

**Bu çalışma kapsamında herhangi bir etik kurul onayı ve/veya yasal/özel izin gerekmemiştir.*

**TÜRKİYE'NİN %50 YENİLENEBİLİR ENERJİ SENARYOSU İLE BİR
ENERJİ SİSTEMİ SİMÜLASYONU***

Emre LEBLEBİCİOĞLU⁽¹⁾
Egemen SULUKAN² Tanay
Sıdkı UYAR³

¹*Marmara Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
leblebicioglu.emre@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9974-3645*

²*Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Makine Mühendisliği ,
İstanbul, Türkiye,
esulukan@dho.edu.tr; ORCID: 0000-0003-1138-2465*

³*Beykent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
tanayuyar@beykent.edu.tr; ORCID: 0000-0002-0960-1203*

Alındı: 30.11.2020

Kabul edildi: 18.01.2021

ÖZET

Elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımının azaltılması ülkeler için zorlu bir mücadeledir. Dünya elektrik üretmek için hala fosil yakıtlara bağımlıdır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin elektrik üretimindeki payının artırılması, daha düşük CO2 emisyonları, şebeke esnekliği, ademi merkezîyetçilik gibi birçok açıdan önemlidir. Günümüzde birçok ülke enerji politikalarını ve stratejilerini daha fazla yenilenebilir ve yerli kaynak kullanmak üzere şekillendirmektedir. Türkiye de bu ülkelerden biridir ve elektrik üretiminde daha fazla yerli kaynak kullanma hedefine sahiptir. Türkiye genel olarak elektrik üretiminde ithal enerji kaynaklarının kullanımını azaltmayı hedeflemektedir. Dolayısıyla bu çalışma, EnergyPLAN modeli aracılığıyla %50 yenilenebilir enerji sistemi (YEK) simülasyonunun elektrik üretimindeki payını araştırmaktadır. Enerji sistemi analizi, 2023 yılında %50 yenilenebilir enerji senaryosunda gerçekleştirilmiştir. Bu senaryonun ana hedefi, elektrik üretiminde %50 yenilenebilir enerji sistemi gerçekleştirmektir. Referans yıl 2018'dir ve %50 YEK senaryosunun sonuçları referans senaryo ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın ana odak noktası, 2018 ve 2023 yılları için senaryolar arasındaki karbon emisyonları, YEK payı ve maliyet unsurlarını araştırmaktır.

Anahtar Kelimeler: *Enerji Sistemi Simülasyonu, EnergyPLAN, Yenilenebilir .*

50 ENERJİ SENARYOSU İLE TÜRKİYE'NİN ENERJİ SİSTEM SİMÜLASYONU

ÖZ

Elektrik üretiminde fosil yakıt kullanımının düşürülmesi zor bir süreçtir. Tüm dünya hala elektrik üretiminde fosil yakıtlara bağlı durumdadır. Güç üretiminde yenilenebilir enerji payının artırılması, CO₂ emisyonunun düşürülmesi, şebeke esnekliğinin sağlanması ve merkezi olmayan elektrik üretimi gibi birçok yönden avantaj sağlamaktadır. Günümüzde birçok ülke enerji stratejilerini ve politikalarını daha fazla yerli ve yenilenebilir kaynakların kullanımı şekillendirmektedir. Türkiye de bu ülkelerden birisidir ve elektrik üretiminde daha fazla yerli kaynak kullanımı için etkili politikalara sahiptir. Türkiye genel olarak elektrik üretiminde ithal enerji kaynaklarının kullanımını düşürmeyi hedeflemektedir. Bu makalede EnergyPLAN modeli ile 2023 için %50 yenilenebilir enerji sistemi simülasyonu incelenmiştir. Enerji sistem analizi, 2023 için %50 yenilenebilir enerji sistem senaryosu üzerine kurulmuştur. Bu senaryodaki temel hedef, elektrik üretiminde %50 yenilenebilir enerji kullanımını gerçekleştirmektir. Bu çalışmada referans yıl ise 2018 olarak seçilmiştir ve 2023 senaryosunun sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmanın odağı 2018 ve 2023 senaryolarının yenilenebilir enerji payı, CO₂ emisyonu ve maliyetler yönünden incelenmesidir.

