişlerdir. He et al. (2017) sanayi bölümlerine göre, Sistem Dinamiği yöntemini kullanarak yeni ekonomik normale uygun uzun vadeli bir elektrik talebi tahmin modeli önermişler ve Tianjin'in elektrik talebini tahmin etmek için Tianjin'in gerçek durumu ile tahmin modelini birleştirmişlerdir.

Türkiye için ise araştırma alanı sınırlı kalmıştır. Şenaras ve İnanç (2022) ülkemizin elektrik piyasasını Sistem Dinamiği ile modellemişlerdir. Ak (2012) bir Sistem Dinamiği yaklaşımı ile endüstrisindeki enerji tüketimi çeşitli üretim ve ihracat senaryoları altında tahmin etmişlerdir. Ayrıca önümüzdeki bir ve yirmi yıldaki enerji talebi görünümünü belirlemek için yeni enerji fiyatları dikkate almıştır. Çelik (2021) tarafından Türkiye örneği üzerinden biyoenerji kaynaklarının kullanımındaki artışların gıda, enerji ve çevre güvenliğine etkisini analiz edecek bir model oluşturulmuştur. Gökay (2019) 2030 yılında yeşil enerji kullanım oranlarını belirlerken Sistem Dinamiği modelini kullanmıştır. Paşaoğlu (2006) Sistem Dinamiği metodolojisi kullanılarak talep modülünden, yatırım modülünden, elektrik üretimi modülünden, muhasebe ve finans modülünden, çeşitli rakiplerden ve ihale sisteminden modüllerinden oluşan bir benzetim modeli geliştirmiştir. Ulkat (2020) Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi üzerindeki etkilerine sistem rezerv marjı, karbon emisyonu ve birim elektrik fiyatı üzerinden inceleyerek bir Sistem Dinamiği modeli oluşturmuştur. Dilek (2016) tezinde ılımlı bir gelirin yeniden dağıtım politikasının çevre sorunlarını arttıracığı, ancak daha radikal bir yeniden dağıtım politikasının hem sosyal hem de çevresel hedefleri aynı anda gerçekleştirebileceğini tartışmıştır. Gül (2019) Türkiye'de jeotermal, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik santral yatırımlarını risklerini bir Sistem Dinamiği modeli anlayışı ile farklı çerçevelerden değerlendirmiştir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Sistem ve Simülasyon Kavramı

Sistem elemanları olan, elemanları arasında farklı güçlerde ilişkilerin mevcut olduğu ve ortak bir amaca hizmet eden yapılar olarak tanımlanabilir. Sistem Düşüncesi, problemler incelenirken geniş çerçevede bir bakış açısı ile farklı elemanlar arasındaki ilişkileri inceleyen bir yaklaşımdır (Tecim, 2004).

Sistemler parçalardan ve bu parçalar arasındaki bağlantılardan veya ara bağlantılardan oluşur. Parçaların birbiriyle çelişen amaçları olsa da, belirli hedeflere ulaşmak için ortak bir amaç tarafından yönlendirilirler. Sistemlerin davranışı aynı zamanda bileşen ve/veya sistem düzeyinde etkili olan çeşitli kurallar ve sistemlerin çevreleriyle nasıl etkileşime girdiği tarafından da belirlenir (Amadei 2015).

Kim (1999) sistem dinamiklerini şu şekilde sıralamıştır.

- Sistemlerin bir amacı vardır
- Bir sistemin amacını en iyi şekilde yerine getirmesi için tüm parçalar mevcut olmalıdır.
- Parçaların düzenlenme sırası bir sistemin performansını etkiler.
- Sistemler geri bildirim yoluyla kararlılığı korumaya çalışır.

Modelleme ve simülasyon kavramları çoğu zaman sistem kavramına atıfta bulunur. Sistem kavramı ile birbiriyle ilişkili ve birbiriyle etkileşime giren bir dizi bileşeni kastediyoruz. Bu karşılıklı ilişkiler ve etkileşimler sistemi çevresinden farklılaştırır. Modeller bir sistemi açıklamaya, farklı bileşenlerin etkilerini incelemeye ve davranış hakkında tahminlerde bulunmaya yardımcı olabilir (Raczynski 2023). Sistemin simüle edilmesi ise sistemin davranışlarını anlayabilmek için, yapının, gecikmelerin ve politikaların sistem davranışı üzerindeki etkilerini belirlemeden önce, sistemin tümü açık ve niceliksel biçimde ifade edilmesidir (Forrester1961). Çoğu durumda gerçek sistemler ile deney yapmak istenmeyen sonuçlar veya ortaya çıkacak yüksek maliyetler nedeni ile mümkün olmadığından simülasyon kullanılır (Morcillo vd 2018). Bu nedenle simülasyon, akademi ve endüstride önemli bir rol oynar.

## Sistem Dinamiği Kavramı

Sistem Dinamiği Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) Jay W. Forrester tarafından geliştirilmiştir (Hsu 2012). Forrester (1961) endüstriyel dinamik ismi ile dört farklı esastan oluşan bir yapıyı tarif etmiştir. Bunlar, bilgi-geribildirim teorisi, askeri taktiksel karar almanın otomatikleştirilmesi, karmaşık sistemlerin modeller kullanılarak deneysel tasarımı ve düşük maliyetli hesaplama için dijital bilgisayarlar. Sistem Dinamiği yaklaşımının karmaşık alanlarda kullanıma uygun olmasını sağlayan temel özelliği doğrusal olmayan ilişkileri ve geri bildirim yapılarını yönetebilmesidir (Sterman, 2014).

Sistem Dinamiği, sistem düşüncesi, mantık, matematik, fizik ve sosyal bilimlerin ilkelerine dayanmaktadır (Forrester, 1961, 1969; Sterman, 2000; Morecroft, 2007). Sistem Dinamiği kavramı farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Sistem Dinamiği Topluluğu'na (2024) göre Sistem Dinamiği, strateji ve politika tasarımı için bilgisayar destekli bir yaklaşımdır. Temel amaç insanların karmaşık, dinamik sistemlerle karşılaştıklarında daha iyi kararlar almalarına yardımcı olmaktır. Yaklaşım, dinamik sistemleri modellemek ve analiz etmek için yöntemler ve araçlar sağlar. Model sonuçları, herkesin sistem davranışını anlamasına yardımcı olacak temel bulguları iletmek için kullanılabilir. Sistem düşüncesi yaklaşımlarını tamamlayan geri bildirim sistemleri teorisine dayalı simülasyon modellemesini kullanır. Karmaşık sosyal, yönetsel, ekonomik veya ekolojik sistemlerde ortaya çıkan dinamik sorunlara uygulanır. Sosyal, yönetsel, ekonomik, ekolojik ve fizyolojik sistemlere uygulanabilir. Sistem Dinamiği uzmanları gözlemlenen bazı sistemleri modellemeye odaklanır (Amadei 2015). Stoklar ve onları değiştiren akışlar (epidemiolojide yaygınlık ve görülme sıklığı kavramları) muhasebeden zoolojiye kadar birçok disiplinde temeldir: bir popülasyon doğumlarla artar ve ölümlerle azalır. Çocuğun vücudundaki cıva yükü yutmayla artar, dışkılamayla azalır (Sterman 2006). Sistem Dinamiği, sistemlerin problemlerini uygun bilgisayar modelleri aracılığıyla temsil etme ve sistemlerin çeşitli bileşenlerinin birbirine bağımlılığının etkisini öğrenmek ve sistemin zaman içindeki davranışını anlamak için bunları simüle etme bilimi ve sanatıdır. Ayrıca başka bir faydası da sistemin gelecekteki davranışının tahmin edilmesidir; bu ancak doğru bir anlayışa ulaşıldıktan sonra mümkündür. Ayrıca, bir sistemin davranışının doğru anlaşılması sağlandığında, kritik kontrol edilebilir faktörlerle ilgili uygun kararlar alınabilir, böylece genel etki uzun vadede faydalı olur. Daha sonra bu tür kararlara dayanarak iyi politikalar formüle edilebilir ve uygulanabilir (Mallick 2023).

## **Sistem Dinamiği Bileşenleri**

Sistem dinamiği bileşenleri aşağıdaki şekilde açıklanır.

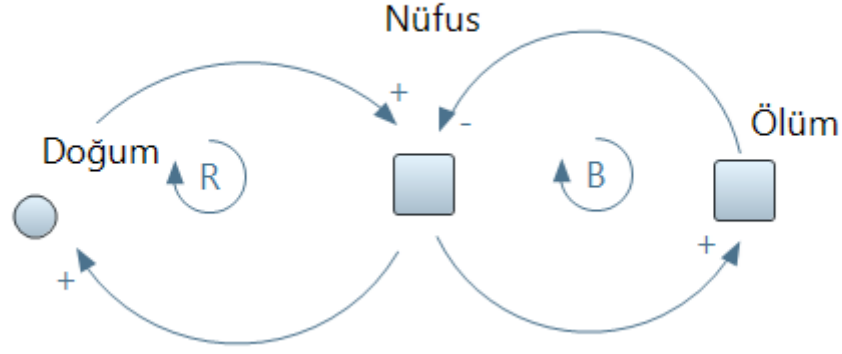
### **Sebe-sonuç döngüleri**

Bu neden-sonuç geri bildirim döngüleri Senge (1994) tarafından güçlendirici döngüler (R) ve dengeleyici döngüler (B) olarak tanımlanmaktadır. Güçlendirici (R) döngüler, bileşik bir etki yaratır ve kendi kendini güçlendiren geri bildirim süreçleridir. Değişimi güçlendirir veya artırırlar, kartopu etkisi yaratırlar ve büyümeyi veya düşüşü artırma potansiyeline sahiptirler. Dengeleyici (B) döngüleri iki şeyi anlaşmaya getiren döngülerdir. Kendi kendini düzelten geri bildirim süreçleridir ve bir hedefe veya hedefe ulaşmaya yönelik istikrar ve denge ararlar. Güçlendirici ve dengeleyici döngüler arasındaki etkileşim, nedensel döngü diyagramları veya stok ve akış diyagramları biçimindeki zihinsel modeller adı verilen modeller kullanılarak temsil edilebilir. Bu tür diyagramlar, (i) bir sistemin parçalarının nasıl etkileşime girdiğini ve davranış kalıpları oluşturduğunu tasvir etmede, (ii) sistemlerin dinamiğini diğerleriyle iletmede ve (iii) sistemin karşılaştığı sorunlara çözüm bulmak için müdahalelerin tasarlanması ve planlanmasında kullanılır (Amadei 2015).