Anahtar Kelimeler: *Enerji Sistem Simülasyonu, EnergyPLAN, Yenilenebilir Enerji.*

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımını azaltmak için önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması enerji bağımsızlığı ve daha düşük CO₂ emisyonu sağlamaktadır. Dünya elektrik üretiminde hala fosil yakıtlara bağımlıdır. Türkiye büyük bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen, elektrik üretiminde fosil yakıtların payı hala yüksektir. Elektrik üretiminde fosil yakıtların yüksek oranda kullanılması Türkiye için ekonomik ve çevresel sorunlara da neden olmaktadır. Türkiye elektrik üretmek için önemli miktarda doğal gaz ve kömür ithal etmektedir. Enerji kaynaklarının ithal edilmesi enerji bağımlılığını artırmakta ve ekonomik sonuçlara neden olmaktadır. 2018 yılında fosil yakıtların elektrik üretimindeki payı aşağı yukarı %70'tir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018). Fosil yakıtların kullanımını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmak en iyi çözüm gibi görünse de, Türkiye gibi enerji tüketimi yüksek olan ülkeler için kısa vadede tüm enerji talebini karşılamak için yeterli değildir. Bu nedenle nükleer enerji de dikkate alınması gereken bir diğer seçenektir.

Bu makalede, 2023 yılı için %50 yenilenebilir enerji senaryosu ana hedeftir. 50 YEK senaryosu nükleer ve yerli kömür kullanımını da içermektedir. Doğal gaz kullanımı tamamen göz ardı edilmemiş ancak azaltılmıştır. Bu çalışma için 2023 yılı seçilmiştir çünkü Türk hükümetinin bu yıl için iddialı hedefleri vardır. Hükümet, yerli olmayan enerji kaynaklarının kullanımını azaltmayı ve daha fazla yerli ve yenilenebilir kaynak kullanmayı hedeflemektedir. Türkiye'nin 2023 yılına kadar elektrik üretiminde %38,8 YEK payına ulaşması ve doğal gaz payını %20,7'ye düşürmesi öngörülmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, 2019). Bu çalışma, bu hedefleri göz önünde bulundurarak 2023 senaryosunu incelemektedir. Ayrıca 2018 yılı referans yıl olarak seçilmiş ve bu yıl için bir referans senaryo oluşturulmuştur. Bu çalışma, 2018'den 2023'e kadar YEK payını artırmak için bir yol göstermektedir. Ayrıca kurulu kapasite artışları, CO₂ emisyonları ve ekonomik analizler bu makalenin temel konularıdır.

Enerji sistemi simülasyonları ve analizleri, saatlik enerji sistemi simülasyon yazılımı olan EnergyPLAN kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EnergyPLAN'ın temel amaçlarından biri, ulusal veya bölgesel enerji sistemi planlaması ve politika stratejileri tasarımlarına yardımcı olmaktır. Bu yazılım şunları kullanır

Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi Simülasyonu

Bir yıl içinde saatlik enerji sistemi simülasyonları ve teknik ve ekonomik analizlere dayanmaktadır. EnergyPLAN modeli kullanılarak Türkiye'nin 2018 ve 2023 yılları için bir enerji sistemi simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar bu makalede tartışılmıştır.

Makedonya, Danimarka, İrlanda ve Portekiz için EnergyPLAN tarafından farklı çalışmalarda ülke modelleri yapılmıştır.

"2050 yılında %100 yenilenebilir enerji sistemi" başlıklı çalışma: Makedonya örneği" (2012) başlıklı çalışma, EnergyPLAN tarafından yapılmış bir ülke modelidir. Bu makale, EnergyPLAN modelini kullanarak Makedonya'da %100 yenilenebilir enerji sistemi uygulamasını araştırmaktadır. Enerji sistemleri simülasyonu ve analizleri, 2030 ve 2050 yılları için tasarlanmış iki yenilenebilir enerji senaryosu için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ilk senaryosu 2030 yılı için %50 yenilenebilir enerji sistemidir. İkinci senaryo ise 2050 yılı için %100 yenilenebilir enerji sistemidir (Čosić, Krajačić & Duić, 2012).

H. Lund ve B. V. Mathiesen'in (2009) araştırmasında, 2030 ve 2050 yıllarında Danimarka için %100 yenilenebilir enerji sistemlerinin bir enerji sistemi analizi EnergyPLAN tarafından uygulanmıştır. Enerji sistemleri analizi yöntemi, esnek enerji sistemlerinin tasarımına yol açan saat saat bilgisayar simülasyonlarını içermektedir. Sonuçlar, iki hedef yıl için detaylı enerji sistemi tasarımları ve dengeleridir: %50 enerji ile 2030 yılı ve biyokütle ve güneş enerjisi, rüzgar ve dalga kombinasyonundan %100 yenilenebilir enerji ile 2050 yılı (Lund & Mathiesen, 2009).