### **Nedensel döngü diyagramları**

Nedensel döngü diyagramları ilk olarak Maruyama (1963) tarafından önerilmiştir ve geri bildirim mekanizmalarının öğelerinin karşılıklı olarak nedensel bir şekilde nasıl etkileşime girdiğini göstermenin bir yolunu temsil etmektedir. Bu diyagramda oklar nedensel ilişkileri ifade eder. Her oka + veya – işaret atanabilir. + işaretiyle etiketlenen oklar aynı yönde hareket eden nesnelere, – işaretiyle etiketlenen oklar ters yönde hareket eden nesnelere birbirine bağlar. Bazı nedensel döngü diyagramlarında okların yanına eklenen + ve – işaretleri “s” (aynı için) ve “o” (karşıt için) harfleriyle değiştirilebilir. Kısa ve görsel nedensel döngü diyagramları, hem açık hem de gizli ara bağlantıları ortaya çıkarır. Dahası, bireylerin veya ekiplerin zihinsel modellerini ortaya çıkarmak ve yakalamak ve insanların düşünme sınırlarını dar görüşlülüğün ötesine genişletmek için kullanılabilirler (Morecroft 2007).

Rastgele Döngü Diyagramları, karşılıklı bağımlılıkları ve geri bildirimleri göstermeye çok uygun olmasına rağmen yapısı içerisinde gerekli analizleri gerçekleştirememektedir. Analiz tarafındaki sınırlamaları, sistemlerin stok ve akışını analiz etmek için ek araçlar gerektirir (Gül, 2019). Nedensel döngü diyagramı örneği Şekil 1’de de sunulmuştur.



Güçlendirici Döngü



Dengeleyici Döngü

**Şekil 1.** Nüfus nedensel döngü diyagramı örneği

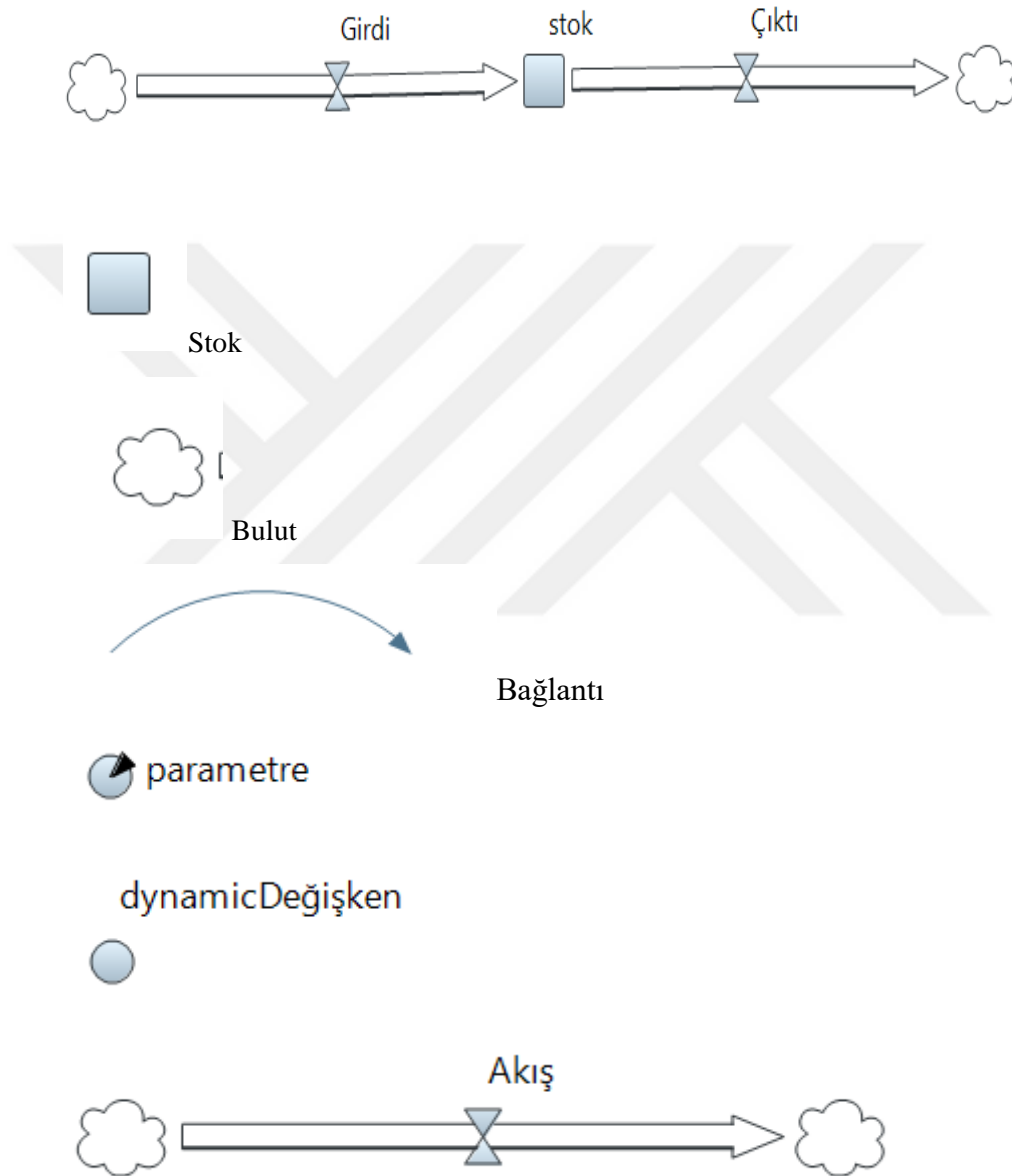
### **Stok ve akış diyagramları**

Stoklar birikimlerdir. Sistemin durumunu karakterize ederler ve kararların ve eylemlerin dayandığı bilgileri üretirler. Akışlar, bir şeyin belirli bir süre boyunca uğradığı değişim miktarıdır (Sterman 2000). Stok ve akış diyagramlarını kullanarak ana model bileşenlerini açıklar ve ana matematiksel denklemleri gösterir (Jimenez, 2016).

Bulutlar, sistem sınırlarının dışında bir yerde bulunan sonsuz kaynakları veya yutakları gösterir. Dönüştürücüler, bilgiyi bir stok ve akış yolundan başka bir stok ve akış yolu tarafından yönlendirilen bilgiye dönüştürmek veya mevcut bir akışa bilgi beslemek için kullanılır. Dönüştürücü, stoğa giren ve çıkan bir akış olmadığında da bir stoğu temsil edebilir. Dönüştürücü değişkenler olarak görülebilirler. Dönüştürücüler zamanla değişebilir ve işlevsel bir biçimde açıklanabilir. Bağlayıcılar, stoktan akışa, akıştan akışa veya dönüştürücüler arasındaki değişkenler arasındaki eylem ve bilgilerin (yani nedensel bağlantıları) iletimini veya bağlantılarını belirtir. Bir veya daha fazla değişken, bağlayıcılar aracılığıyla başka bir değişkene girdi sağlayabilir ve onu etkileyebilir (Amadei 2015). Sistem Dinamiği modelinde karar fonksiyonları, bilginin stok değişkenlerinde nasıl toplandığını ve belirli eylemlerin üretilmesi için karar(lar)a dönüştürüleceğini belirler. Bu iş parçacığı grubunun elemanları başka bir değişkeni etkiler ve sistem yeni bir duruma girer. Sistemdeki bilgi akışı stok veya akış değişkeninden başlar ve diğer ağın karar akışı değişkeninde sona erer. Zincirleme bir yol izleyerek diğer ağlardaki akışın diğer ağdaki stoklara yönlendirilmesini sağlar. Bu şekilde

sistemin işleyişi dinamik olarak modellenmiştir. Sistemdeki değişkenler arasındaki etkileşim, bilgi akışında yardımcı bir değişken olarak diğer yardımcı değişkenleri etkileyerek devam ettiği gözlemlenebilir (Gül 2019).

Şekil 2’de stok ve akışlar modeli sunulmuştur., Stok Akış Diyagramındaki diğer gösterimlerle birlikte sunulmaktadır. Şekil 3.2.nin matematiksel ifadesi aşağıda stok ve akış değişkenleriyle birlikte Eş 3.1 de sunulmuştur.



**Şekil 2.** Stoklar ve akışlar

$$Stok(x) = t \int_0^t (Inflow(x) - outflow(x)) dx + stok(x_0) \quad Eş 3.1$$

## Enerji Kaynakları

Enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ana hatları ile iki gruba ayrılabilir. Literatürde yenilenemez enerji kaynakları tekrar kullanılamaz ve tükenen kaynaklar olarak ifade edilir. Bu kaynakların bir diğer adı fosil kaynaklardır. Diğer kaynak türü yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar yerli kaynaklardır ve tükenmez olarak kabul edilirler ( IEA, 20242). Şekil 3 de Enerji kaynakları farklı özelliklerine göre sınıflandırılması sunulmuştur.

Enerji Kaynakları	
Kullanışlarına Göre	Dönüştürülebilirliklerine Göre
<b>A) Yenilenemez (Tükenir)</b>	<b>A) Birincil (Primer)</b>
a) Fosil Kaynaklı - Kömür - Petrol - Doğal Gaz	- Kömür - Petrol - Doğal Gaz - Nükleer
b) Çekirdek Kaynaklı - Uranyum - Toryum	- Biyokütle - Hidrolik - Güneş - Rüzgâr
<b>B) Yenilenebilir (Tükenmez)</b>	- Dalga, Gel-Git
- Hidrolik - Güneş - Biyokütle - Rüzgâr - Jeotermal - Dalga, Gel-Git - Hidrojen	<b>B) İkincil (Sekonder)</b> - Elektrik, Benzin, Mazot, Motorin - İkincil Kömür - Kok, Petrokok - Hava Gazı - Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG)

Şekil 3. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Koç ve Şenel, 2013).

Türkiye enerji kaynaklarının hemen hemen tamamını kullanmaktadır. Termik santraller üzerinden fosil yakıtlarla ve yerli hidrolik ve yenilenebilir kaynaklarla enerji üretebilmektedir. Tablo 1’de Türkiye’nin 2022 Yılı Sonu İtibarıyla Kaynak Bazında Kurulu Güç ve Üretim Değerleri sunulmuştur (EPDK2 2014).

**Tablo 1.** 2022 Yılı Sonu İtibarıyla Kaynak Bazında Kurulu Güç ve Üretim Değerleri

KAYNAK TÜRÜ	TOPLAM KURULU GÜÇ* (MW)	ORAN (%)	TOPLAM ÜRETİM* (MWh)	ORAN (%)
HİDROLİK	31.571,48	30,41	67.194.934,69	20,71
RÜZGÂR	11.396,17	10,98	35.140.858,14	10,83
GÜNEŞ	9.425,44	9,08	15.435.661,31	4,76
JEOTERMAL	1.691,34	1,63	10.918.764,88	3,36
BİYOKÜTLE	1.921,31	1,85	9.080.038,21	2,80
<b>YENİLENEBİLİR</b>	<b>56.005,73</b>	<b>53,95</b>	<b>137.770.257,22</b>	<b>42,45</b>
DOĞAL GAZ	25.732,79	24,79	70.827.228,33	21,83
LİNYİT	10.191,52	9,82	44.745.695,96	13,79
İTHAL KÖMÜR	10.373,80	9,99	63.259.657,34	19,49
TAŞ KÖMÜRÜ	840,77	0,81	3.242.363,27	1,00
ASFALTİT	405,00	0,39	1.568.085,50	0,48
FUEL OİL	251,93	0,24	718.653,16	0,22
NAFTA	4,74	0,00	0,00	0,00
LNG	1,95	0,00	0,00	0,00
MOTORİN	1,04	0,00	2.385.741,41	0,74
<b>TERMİK</b>	<b>47.803,53</b>	<b>46,05</b>	<b>186.747.424,97</b>	<b>57,55</b>

### Fosil enerji kaynakları

Petrol denizaltında yaşamış organizmaların kalıntıları ile oluşmuş fosil bir yakıttır. Ham petrolün bileşenleri hidrojen ve karbondur. Ham petrol damıtılarak jet yakıt, dizel ve benzinden oluşan yakıt çeşitlerine ve diğer pek çok madde için hammaddeye dönüşmektedir (Gökay, 2019). Petrol, çoğu ülke için enerji sektörünün en önemli bileşenlerinden biridir. Türkiye içinse Petrol rezervleri sınırlıdır ve Türkiye'nin kanıtlanmış petrol rezervlerinin neredeyse tamamı Güneydoğu Anadolu'nun altındadır (Ak, 2022). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, 2021 yılı itibari ile toplam ham petrol rezervi 244,4 milyar tondur. Dünyadaki bu rezervin %20'si Venezuela'ya aittir. Ayrıca dünyadaki en büyük ham petrol üreticisi ülke Amerika Birleşik Devletleri'dir ve dünya üretiminin %17'sini karşılamaktadırlar. Türkiye 2022 yılında 3,58 milyon ton ham petrol üretimi yaparken 33,49 milyon ton ham petrol ithalatı yapmıştır.

Doğal gazda deniz organizmalarının kalıntılarında oluşur. Ana bileşeni hidrokarbondur. Rezervleri petrol rezervlerine yakın yerlerde bulunur (Gökay, 2019). Doğalgaz, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, 2021 yılı itibari ile toplam ham doğalgaz rezervi 188,1 trilyon m<sup>3</sup>'dür. Dünyadaki bu rezervin %19'u Rusya'ya aittir. Ayrıca

dünyadaki en büyük doğalgaz üreticisi ülke Amerika Birleşik Devletleri'dir ve dünya üretiminin %23'sini karşılamaktadırlar. 2022 yılında ülkemizde 408 milyon m<sup>3</sup> doğal gaz üretimi yapılmasına karşın 54,6 milyar m<sup>3</sup> doğal gaz ithalatı yapılmıştır

Kömür bitki kalıntılarından meydana gelen fosil bir kaynaktır. Kömür antrasit, taş kömürü ve linyit olarak üçe ayrılır (Gökay, 2019). 2022 yılında Türkiye'de 119,8 milyon ton kömür kullanılmıştır. Ülkemizde yine 2022 yılı itibari ile yerli kömürümüz linyit, asfaltit ve taş kömürü santrallerinden 49.556,15 GWh, ithal kömüre dayalı santrallerden ise 63.259,66 GWh elektrik üretilmiştir.

### **Yenilenebilir enerji kaynakları**

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelendirilmesi ve Desteklenmesine İlişkin Yönetmelikte yenilenebilir enerji kaynakları “Hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, (Mülga ibare:RG-9/5/2021-31479) dalga, akıntı enerjisi ve gel-git gibi fosil olmayan enerji kaynaklarını ifade eder” şeklinde tanımlanmıştır. Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 'nin 2011 raporunda tanımlandığı şekliyle yenilenebilir enerji, “kullanım oranına eşit veya bu oranı aşan bir oranda doğal süreçlerle yenilenen, güneş enerjisi, jeofizik veya biyolojik kaynaklardan elde edilen her türlü enerjiyi içerir. Yenilenebilir enerji, doğal ortamda meydana gelen sürekli veya tekrarlanan enerji akışlarından elde edilir ve güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar, gelgit ve dalgalar ve okyanus termal enerjisi gibi düşük karbonlu teknolojilerin yanı sıra biyokütle gibi yenilenebilir yakıtları da içerir” (IPCC 2011).

Güneşin enerjisi çekirdeğinde meydana gelen nükleer tepkimelerle hidrojenin helyuma dönüşmesi sonucu oluşur (Gökay, 2019). Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1.527,46 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (ETKB, 224).

Rüzgâr güneş kaynaklı ısının farklı açılarla yeryüzüne ulaşması ile meydana gelen basınç farkları ve dünyanın kendi etrafında dönmesi ile oluşmaktadır (Gökay, 2019). Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA-V1) verilerine göre yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri yıllık ortalama rüzgâr hızlarına sahip kullanılabilir alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiş ve Türkiye'de kurulabilecek rüzgar elektrik santrallerinin toplam kapasitesinin 47.849,44 MW olduğu belirlenmiştir. Şu anda rüzgar türbinleri hem kıyıda hem de denizde bulunmaktadır ve ikincisi büyük rüzgar enerjisi toplamak ve arazi kullanımı üzerindeki çevresel etkiyi azaltmak için kullanılmaktadır (Saavedra M 2018).

Hidroelektrik kaynakların enerjiye dönüşmesi yüksek bir aşandan aşağı doğru suyun akarken oluşturduğu mekanik enerjinin türbinleri çevirerek enerji üretir. Öncelikle belirli bir yükseklikten akan suyun mekanik enerjisini bir türbine çevirerek ve türbin miline bağlı jeneratörü döndürerek enerji üretilir. Hidrolik santraller Türkiye'de en fazla yatırım yapılan santrallerdir.

### **Diğer enerji kaynakları**

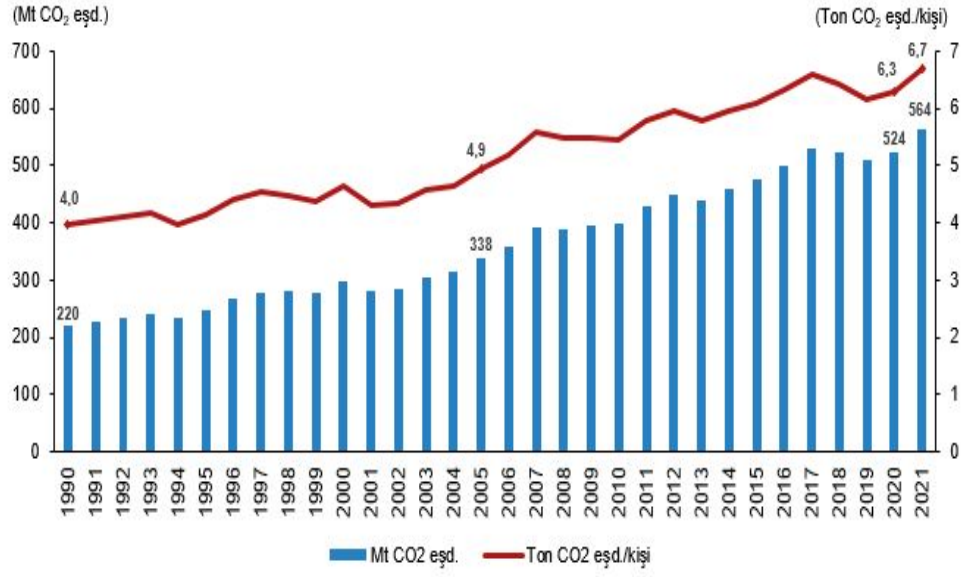
Bu çalışmaya konu olan diğer yenilenebilir enerji kaynakları jeotermal ve biyokütle enerji kaynaklarıdır. Türkiye'nin muhtemel jeotermal ısı potansiyeli 35500 Megawatt ısı (MWt)'ya elektrik üretimi potansiyeli ise 4500 Megawatt Elektrik (Mwe) olarak tahmin edilmektedir.

Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre toplanabileceği değerlendirilen atıklarımızın toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3,9 MTEP/yıl'dır. Biyokütle kaynakları orman kökenli, ziraat kökenli ve endüstri be belediye atıklarıdır. Biokütleden elde edilen ürünler ise biyogaz, biyodizel, biyoetanoldür (Çelik 2021).

### **Emisyonlar**

Karbondioksit ve metan gibi atmosferde ısınmaya sebep olan gazlar sera gazlarıdır. Bu ısınma küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine neden olur. Karbondioksit ve metan gazlarının atmosferde kalan kısmında sera gazı emisyonu şeklinde tanımlanır (Küçükkaya, 2017).

Son yıllarda çevresel problemler küresel boyutta tartışılmaktadır. Şu anda küresel emisyon azaltımlarına ilişkin uzun vadeli hedefe ilişkin uluslararası bir anlaşma bulunmamasına rağmen, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından tavsiye edildiği gibi, küresel sera gazı emisyonlarının 2050 yılına kadar 1990 seviyelerine göre %50 oranında azaltılması gerektiği konusunda genel olarak fikir birliğine varılmaktadır ( UNPP,IPCC 2007). Küresel ısınma ve iklim değişikliği, başta üçüncü dünya ülkeleri olmak üzere tüm dünyada en utanç verici ve patlayıcı sorunlardan/zorluklardan biri haline geldi. Sera gazı (GHG) emisyonlarının hacminde artışa neden olan, sanayileşme ve kentleşme sürecindeki hızlı artıştan kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) sera gazlarının önemli bir etkeni olarak kabul edilmektedir ve küresel ısınmaya katkıda bulunan en önemli faktördür (Quader vd 2022). Şekil 4' de Türkiye toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu sunulmuştur (TUIK 2024).