"İrlanda için %100 yenilenebilir enerji sistemine doğru ilk adım" (2010) başlıklı makale, İrlanda için %100 yenilenebilir enerji sistemi yolunu sunmaktadır. Bu çalışmada enerji sistemi analiz aracı olarak EnergyPLAN kullanılmıştır. Öncelikle, mevcut İrlanda enerji sisteminin bir referans senaryosu oluşturulmuş ve her biri biyokütle, hidrojen ve elektrik gibi çeşitli kaynaklara odaklanan üç farklı %100 yenilenebilir enerji sistemi oluşturulmuştur. Ardından İrlanda için %100 yenilenebilir enerji sistemi modeli oluşturulmuştur (Connolly, Lund, Mathiesen & Leahy, 2011).

Başlığı "Portekiz elektrik sisteminde yenilenebilir enerji senaryoları" olan bir çalışma, Portekiz elektrik sistemi için yenilenebilir enerji senaryoları konusunu ele almaktadır.

Elektrik sektörü, Portekiz sistemi için farklı olası gelecek stratejilerini analiz etmektedir. Bu stratejilerin her biri beklenen elektrik tüketimi ve yenilenebilir payına göre karakterize edilmiş ve nihai amaç olası bir %100 YEK senaryosunu analiz etmek olmuştur. EnergyPLAN, her bir senaryoyu bir yıl boyunca simüle etmek için kullanılmıştır. 100 YEK senaryosunun teorik olarak mümkün olduğu görülmüştür ancak yaz sezonunda herhangi bir kesinti olmaması için sistemin toplam kapasitesinde önemli bir artış gerekecektir (Fernandes & Ferreira, 2014).

Yukarıda vurgulanan ulusal çalışmalar göz önünde bulundurularak bu çalışma Türkiye için şekillendirilmiştir. Bu çalışmanın teknik ve ekonomik sonuçları Türkiye'deki karar vericilere farklı bir bakış açısı sağlayabilir.

2. ARKA PLAN

2.1. Türkiye'nin Enerji Görünümü

Türkiye enerji ihtiyacını linyit, taş kömürü, ithal kömür, doğal gaz, petrol ve yenilenebilir kaynaklar gibi farklı kaynaklardan karşılamaktadır. Türkiye'nin enerji üretimi, başta kömür ve doğal gaz olmak üzere fosil yakıtlara dayanmaktadır. Dahası, Türkiye'nin enerji talebi her geçen gün artmakta ve bu da artan yakıt bağımlılığı gibi bazı endişeleri beraberinde getirmektedir. Bu nedenle Türkiye, ülkenin enerji bağımsızlığını sağlayacak iddialı enerji politikaları belirlemiştir.

2.1.1. Türkiye'nin Elektrik Tüketimi

Türkiye büyüyen bir ülkedir ve sanayileşme ve nüfus artışı nedeniyle enerji tüketimi her yıl artmaktadır. Türkiye'nin birincil elektrik tüketimi 2018 yılında %2,2 oranında artarak 304 TWh'ye, elektrik üretimi ise %2,5 oranında artarak 304,8 TWh'ye yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018). Ayrıca, elektrik tüketiminin yıllık %4,3 oranında artması ve baz senaryoya göre 2023 yılında 375,8 TWh'e ulaşması beklenmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, 2019).

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

2.1.2. Türkiye'nin Elektrik Üretimi

Türkiye, toplam elektrik tüketimini karşılamak için fosil yakıtlar ve yenilenebilir kaynaklar gibi çeşitli enerji kaynaklarından elektrik üretmektedir. Türkiye 2018 sonunda enerji talebinin %37,8'ini kömür, %30,3'ünü doğal gaz, %19,7'sini hidroelektrik, %6,5'ini rüzgâr, %2,6'sını güneş, %2,4'ünü jeotermal ve %1,3'ünü diğer kaynaklardan karşılamıştır. Türkiye'nin kurulu güç kapasitesi 2018 yılı sonu itibarıyla 88.551 MW'a ulaşmıştır. Bu kapasitenin %31'i hidroelektrik, %29,5'i doğal gaz, %22,2'si kömür, %7,9'u rüzgâr, %1,4'ü jeotermal, %5,7'si güneş ve %1,4'ü diğer kaynaklardan oluşmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018).