Şekil 4. Türkiye toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu

## ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada sistem dinamiği temelinde Türkiye 2035 projeksiyonunda enerji arzı ve karbondioksit emisyonu öngörüsü yapılmıştır. Bu simülasyon modelinde Türkiye için fosil enerji kaynakları, yenilenebilir enerji kaynakları, hidrolik enerji kaynakları ve bunun gibi ülkemize ait zaman serisi verileri kullanılmıştır. Bu parametrelerin ulaşacağı seviyeler ve bu seviyelerin sebep olacağı karbondioksit emisyon miktarının araştırılabilmesi için ekonometrik modelin kurulurken EViews 10 programı ve simülasyon için AnyLogic 8.7.2 programları kullanılmıştır. EViews programı ile fosil enerji kaynakları, yenilenebilir enerji kaynakları ve hidrolik enerji kaynaklarının üretim miktarı ile karbondioksit miktarı arasındaki regresyon denklemi tahmin edilmiş, AnyLogic 8.7.2 programı ile dört farklı senaryo için 2035 yılında için hem enerji kaynaklarının üretim miktarları hem de karbondioksit emisyon miktarı simülasyon ile belirlenmiştir.

### Veri Seti

Araştırmada kullanılan veri setleri, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumub(EPDK), The Energy Institute (TEI). British Petroleum (BP) ve Dünya bankasından elde edilmiştir. Tablo 2’de değişken adı ve kaynağı sunulmuştur. Veriler 1985 ile 2022 arasında yıllık zaman serisi verileridir. Modelde farklı fonksiyonlar için farklı aralıklar kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Modelde Kullanılan Değişkenler ve Açıklamaları

Değişken Adı	Kısaltması	Birimi	Veri Kaynağı
Enerjiden Karbondioksit Emisyonu	CE	Milyon Ton CO <sub>2</sub>	TEI
Enerji Üretimi	EU	TWh	TEI
Petrolde Enerji Üretimi	EUO	TWh	TEI
Doğalgazdan Enerji Üretimi	EUG	TWh	TEI
Kömürden Enerji Üretimi	EUC	TWh	TEI
Hidrolik Kaynaklardan Enerji Üretimi	EUH	TWh	TEI
Fosil Kaynaklardan Enerji Üretimi	EUF	TWh	TEI
Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretimi	EUR	TWh	TEI
GDP (Kişi Başı)	GDP	(Güncel US\$)	Dünya Bankası
Nüfus	N	Kişi	TEI
Enerji Tüketimi (Kişi Başı)	ET	(Kişi Başı Tüketim)	TEI
Enerji İthalatı	EIT	TWh	EPDK
Enerji İhracatı	EIH	TWh	EPDK
Rüzgardan Enerji Üretimi	EUS	TWh	BP
Güneşten Enerji Üretimi	EURU	TWh	BP
Diğer Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretimi	EUDYE	TWh	BP

Simülasyon modelinde 2010 baz yılı başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir. Karbondioksit emisyonu modelinin bulunabilmesi için 1990-2022 yıllık zaman serileri kullanılmıştır.

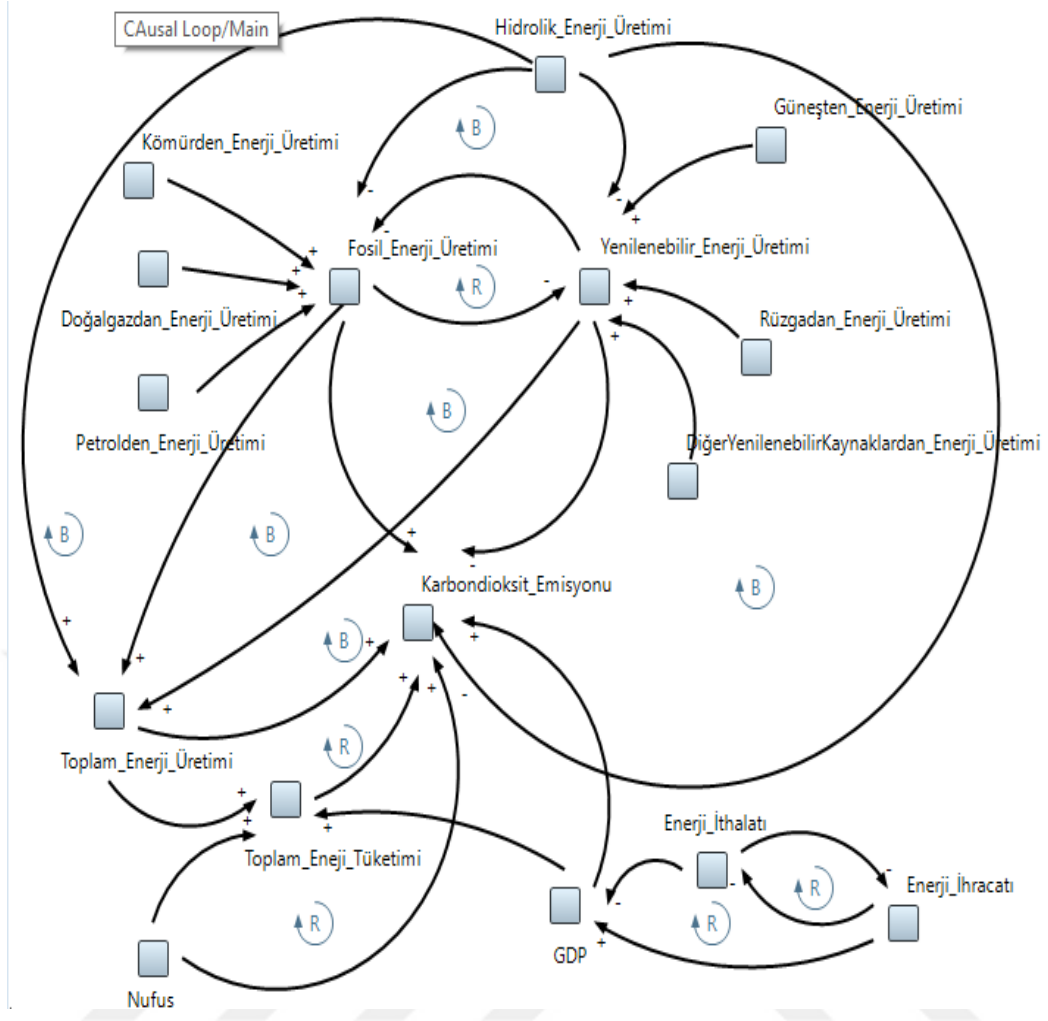
### **Enerji ve Emisyon Simülasyon Modelinin Oluşturulması**

Araştırmanın simülasyonda kullanılacak modelinin oluşturulması için gerçekleştirilen adımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Modelin amacı belirlendi.
- Modelde kullanılacak içsel ve dışsal değişkenler belirlendi.
- Modelde kullanılan değişkenlerin birbirleri ile bağlantıları belirlendi.
- İlişkiler arası etkileri ortaya koyan parametrelerin belirlenmesi için veriler elde edildi.
- Parametreler belirlendi.
- Değişkenler arasındaki değişkenlerin matematiksel ifadeleri oluşturuldu.
- Problemimize ait Nedensel Döngü Diyagramı (NDD) oluşturuldu.
- Problemimize ait Stok Akış Diyagramları çizildi.
- Tüm bilgiler AnyLogic 8.7.2 programına aktarıldı.
- Modelin geçerlilik testler yapıldı.
- Senaryolara göre model analiz edildi.
- Modelin etkinliğini belirlemek için simülasyon çıktıları ile Türkiye Ulusal Enerji Programındaki tahminler karşılaştırıldı.
- Sonuçlar sunuldu.

### **Enerji ve Emisyon Modelinin Nedensel Döngü Diyagramı**

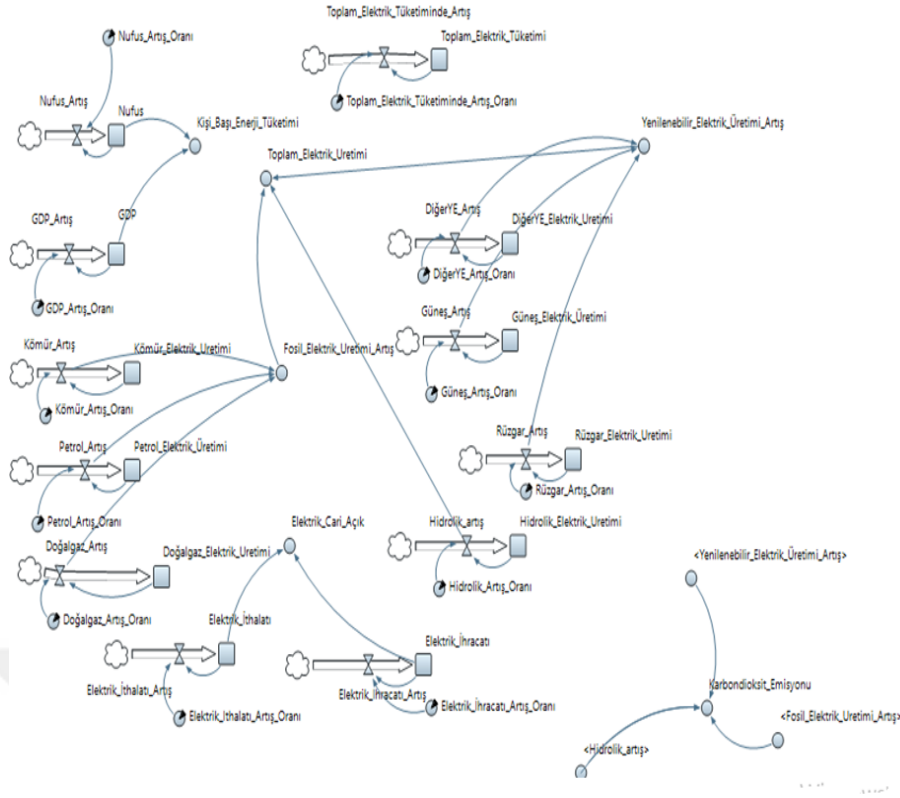
Sistem Dinamiği yaklaşımında nedensel döngü diyagramları problemin çözümü için değişkenler arasındaki ilişkilerin ve bu ilişkilerin yönlerinin belirlenmesi amacı ile çizilir. Nedensel Döngü Diyagramlarında (-) işaret negatif ilişkiyi yani değişkenlerdeki bir artış veya azalışın diğer değişkende ters yönlü bir etkiye neden olacağını, (+) işaret pozitif ilişkiyi yani değişkenlerdeki bir artış veya azalışın diğer değişkende aynı yönlü bir etkiye neden olacağını ifade etmektedir. Şekil 5'de enerji ve emisyon modelinin nedensel döngü diyagramı sunulmuştur.