2.2. 2023'te Tahmini Enerji Görünümü

2023 yılı Türkiye Cumhuriyeti'nin 100^{üncü} yılıdır. Dolayısıyla, Türkiye'nin 2023 yılına kadar ulaşması gereken birçok hedef bulunmaktadır. Bu çalışmada, %50 YEK senaryosuna ulaşmak için 2023 enerji hedefleri referans alınmıştır. 2023'e ana enerji hedefleri aşağıdaki Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Türkiye'nin 2023 Enerji ve Madencilik Hedefleri Türkiye'nin 2023 Enerji ve Madencilik Hedefleri (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, 2019).

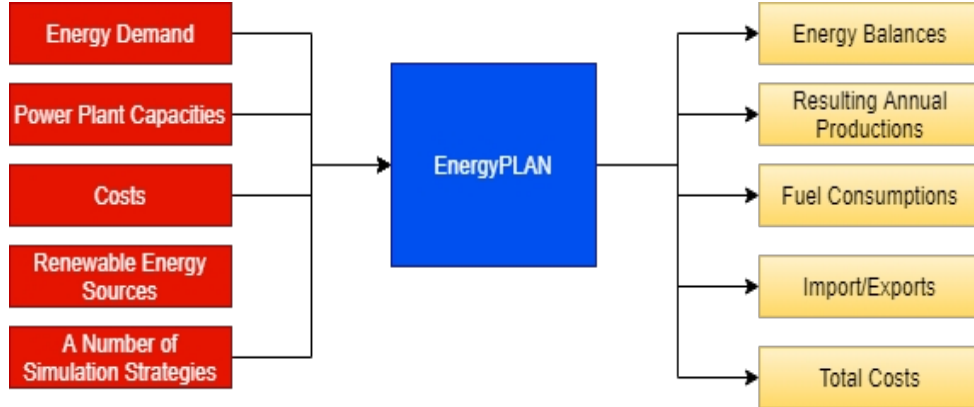
Türkiye'nin 2023 Enerji ve Madencilik Hedefleri	
Birincil Enerji Talebi (BTEP)	174279
Elektrik Talebi (TWh)	375,8
Elektrikte Doğal Gaz Oranı Üretim (%)	20,7
YEK'in Elektrik Üretimindeki Payı (%)	38,8
Yerli Kaynaklarla Enerji Üretimi (TWh)	219,5
Toplam Kurulu Güç Kapasitesi (MW)	109474

Türkiye'nin enerji hedefleri ve yatırımları, 2023 yılı için en gerçekçi enerji sistemi senaryosunu oluşturmak üzere analiz edilmiştir. Güç kapasitesi artışları, tahmini enerji kapasitelerine ve Türkiye'nin ekonomik büyümesine göre belirlenmiştir. Ayrıca, 2018 yılı referans yıl olarak seçilmiştir. Bu nedenle senaryoların 5 yıllık bir süre içinde şekillendirilmesi gerekiyordu. Dolayısıyla senaryoların oluşturulmasında zaman sınırlamaları da dikkate alınmıştır.

3. METODOLOJİ

Bu çalışmada Türkiye'nin enerji sistemlerini analiz etmek ve simüle etmek için EnergyPLAN modeli kullanılmıştır. EnergyPLAN, ulusal veya bölgesel düzeyde enerji sistemi analizi için kullanılan bir girdi/çıkış saatlik simülasyon aracıdır. EnergyPLAN bilgisayar modeli Danimarka'daki Aalborg Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Bu model bir yıl boyunca saatlik değerlere . Ayrıca teknik simülasyonlar ve piyasa-ekonomik simülasyonlar da gerçekleştirmektedir. Bu modelin temel bir amacı, bölgesel ve ulusal enerji sistemi stratejilerinin ve politikalarının tasarımına yardımcı olmaktır (Lund & Theilfsen, 2019).

Modelin girdileri ve çıktıları vardır. Girdiler yenilenebilir enerji kaynakları, talepler, maliyetler, kurulu güç santrali kapasiteleridir. Çıktılar ise enerji dengeleri, yakıt tüketimi, toplam maliyetler, ithalat/ihracat ve yıllık üretimlerdir.



Şekil 1. EnergyPLAN modeli giriş/çıkış parametreleri.

Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi Simülasyonu

Şekil 1, EnergyPLAN modelinin bu temel girdi/çıktı parametrelerini göstermektedir. Bu çalışmada, referans ve %50 YEK senaryoları enerji talebi, enerji santrali kapasiteleri, maliyetler ve yenilenebilir enerji kaynakları verileri yazılıma girilmiştir. Ayrıca, toplam maliyetler, yıllık üretimler gibi çıktı parametreleri analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

4. TÜRKİYE'NİN 2018 VE 2023 ENERJİ SENARYOLARI

Türkiye'nin uzun vadeli enerji stratejisi enerji bağımsızlığına ulaşmaktır. Türkiye ayrıca elektrik üretimini fosil yakıtlardan temiz enerji kaynaklarına kaydırarak karbon emisyonlarını azaltmak istemektedir. Ancak, Türkiye topraklarında bulunan büyük miktardaki kömür rezervleri nedeniyle Türkiye'nin kısa vadede kömürden vazgeçmesi mümkün değildir. Türkiye, daha fazla yerli kömür ve yenilenebilir kullanarak elektrik üretimi için kömür ve doğal gaz ithalatını azaltacaktır.

Nükleer enerji Türkiye'nin 2023 enerji stratejisinin bir parçasıdır. Mersin'deki Akkuyu Nükleer Güç Santrali bugünlerde devreye alınmakta olup, 2023 yılı sonuna kadar 4800 MW tam kapasite ile faaliyet gösterecektir. Akkuyu nükleer güç santrali, 2023 yılında toplam elektrik talebinin yaklaşık %9'u olan yıllık 35 TWh elektrik üretecektir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020). Akkuyu nükleer güç santrali bu çalışmanın da önemli bir parçasıdır. Enerji senaryosunun 2023 yılı için temel amacı, ülkenin enerji sistemini daha düşük karbon emisyonları ile daha fazla yerli ve yenilenebilir kaynak kullanarak modellemektir.

4.1. Referans Enerji Senaryosu ve Model Doğrulaması

Öncelikle, enerji senaryolarını analiz etmek ve karşılaştırmak için belirli bir yıl için bir referans enerji senaryosu uygulanmıştır. Bu çalışmada, kanıtlanmış gerçek verilerin mevcudiyeti nedeniyle 2018 yılı referans yıl olarak seçilmiştir. Ayrıca, referans senaryo bu yıl için oluşturulmuştur.

4.1.1. 2018 Referans Enerji Modeli

Referans enerji modeli, 2018'deki mevcut bir enerji sistemidir. Bu modelin temel amacı, sonuçları 2023 yılı için %50 yenilenebilir senaryosuyla karşılaştırmaktır. 2018'deki tüm onaylı enerji sistemi verileri elde edilmiş ve EnergyPLAN yazılımına eklenmiştir. Ayrıca, 2018 yılındaki toplam elektrik talebi 304,2 TWh/yıl'dır. Türkiye'nin kaynaklara göre kurulu güç kapasitesi aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 2. 2018 yılında kaynaklara göre 2018'de kaynaklara göre kurulu elektrik kapasitesi (EPIAŞ, 2018).

Kaynaklar	2018 (MW)
Taş Kömürü + Linyit	10213
İthal Kömür	8939
Asfaltit	405
Akaryakıt	739
Doğal Gaz	25647
River Hydro	7749
Hidroelektrik	20505
Jeotermal	1260
Biyokütle+ Atık	946
Rüzgar Enerjisi	6950

Tablo 2'de gösterilen kurulu güç kapasitelerinin yanı sıra, 2018 yılında kaynaklara göre saatlik elektrik üretim verileri EPIAŞ Şeffaflık Platformu'ndan alınmıştır. Saatlik elektrik üretim verileri her bir kaynak için ayrı ayrı metin dosyaları olarak EnergyPLAN yazılımına yüklenmiştir. Metin dosyaları dikey olarak 8784 satır ile oluşturulmuştur ve bu sayı bir yıldaki saat sayısını temsil etmektedir.

EnergyPLAN kurulu güç kapasitelerini ve saatlik elektrik üretimini analiz eder ve en gerçekçi çıktıyı verir. Referans modelin sonuçları gerçek verilerle karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

4.1.2. Model Doğrulama

Bu senaryo gerçek enerji talebi ve arzı verileriyle oluşturulmuştur. Tüm veriler enerji denge tablolarından (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018) ve EPIAŞ-Şeffaflık Platformu'ndan alınmıştır. Referans EnergyPLAN modeli oluşturulduktan sonra, bu modelin çıktısı aşağıdaki Tablo 3'te gösterildiği gibi EPIAŞ elektrik üretimi ve üretim verileri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. EPIAS verileri ve EnergyPLAN model çıktısı arasındaki model doğrulaması.

Talep ve Arz	EPIAS Veri (TWh/yıl)	EnergyPLAN Model Çıktısı (TWh/yıl)	Fark (%)
Talep	304,2	304,2	0,01
Rüzgar	19,85	19,9	0,25
Güneş Enerjisi	5,76	5,84	1,37
Hidro-Barajlar	41,01	41,06	0,12
Jeotermal	6,92	6,92	0,02
Hydro-Rivers	18,88	19,86	0,1
Termik Güç	203,7	205,53	0,89

Tablo 3'te gör gibi, EnergyPLAN çıktısı ile EPIAS verileri arasındaki farklar kabul edilebilir aralıktadır, bu da yıllık saatlik arz ve talep verileri gibi tüm teknik verilerin yazılıma doğru bir şekilde tanımlandığı anlamına gelmektedir. Daha sonra, yenilenebilir enerji ve yerli senaryolar bu referans senaryo üzerine inşa edilebilir.

Referans enerji senaryosunun sonucu, YEK payının %31,6 olduğunu ve yenilenebilir kaynaklardan yıllık elektrik üretim miktarının 96,20 TWh/yıl olduğunu göstermektedir.

4.1.3. Referans Enerji Modelinin Maliyeti

Enerji sistemlerinin maliyetleri analiz edilmesi gereken bir diğer önemli parametredir. Türkiye'deki mevcut enerji sistemi kapasitesinin tahmini maliyetleri hesaplanmış ve yazılımda tanımlanmıştır. Enerji santrallerinin 2018'deki yıllık sabit işletme-bakım ve kurulum maliyetleri, 2010 ve 2018 yılları arasındaki maliyetlerin ortalaması kullanılarak hesaplanmıştır. (IRENA, 2020)

Tablo 4. Enerji santrallerinin Enerji santrallerinin maliyetleri (IRENA, 2020).

Tip	Kurulum Maliyeti (USD/kW)	Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti (USD/kW)	Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti (%)
Kıyı Rüzgarı	1740	26,22	2
Güneş Enerjisi	2366	15,19	1,15
Hidroelektrik	3045	41,63	1,5
Jeotermal	5268	113,29	4,22
Biyokütle	5800	125,19	3
Kömür	3661	40,41	1,1
Doğal Gaz	954	12,15	1,27

Enerji santrallerinin birim maliyetleri Tablo 4'te gösterilmektedir. Bu değerler EnergyPLAN yazılımına girilmiş ve 2018 yılında tüm santrallerin toplam maliyeti 221770 MUSD olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Referans enerji senaryosunun Referans enerji senaryosunun maliyetleri.

Maliyetler	Tutar (MUSD)
Değişken Maliyet	997
Sabit İşletme Maliyeti	4059
Yatırım Maliyeti	216713
Toplam Maliyet	221770

Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi Simülasyonu

Tablo 5'te verilen maliyetler, kaynaklara göre birim maliyetler ve kurulu güç santralleri kullanılarak hesaplanmıştır. Toplam maliyet, 2018 yılındaki mevcut Türk enerji sisteminin maliyetini temsil etmektedir. 2023 yılına kadar, 2018'den itibaren 5 yıllık bir dönemde enerji kapasitesi artırımı gerçekleştirilecektir. 2018'den 2023'e kadar tahmini kapasite artışları kullanılarak, %50 YEK senaryosunu gerçekleştirmek için toplam kurulum maliyeti hesaplanmıştır.

4.2. 50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu

Referans enerji senaryosu 2018 yılı için doğrulandıktan sonra, 2023 yılı için %50 yenilenebilir enerji senaryosu, 2018 senaryosu genişletilerek uygulanabilir.

Senaryo, yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki yüksek payına dayanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, enerji bağımsızlığı ve yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonu Türkiye'nin enerji stratejisini ve politikalarını şekillendirmektedir. Bu senaryo, Türkiye'nin 2023 Enerji Planı'nın yeniden düzenlenmiş bir versiyonudur. Yenilenebilir enerji kapasitesi artırılmış, petrol ve ithal kömür göz ardı edilerek ve elektrik üretiminde doğal gaz kullanımı azaltılarak enerji bağımlılığı azaltılmıştır.

4.2.1 50 YEK Senaryosu için Güç Kapasitesi

Yenilenebilir enerji sisteminin kurulu gücü, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelleri, zaman ve politika kısıtları göz önünde bulundurularak artırılmıştır. Türkiye'nin 2019-2023 Ulusal Enerji Stratejik Planı da 2023 yılında kaynaklara göre kurulu güç kapasitesini belirlemek için bir referans olarak kabul edilmiştir. Bu plana göre, 2023 yılında tahmini kurulu yenilenebilir ve yerli güç kapasiteleri aşağıdaki Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6. 2023 için kurulu güç kapasitesi hedefleri 2023 için kurulu güç kapasitesi hedefleri (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020).