**Şekil 5.** Enerji ve emisyon modelinin nedensel döngü diyagramı

### **Enerji ve Emisyon Modelinde Stok Akış Diyagramı**

Oluşturulmuş olan enerji ve emisyon modelinin çalışmasında kullanılan fonksiyonlar, değişkenler ve parametreler açıklanmıştır. Oluşturulmuş olan simülasyon modelinin Stok Akış Diyagramı da Şekil 6' da sunulmuştur.



**Şekil 6.** Enerji ve emisyon modelinin stok akış diyagramı

Modelde pekçok farklı değişken, parametre ve formül kullanılmıştır. Genel olarak parametreler artış hızları ile ifade edilmektedir. Artış hızlarını elde etmek için değişkenlerin 2010 yılı baz alınmıştır. 2010 ve 2022 yıllık zaman serisi verileri ile artış hızları Eş 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Değişken Artış hızı} = \left( \frac{X_t}{X_{t-1}} * 100 \right) - 100 \quad \text{Eş 4.1}$$

Bu formülde  $x_t$ : değişkenin t. zamandaki değeri,  $x_{t-1}$ : değişkenin bir gecikmeli değeridir. Daha sonra artış hızlarının aritmetik ortalaması alınmıştır.

Karbon dioksit emisyonu modeli için ekonometrik analiz yapılmıştır. Enerji ve Emisyon modelinden elde edilen yenilenebilir enerji üretim miktarı, fosil enerji üretim miktarı ve hidrolik kaynaklı enerji üretim miktarı ile karbon dioksit emisyonun öngörülmesi için bir ekonometrik model oluşturulmuştur. Ekonometrik modeller Eş 4.2 şeklinde gösterilmektedir. Eş 4.2 kullanılarak Eş 4.3 elde edilmiştir.

$$Y = b_0 + b_1 * x_1 + +b_2 * x_2 + +b_3 * x_3 + e \quad \text{Eş 4.2}$$

$$CE = 1.53 + 0.061 * EUR + +0.33 * EUF + +0.098 * EUHEş \quad 4.3$$

Eş 4.3 formülünde  $b_0, b_1, b_2, b_3$  regresyon parametrelerini,  $CE$ : karbon dioksit emisyon miktarını,  $EUR$ : yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji miktarını,  $EUF$ : fosil kaynaklardan

üretilem enerji miktarını,  $EUH$ : Hidrolik kaynaklardan üretilem enerji miktarını ve  $e$ : motelin hata terinimi ifae etmektedir. ( $R^2$  ve  $\bar{R}^2 = 0.98$ ). Enerji ve emisyon modelinde kullanılan stoklar ve başlangıç değeri kullanılan formüller, Tablo 3’ de sunulmuştur.

**Tablo 3.** Enerji ve Emisyon Modelindeki Stoklar

Adı	Grup	Başlangıç Değeri
Nufus	Stok	72,326,992.000
GDP	Stok	10,614.980
Kömür_Elektrik_Üretimi	Stok	55.000
Petrol_Elektrik_Üretimi	Stok	2.200
Doğalgaz_Elektrik_Üretimi	Stok	98.100
Elektrik_İthalatı	Stok	1.883
Elektrik_İhracatı	Stok	61.960
Toplam_Elektrik_Tüketimi	Stok	6.000
Güneş_Elektrik_Üretimi	Stok	0.002
Rüzgar_Elektrik_Üretimi	Stok	2.900
DiğerYE_Elektrik_Üretimi	Stok	1.000
Hidrolik_Elektrik_Üretimi	Stok	51.800

Enerji ve emisyon modelinde kullanılan Akışlar ve formülleri Tablo 4’ de sunulmuştur.

**Tablo 4.** Enerji ve Emisyon Modelindeki Akışlar

Adı	Grup	Formül
Nüfus_Artış	Akış	$Nüfus\_Artış * Nüfus\_Artış\_Oranı$
GDP_Artış	Akış	$GDP\_Artış * GDP\_Artış\_Oranı$
Kömür_Artış	Akış	$Kömür\_Artış * Kömür\_Artış\_Oranı$
Petrol_Artış	Akış	$Petrol\_Artış * Petrol\_Artış\_Oranı$
Doğalgaz_Artış	Akış	$Doğalgaz\_Artış * Doğalgaz\_Artış\_Oranı$
Elektrik_İthalat_Artış	Akış	$Elektrik\_İthalat\_Artış * Elektrik\_İthalat\_Artış\_Oranı$
Elektrik_İhracat_Artış	Akış	$Elektrik\_İhracat\_Artış * Elektrik\_İhracat\_Artış\_Oranı$
Toplam_Elektrik_Tüketimi_Artış	Akış	$Toplam\_Elektrik\_Tüketimi\_Artış * Toplam\_Elektrik\_Tüketimi\_Artış\_Oranı$
DiğerYE_Artış	Akış	$DiğerYE\_Artış * DiğerYE\_Artış\_Oranı$
Güneş_Artış	Akış	$Güneş\_Artış * Güneş\_Artış\_Oranı$
Rüzgar_Artış	Akış	$Rüzgar\_Artış * Rüzgar\_Artış\_Oranı$
Hidrolik_Artış	Akış	$Hidrolik\_Artış * Hidrolik\_Artış\_Oranı$

Enerji ve emisyon modelinde kullanılan parametreler ve dinamik değişkenler Tablo 5’de sunulmuştur.

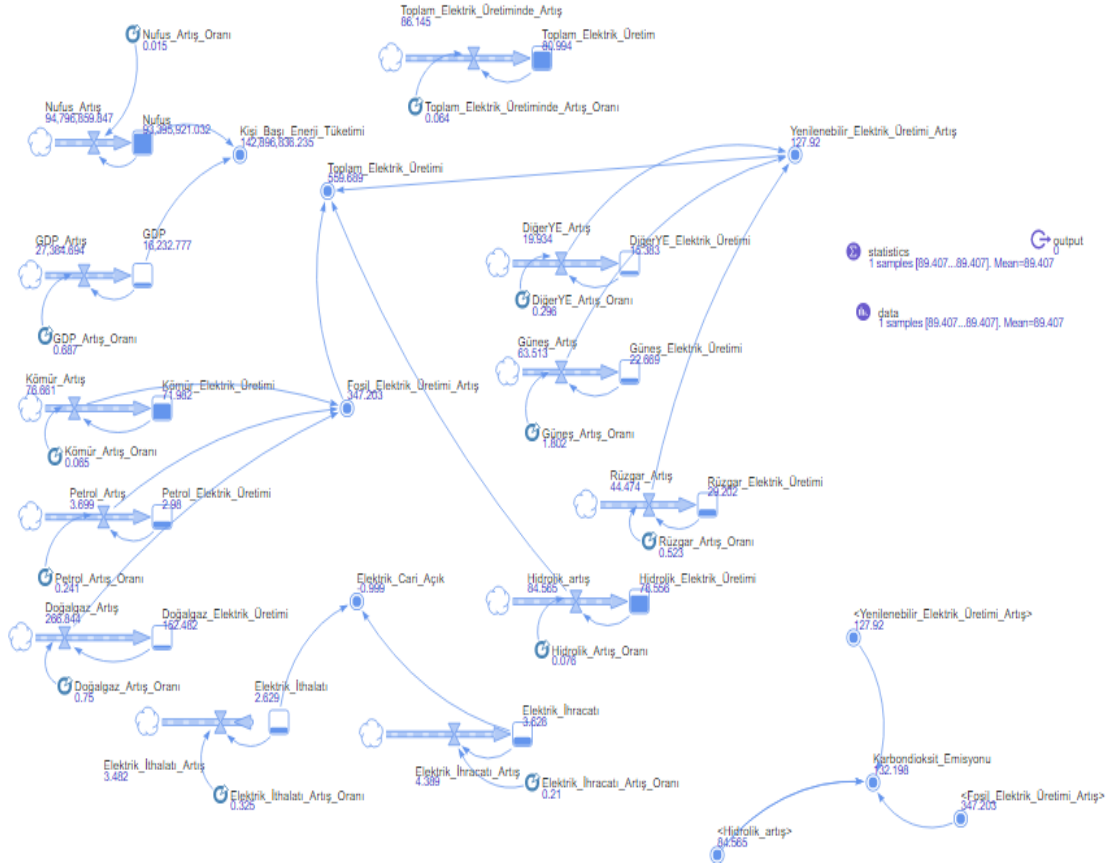
**Tablo 5.** Enerji ve Emisyon Modelindeki Parametreler ve Dinamik Değişkenler

Adı	Grup	Parametre Değeri
Nüfus_Artış_Oranı	Parametre	0.0150
GDP_Artış_Oranı	Parametre	0.0687
Kömür_Artış_Oranı	Parametre	0.0656
Petrol_Artış_Oranı	Parametre	0.2400
Doğalgaz_Artış_Oranı	Parametre	0.7500
Elektrik_İthalat_Artış_Oranı	Parametre	0.3247
Elektrik_İhracat_Artış_Oranı	Parametre	0.2099
Toplam_Elektrik_Tüketimi_Artış_Oranı	Parametre	0.0304
DiğerYE_Artış_Oranı	Parametre	0.2958
Güneş_Artış_Oranı	Parametre	1.8018
Rüzgar_Artış_Oranı	Parametre	0.5230
Hidrolik_Artış_Oranı	Parametre	0.0765
Elektrik_Cari_Açık	Dinamik Değişken	
Yenilenebilir_Elektrik_Üretimi_Artış	Dinamik Değişken	
Fosil_Elektrik_Üretimi_Artış	Dinamik Değişken	
Hidrolik_artış	Dinamik Değişken	
Karbondioksit_Emisyonu	Dinamik Değişken	