Kaynaklar	2023'te Tahmini Kurulu Güç Kapasiteleri (MWe)
Güneş PV	10000
Rüzgar	11883
Jeotermal	2884
Hidroelektrik	32037
Yerli Kömür	14664

2023 yılındaki %50 yenilenebilir senaryosu için kurulu güç kapasiteleri aşağıda gösterildiği gibi genişletilmiştir:

- **Kömür:** 14664 MW
- **Doğal Gaz:** 19736 MW
- **Biyokütle:** 3400 MW
- **Nükleer:** 4800 MW
- **Güneş:** 13950 MW
- **Karada Rüzgar:** 15350 MW
- **Barajlı-Hidro:** 24737 MW
- **Nehir-Hidro:** 9650 MW
- **Jeotermal:** 2450 MW

Tablo 6'da gösterilen Türkiye'nin 2023 Enerji ve Madencilik Hedeflerine göre Türkiye'nin elektrik talebinin 375,8 TWh/yıl'a ulaşacağı tahmin .

Enerji kapasitesinin artırılması için Melikoğlu'nun çalışması (Melikoğlu, 2016) referans alınarak Türkiye'nin uygulanabilir enerji potansiyeli kullanılmıştır. Bu çalışma, kaynaklara göre teorik ve ekonomik enerji potansiyellerini vurgulayarak, Türkiye'nin 2023 vizyonu için yenilenebilir ve nükleer enerjinin rolünü tartışmaktadır.

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

Tablo 7. 2023'e yönelik kurulu güç kapasitesi hedefleri ile %50 yenilenebilir enerji senaryosu arasındaki fark.

Kaynaklar	2023'te Kurulu Kapasite Hedefleri (MWe)	2023 için %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu (MWe)	Fark (%)
Güneş PV	10000	13950	39,5
Rüzgar	11883	15350	29,18
Jeotermal	1550	2450	58,06
Hidroelektrik	32037	34387	7,33
Yerli Kömür	14664	14664	0
Doğal Gaz	19736	19736	0
Biyokütle	1334	3400	154,87
Nükleer	4800	4800	0

Tablo 7, 2023 yılı kurulu kapasite hedefleri ile 2023 yılı için %50 yenilenebilir senaryoları arasındaki güç kapasitesi değişimlerini kaynaklara göre göstermektedir. Tablo 7'de görülebileceği gibi, biyokütle, jeotermal, güneş enerjisi ve rüzgârda önemli miktarda güç kapasitesi artışı vardır. Öte yandan, doğal gaz ve yerli kömür santrallerinin güç kapasitesi sabit kalmıştır. Günümüzde Türkiye'de inşa halinde olan sadece bir nükleer enerji santrali bulunduğundan, daha gerçekçi bir senaryo sağlamak için nükleer kapasite aynı kalmıştır. Güç kapasitesi artışları, en gerçekçi senaryo ve sonuçları elde etmek için dikkatle hesaplanmıştır. Zaman, ekonomik ve politik sınırlamalar Türkiye'deki kaynaklara göre kapasite potansiyelleri ile birleştirilerek en iyi ve en gerçekçi senaryo oluşturulmuştur.

EnergyPLAN saatlik simülasyona dayanmaktadır. Bu nedenle 2018 yılında artan saatlik elektrik üretimi ile 2023 yılı için saatlik elektrik üretim dosyaları da oluşturulmuştur. Kurulu güç kapasitelerine göre

Kaynaklara göre yıllık tahmini elektrik üretimi aşağıdaki Tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8. 50'lik YEK senaryosu için yıllık elektrik üretimi ve tüketimi.

Kaynaklar ve Talep	Elektrik Talebi ve Arzu (TWh/yıl)
Elektrik Talebi	375,8
Rüzgar	51,86
Güneş PV	23,06
River Hydro	35,8
Barajlı Hidro	53,37
Biyokütle	16
Doğal Gaz	77,8
Yerli Kömür	74,27
Nükleer	35
Jeotermal	14,63
İthal Elektrik	0

Tablo 8, %50 YEK senaryosu için kaynaklara ve tüketime göre yıllık tahmini elektrik üretimini göstermektedir. İthal elektrik olmadığı için tüm enerji santralleri elektrik talebini karşılamaktadır.