## Enerji ve Emisyon Modelinde Farklı Senaryo Analizleri

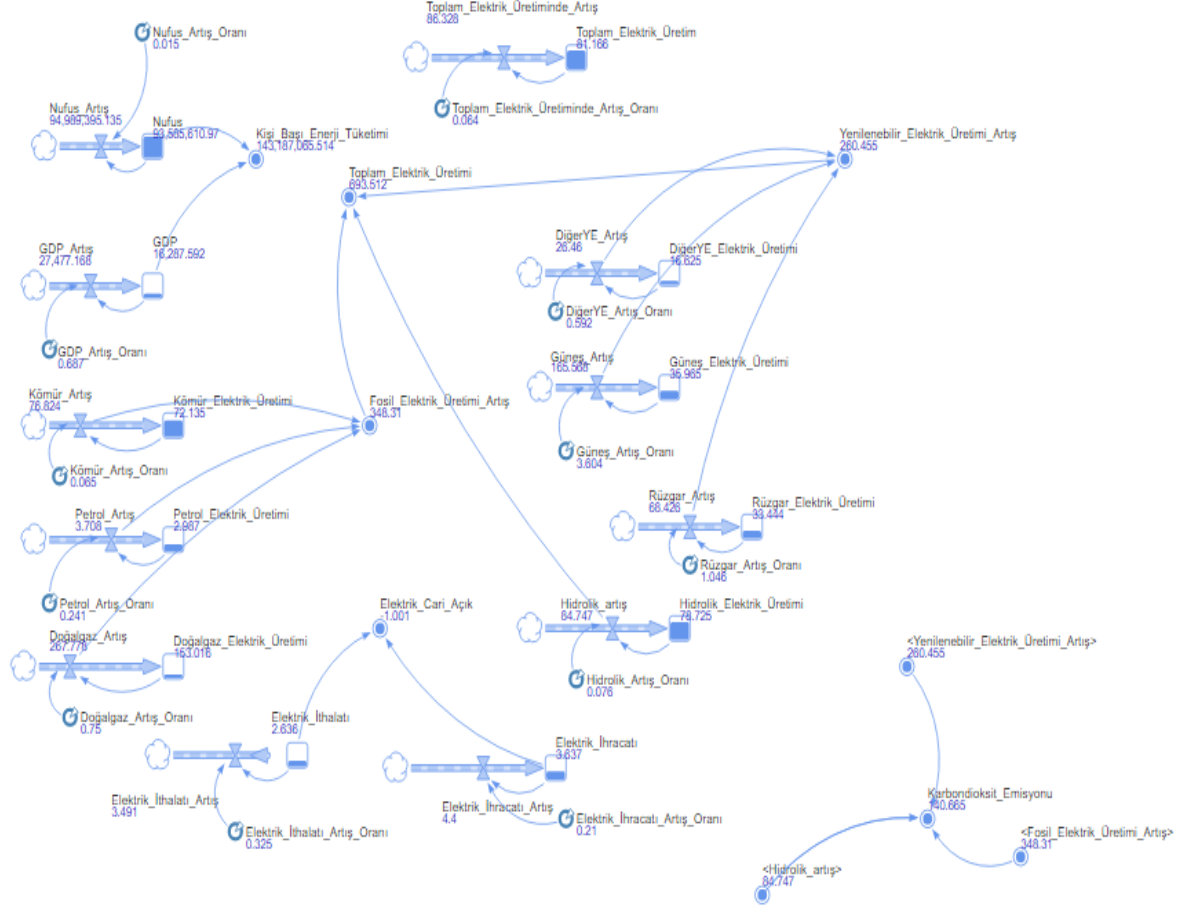
Bu araştırma da dört farklı senaryo yaklaşımı benimsenmiştir.

Birinci senaryoda: Ek (1)' de verilen veri setinden elde edilen artış hızları kullanılmıştır. Bu senaryoya göre, Türkiye fosil, hidrolik, yenilenebilir enerji üretim miktarları ve karbondioksit emisyonu bu artış hızına göre 2035 yılı için simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda Şekil 7'deki sonuca ulaşılmıştır.



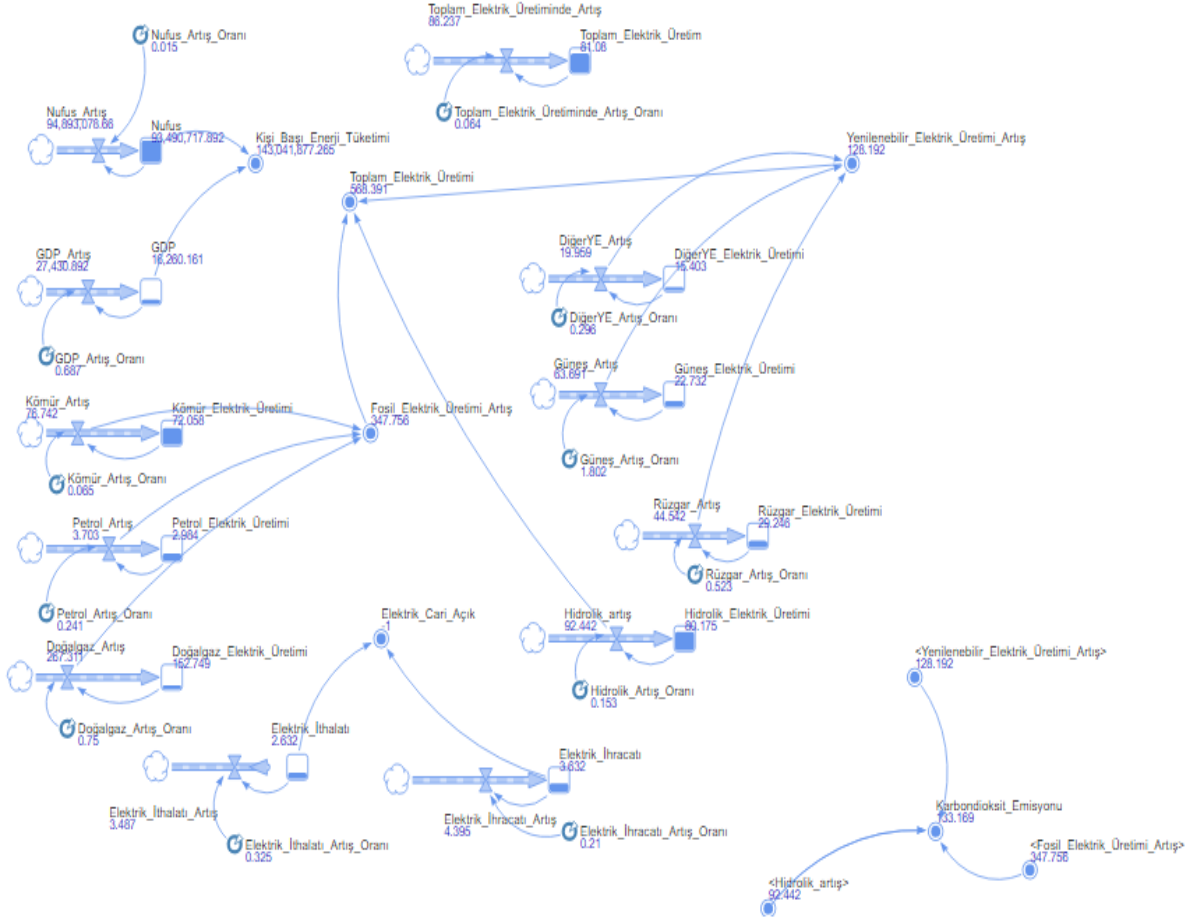
Şekil 7. Birinci Senaryo 2035 Simülasyon sonucu.

İkinci senaryoda: Ek (1)' de verilen veri setinden elde edilen artış hızları baz alınmıştır. 2010 baz yıl alınmış fakat yenilenebilir enerji yatırımları iki katına çıkarılmıştır. Dolayısı ile yenilenebilir enerji artış hızları iki katı olarak kabul edilmiştir. Yenilenebilir enerji artış hızı iki kat artarsa model 2035 yılı için simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda Şekil 8' de sunulmuştur.



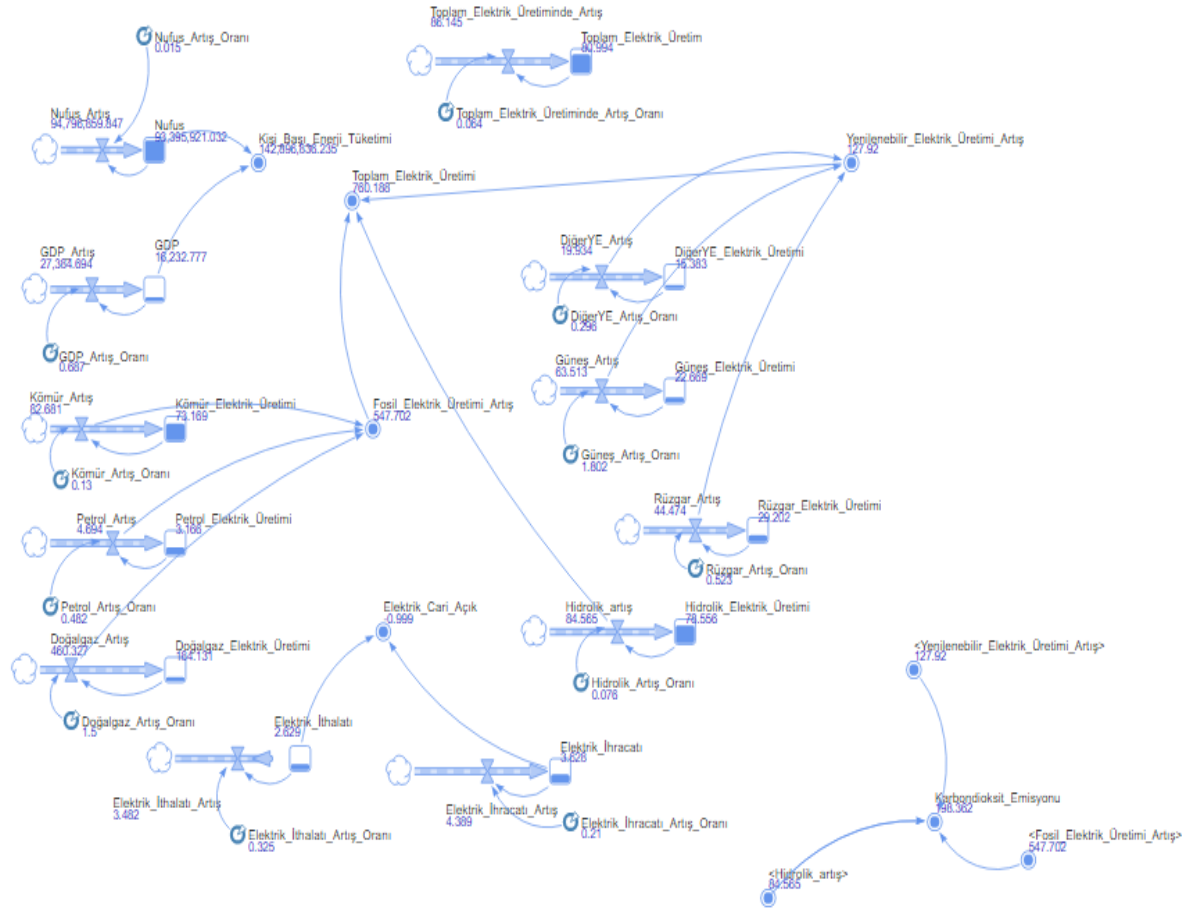
Şekil 8. İkinci senaryo 2035 Simülasyon sonucu.

Üçüncü senaryoda: Ek (1)' de verilen veri setinden elde edilen artış hızları baz alınmıştır. 2010 baz yılı alınmıştır fakat hidrolik enerji yatırımları iki katına çıkarılmıştır. Dolayısı ile hidrolik enerji artış hızları iki katı olarak kabul edilmiştir. Hidrolik enerji artış hızı iki kat artarsa model 2035 yılı için simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda Şekil 9' da sunulmuştur.



Şekil 9. Üçüncü senaryo 2035 Simülasyon sonucu.

Dördüncü senaryoda: Ek (1)'de verilen veri setinden elde edilen artış hızları baz alınmıştır. 2010 baz yıl alınmıştır fakat fosil enerji yatırımları iki katına çıkarılmıştır. Dolayısı ile fosil enerji artış hızları iki katı olarak kabul edilmiştir. Fosil enerji artış hızı iki kat artarsa model 2035 yılı için simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Dördüncü senaryo 2035 Simülasyon sonucu.

### Model Geçerliliği

Senaryo 1 çıktıları ile Türkiye ulusal enerji planındaki çıktılar 2035 yılı için karşılaştırılmıştır. Böylece Sistem Dinamiği modelinin tahmin doğruluğunu ve istikrarını test edilmiştir. 2035 yılı için kömür, doğalgaz ve petrolden üretilen fosil kaynaklı enerji miktarı, hidrolik enerji miktarı ve rüzgâr, güneş ve diğer yenilenebilir kaynaklı üretilen enerji miktarları için Ortalama Yüzde Hata (MAPE) değeri hesaplanmış ve Tablo 6'da sunulmuştur. Ortalama yüzde hata formülü Eş 4.4. de sunulmuştur.

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| * 100 \quad \text{Eş 4.4}$$

Burada At, Ft ve n gerçek değer, tahmin değeri ve sırasıyla tahminlerin oluşturulduğu dönem sayısıdır (Jeong vd 2009). Bu model için Türkiye Ulusal Enerji Planına bağlı olarak sunulan MAPE değerleri Tablo 6’ da sunulmuştur.

**Tablo 6.** MAPE Sonuçları

Kaynak Türü	Simülasyon 2035 Tahmin Sonucu (Twh)	ETKB Ulusal Enerji Planı 2035 Tahmini (Twh)	MAPE (%)
Güneş	63,513	84	24,39
Rüzgar	44,747	90,1	50,34
Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları	19,934	16,20	-23,05
Hidrolik Enerji (Twh)	84,565	87,9	3,79
Kömür			
Doğalgaz	347,20	173,7	-26,19
Petrol-Km-Doğalgaz			

Bu sonuçlara göre Diğer yenilenebilir enerjikaynakları için yaklaşık %23, Güneş Enerjisi retim miktarında %24, fosil kaynaklar için %26 sapma ile oldukça iyi bir tahmin yapılmıştır. Yine hidrolikte yaklaşık %3 sapma ile kullanılan modelin nekadard etkin bir model olduğu ortaya koymuştur.

Rüzgâr enerjisindeki sapma %50.34 il en etkin olmayan tahmin kaynağıdır. Bu sonucun rüzgâr enerjisinde Türkiye’deki hızlı değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. 2002 yılında 19 Mw olan rüzgâr enerjisi kurulu gücü, 2023 yılında 12 Gw’ a yükselmiştir. Türkiye rüzgâr kurulu güçte Avrupa’ da beşinci Dünyada 12. sıradadır.

## Tartışma

Sistem Dinamiği uygulaması sonucunda kömür, petrol ve doğalgazdan oluşan fosil yakıt grubu, hidrolik enerji ve rüzgar, güneş ve diğer yenilenebilir kaynaklardan oluşan yenilenebilir enerji grubu ve karbondioksit emisyonu için dört farklı senaryo sonucu analiz edilmiştir. Bu senaryolar ve sonuçları Tablo 7’ de sunulmuştur.

**Tablo 7.** Simülasyona Ait Senaryo Sonuçları

SENARYO		Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
Senaryo Açıklaması		Artış Oranları İle	Yenilenebilir Enerji Artış Hızı İki Kat Artarsa	Hidrolik Artış Hızı İki Kat Artarsa	Fosil Enerji Artış Hızı İki Kat Artarsa
YEK ENERİ ÜRETİM MİKTARLARI (Twh)	GÜNEŞ	63.513	<b>165.568</b>	63.513	63.513
	RÜZGAR	44.747	<b>68.426</b>	44.747	44.747
	DİĞER YENİLENEBİLİR ENERJİ	19.934	<b>26.46</b>	19.934	19.934
HİDROLİK ENERJİ (Twh)		84.565	84.565	<b>92.442</b>	84.565
FOSİL KAYNAKLI ENERİ ÜRETİM MİKTARLARI (Twh)	KÖMÜR	76.661	76.661	76.661	<b>82.681</b>
	DOĞALGAZ	266.844	266.844	266.844	<b>460.327</b>
	PETROL	3.699	3.699	3.699	<b>4.694</b>
EMİSYON (Milyon Ton)	KARBONDİOKSİT EMİSYONU	<b>132.198</b>	<b>140.665</b>	<b>133.169</b>	<b>198.362</b>

## SONUÇ

Birinci senaryoda 2035 yılı için de yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretmek için tek başına kullanılmayacağı anlaşılmaktadır.

İkinci senaryoda yenilenebilir kaynakların artış hızı iki katına çıkarılsa da hala fosil yakıtlarla üretilen enerji miktarına yetişmediği fakat tek başına fosil kaynaklardan doğalgaz kaynaklı üretim miktarına yaklaşıldığı görülmektedir.

Üçüncü senaryoda hidrolik artış hızının 9 Twh lik bir artışa sebep olacağı anlaşılmaktadır.

Dördüncü senaryo sonucunda da kömür ve petrol fosil yakıtlardan üretilen enerji miktarı çok artmazken, doğalgaz neredeyse iki katına çıkacaktır.

Bu sonuçlar Türkiye enerji politikaları için kullanışlı bir model önerisi sağlar. Gelecek çalışmalar için farklı senaryolar aynı model kullanılarak analiz edilebilir. Ayrıca sistemin elemanları genişletilerek farklı etkileşimlere göre yeni modeller de geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Al-Qahtani, F.H. ve Crone, S.F., (2013). Multivariate k-nearest neighbour regression for time series data – A novel algorithm for forecasting UK electricity demand, *International Joint Conference on Neural Networks*, 4-9, Dallas.
- Amadei, B. (2015). *A Systems Approach to Modeling Community Development Projects*, Momentum Press
- An, N., Zhao, W., Wang, J., Shang, D. & Zhao, E. (2013). Using multioutput feedforward neural network with empirical mode decomposition based signal filtering for electricity demand forecasting, *Energy*, 49, 279-288.
- Anonim, Hidroelektrik Enerji ve Türbinler”.  
[https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/elektrikelektronikmuhendisligi/Editor/DERS/YElkEnrUrt/Hidroelektrik\\_Enerji\\_T%C3%BCrbinleri.pdf](https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/elektrikelektronikmuhendisligi/Editor/DERS/YElkEnrUrt/Hidroelektrik_Enerji_T%C3%BCrbinleri.pdf)
- Ansari, N. ve Seifi, A. (2013). A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO2 emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios, *Energy Policy*, 58, 75-89.
- Ak, M. F. (2012). *A System Dynamics Analysis Of Energy Dependency and Consumption in Turkey*, Işık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Avila, F., Saez, D., Jimenez-Estevéz, G., Reyes, L. & Nunez, A., (2013). Fuzzy demand forecasting in an predictive control strategy for a renewableenergy based microgrid, *European Control Conference*, 17-19. , Zürich, Switzerland.
- Blumberga D., Blumberga A., Barisa A. & Rosa M., Lauka D., (2016). Modelling the latvian power market to evaluate its environmental long-term performance. *Appl Energy*,(Supplement C):1593–600.
- British Petroleum (BP). bp Energy Outlook 2023 edition.  
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf>.
- Bugala, A., Zaborowicz, M., Boniecki, P., Janczak, D., Koszela, K., Czekala, W. ve Lewicki, A. (2018). Short-term forecast of generation of electric energy in photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81. 306-312.
- Currie, D.J., Smith, C. & Jagals, P. (2018). The application of system Dynamics modelling to environmental health decision-making and policy - a scoping review. *BMC Public Health*, 18(402), 2-11.
- Çelik, M. (2021). *Sistem Dinamikleri Yaklaşımı İle Biyoenerji Kaynak Kullanımındaki Artışların Gıda Güvenliği, Enerji Güvenliği ve Çevre Üzerine Etkileri Türkiye Örneği*, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü].
- Dilek, G. (2019). *A System Dynamic Macroeconomic Model for an Inquiry of income Inequality And Environmental Impact*, Bogaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Dünya Gazetesi (2022). İthal enerjinin faturası: 80,5 milyar dolar.  
<https://www.dunya.com/ekonomi/ithal-enerjinin-faturasi-805-milyar-dolar-haberi-677965>

- Efendi, R., Ismail, Z. & Deris, M.M. (2015). A new linguistic out-sample approach of fuzzy time series for daily forecasting of Malaysian electricity load demand, *Applied Soft Computing*, 28, 422-430.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı. [https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye\\_Ulusal\\_Enerji\\_Plan%C4%B1.pdf](https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf).
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2024). Bilgi Merkezi. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>.
- Enerji Piyasaları Düzenleme Kurulu (EPDK) (2024). Doğal Gaz Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-94/dogal-gazyillik-sektor-raporu>.
- Enerji Piyasaları Düzenleme Kurulu (EPDK2) (2024). Elektrik Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-24/elektrikyillik-sektor-raporu>.
- Es, H. A., Kalender, F.Y. ve Hamzaçebi, C., (2014). Yapay Sinir Ağları ile Türkiye Net Enerji Talep Tahmini, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 495-504.
- ExxonMobile. (2018) Outlook for Energy: A View to 2040. <https://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2018/2018-outlook-for-energy.pdf>.
- Gökay, B. (2019). *2030 Yılında Türkiye’de Yeşil Enerji Kullanım Oranlarının Tahmin Edilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*].
- Gül, I. A. (2019). Assess And Evaluate Risks of RESInvestment Using System Dynamics Approach, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Günay, M.E., (2016). Forecasting annual gross electricity demand by artificial neural networks using predicted values of socio-economic indicators and climatic conditions: Case of Turkey, *Energy Policy*, 90, 92-101.
- Gürbüz, F., Öztürk, C. & Pardalos, P., (2013). Prediction of electricity energy consumption of Turkey via artificial bee colony: a case study, *Energy Systems*, 4, 289-300.
- Hamzaçebi, C. ve Es, H.A., (2014). Forecasting the annual electricity consumption of Turkey using an optimized grey model, *Energy*, 70, 165-171.
- Hassani, H., Abdollahzadeh M., Iranmanesh, H. ve Miranian, A., (2014). A Self-Similar Local Neuro-Fuzzy Model for Short-Term Demand Forecasting, *Journal of Systems Science and Complexity*, 27(1), 3-20.
- He, Y., Jiao, J., Chen, Q., Ge, S., Chang, Y. & Xu, Y., (2017). Urban long term electricity demand forecast method based on system Dynamics of the new economic normal: The case of Tianjin, *Energy*, 133,9 -22.
- Hsu C.W., 2012. Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. *Appl Energy*, 100(Supplement C):205–217.
- IPCC. Climate change (2007). the physical science basis. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, 2011. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S., von Stechow, C. (Eds.), Summary for Policymakers: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.
- International Energy Agency (IEA) (2024). Energy System. <https://www.iea.org/energy-system>

- International Energy Agency (IEA) (2017). CO2 Emissions from Fuel Combustion-Highlights. <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2017>.
- Jäger T., Schmidt S., Karl U., 2009. A system dynamics model for the German electricity market – an analysis of economic and environmental policy related impacts on electricity prices and CO2 emissions. In: International conference on policy modeling, Ottawa, Canada; June 24–26.
- Jimenez, M., Franco, C.J., (2016). Dyner I. Diffusion of renewable energy technologies: the need for policy in Colombia. *Energy*, 111:818–29.
- Jeong, S.J., Kim, K.S. & Park, J.W. (2009). CO<sub>2</sub> emissions change from the sales authorization of diesel passenger cars: Korean case study. *Energy Policy* 37, 2630e2638
- Flynn H. vd (2010). System Dynamics Modeling of the Massachusetts SREC Market, *Sustainability*, 2, 2746-2761.
- Feng, Y.Y., Chen, S.Q. & Zhang, L.X. (2013). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China, *Ecological Modelling*, 252, 44-52.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: M.I.T. Press.
- Forrester, J. W. (1969). *Principles of Systems*. Cambridge, MA: M.I.T. Press.
- Karadede, Y., Özdemir, G. & Aydemir, E., (2017). Breeder hybrid algorithm approach for natural gas demand forecasting model, *Energy*, 141, 1269-1284.
- Koç, E., Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu–Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 54 (639), 32-44.
- Kim D. H., (1999). *Introduction to Systems Thinking*. 1999 by Pegasus Communications, Inc.
- Küçükaya, E. (2017). Enerji Portalı. Enerji Portalı: <https://www.enerjiportali.com/sera-gazinedir/>.
- Liu, X., Mao, G., Ren, J., Li, R.Y.M, Guo, J. & Zhang, L., (2015). How might China achieve its 2020 emissions target? A scenario analysis of energy consumption and CO2 emissions using the system dynamics model, *Journal of Cleaner Production*, 103, 401-410.
- Liu, X. & Zeng, M. (2017). Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 782–788.
- Mallick, R. B. (2023). *System Dynamics for Complex Problems in Pavement Engineering*, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- Melikoğlu, M., (2013). Vision 2023: Forecasting Turkey’s natural gas demand between 2013 and 2030, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 22: 393-400.
- Morcillo J.D. , Franco C.J., Angulo F. (2018). Simulation of demand growth scenarios in the Colombian electricity market: An integration of system dynamics and dynamic systems. *Applied Energy*, 216, 504–52.
- Maruyama, M. (1963). The second cybernetics: Deviation-amplifying mutual causal processes. *American Scientist*, 5(2), 164-179.
- Morecroft, J. D. W. (2007). *Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach*. Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Nazari, H., Kazemi, A., Hashemi, M-H., Sadat, M.M. ve Nazari, M., (2015). Evaluating the performance of genetic and particle swarm optimization algorithms to select an

- appropriate scenario for forecasting energy demand using economic indicators: residential and commercial sectors of Iran, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 6(4): 345-355.
- Paşaoğlu, G. (2006). A Simulation Model For The Long-Term Analysis Of Decentralized Electricity Markets, Bogaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Petit M., Finon D. & Janssen T. (2017). Capacity adequacy in power markets facing energy transition: a comparison of scarcity pricing and capacity mechanism. *Energy Pol*, 103: 30–46.
- Qader, M. R., Khan, S. Kamal, M., Usman, M. & Haseeb, M. (2022). Forecasting carbon emissions due to electricity power generation in Bahrain, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 17346–17357.
- Raczynski, S. (2023). *Models for Research and Understanding: Exploring Dynamic Systems, Unconventional Approaches, and Applications.* Springer.
- Robalino-Lopez, A., Mena-Nieto, A. & Garcia-Ramos, J.E. (2014). System Dynamics modeling for renewable energy and CO2 consumption emissions: A case study of Ecuador, *Energy for Sustainable Development*, 20, 11-20.
- Ruiz, L.G.B., Rueda, R., Cuellar, M.P. & Pegalajar, M.C., (2018). “Energy consumption forecasting based on Elman neural networks with evolutive optimization”, *Expert Systems With Applications*, 92, 380-389.
- Saavedra M., M. R., Hora de O. Fontes, C. & M. Freires, G. G. (2018), Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 247–259
- Şenaras A. E. ve İnanç Ş., 2022. Sistem Dinamiği Modeli ile Elektrik Enerjisi Piyasasının İncelenmesi, *İşletme Araştırmaları Dergisi Journal Of Business Research-Turk*, 14(4), 2796-2814.
- Sisodia, G.S., Sahay, M. & Singh, P., (2016). System dynamics methodology for the energy demand fulfillment in India: A preliminary study, *Energy Procedia*, 95, 429-434.
- Senge, P.M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*, Currency Doubleday, New York, NY.
- Senge, P. (1994). *The fifth discipline: The art & practice of the learning organization.* Doubleday, New York, NY.
- Sterman, J.D. (2006). Learning from evidence in a complex World, *Am J Public Health*. 96(3), 505–14.
- Sterman, J. (2014). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world.* New York: Irwin/McGraw-Hill
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.* Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- System Dynamics Society (2024). <https://systemdynamics.org/what-is-system-dynamics/>
- Tecim, V. (2004). Sistem Yaklaşımı Ve Soft Sistem Düşüncesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*. 19(2), 75-100.
- The Energy Institute (TEI). <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- Timma L., Bariss U., Blumberga A. & Blumberga D. (2015). Outlining innovation diffusion processes in households using system dynamics. Case study: energy efficiency lighting *Energy Procedia*, 75, 2859 – 2864.

- Tutun, S., Chou, C-A. & Canıyılmaz, E. (2015). A new forecasting framework for volatile behaviour in net electricity consumption: A case study in Turkey, *Energy*, 93, 2406-2422.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK) (2024). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>.
- Ulkat, D. (2020). Long-Term Impacts Of Variable Renewable Energy Sources (Vres) On Electricity Generation In Turkey: A Systems Modeling Approach, Bogaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- UNDP(2007). (Human development report 2007/2008, fighting climate change: human solidarity in a divided world. New York: United Nations Development Program
- Uzlu, E., Akpınar, A., Öztürk, H.T., Nacar, S. & Kankal, M., (2014). Estimates of hydroelectric generation using neural networks with the artificial bee colony algorithm for Turkey, *Energy*, 69, 638-647
- Vogstad, K. (2005). Combining system dynamics and experimental economics to analyse the design of Tradable Green Certificate. *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences*
- Voronin, S. ve Partanen, J. (2014). Forecasting electricity price and demand using a hybrid approach based on wavelet transform, ARIMA and neural networks, *International Journal of Energy Research*, 38. 626-637.
- Wu, Z. ve Xu, J., (2013). Predicting and optimization of energy consumption using system dynamics-fuzzy multiple objective programming in World heritage areas, *Energy*, 49: 19-31.
- Xiao, B., Niu, D. ve Guo, X. (2016). Can China achieve its 2020 carbon intensity target? A scenario analysis based on system Dynamics approach, *Ecological Indicators*, 71. 99-112

## ÖZGEÇMİŞ

<b>Kişisel Bilgiler</b>	
Adı Soyadı	Özlem KARADAĞ ALBAYRAK
Doğum Yeri ve Tarihi	
<b>Eğitim Durumu</b>	
Lisans Öğrenimi	
Y. Lisans Öğrenimi	
Doktora	
Bildiği Yabancı Diller	
<b>İletişim</b>	
<b>Tarih</b>	