Şekil 4, kaynaklara göre elektrik üretimindeki payları göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, YEK'in payı hedeflendiği gibi toplam elektrik üretiminin %50'sini oluşturmaktadır. Öte yandan, Türkiye'nin 2023 enerji hedeflerinde olduğu gibi doğal gazın payı %20'dir. Ayrıca yerli ve yenilenebilir oranı %70'tir. Bu oran da ülkenin enerji bağımlılığını azaltmak için önemlidir.

4.2.2 50 YEK Senaryosunun Maliyet Analizi

Kurulu güç kapasitesinin artırılması yatırım maliyetlerine neden olur. Yatırım maliyetlerinin yanı sıra değişken ve işletme maliyetleri de artar. EnergyPLAN, kaynaklara göre birim maliyetler girildiğinde maliyetleri de hesaplar

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

Yazılım. Güç kapasitesindeki büyüme Tablo 9'da gösterilen birim kurulum maliyetleri ile çarpılmıştır. Daha sonra %50 için toplam yatırım maliyeti elde edilmiştir.

Tablo 9. Enerji santrallerinin birim maliyetleri.

Tip	Kurulum Maliyeti (USD/kW)	Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti (USD/kW)	Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti (%)
Kıyı Rüzgarı	1319	26,22	2
Güneş Enerjisi	1331	15,19	1,15
Açık Deniz Rüzgarı	4356	109,59	2,5
Hidroelektrik	2752	41,63	1,5
Jeotermal	2680	113,29	4,22
Biyokütle	4080	125,19	3
Kömür	3661	40,41	1,1
Nükleer	6016	121	2
Doğal Gaz	954	12,15	1,27

Tablo 9'da, her bir enerji santralinin birim maliyetleri, aşağıdaki veriler kullanılarak gösterilmiştir

ABD Enerji Bilgi İdaresi, 2020. Bu senaryonun maliyet analizi 2020 verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2018'de ve 2023'te hesaplanan toplam maliyetler kurulu güç kapasitesinin maliyetleridir. Dolayısıyla, 2023 %50 YEK senaryosu için toplam maliyetler, 2018'den 2023'e kadar kurulu kapasite artışları ile hesaplanabilir. Santrallerin genişleme miktarı, Tablo 9'da gösterilen birim kurulu güç maliyetleri ile çarpılır. Ardından %50 için toplam yatırım maliyeti elde edilir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

EnergyPLAN yazılımındaki analizler sadece elektrik için uygulanmıştır. Isıtma, soğutma ve ulaşım bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Yazılımda referans enerji senaryosu ve %50 yenilenebilir enerji senaryosu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ana karşılaştırma parametreleri RES elektrik

üretimi ve yıllık CO₂ emisyonu. Bu parametreler, elektrik üretiminde yenilenebilir enerji penetrasyonunun faydalarını göstermektedir.

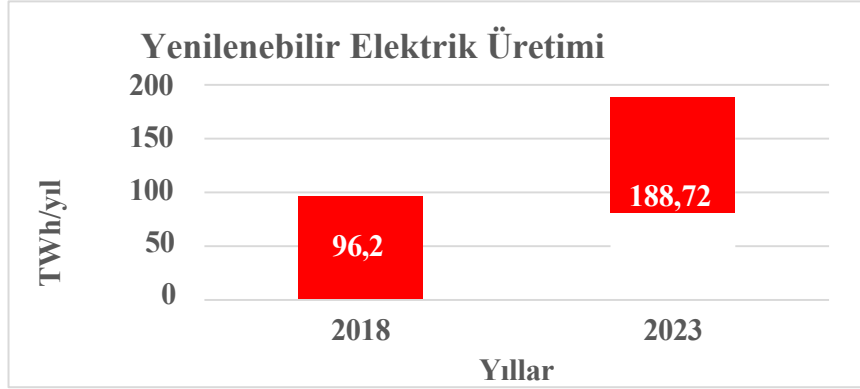
Tablo 10, referans senaryo ile %50 yenilenebilir senaryo arasındaki farkları açıklamaktadır. Referans enerji senaryosu, Türkiye'nin 2018 yılındaki mevcut enerji sistemini temsil etmektedir. Öte yandan, %50 yenilenebilir enerji senaryosu bu çalışma için bir hedeftir. Bu iki senaryo arasındaki temel fark, elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji penetrasyonudur.

Tablo 10. Referans enerji senaryosu ve Referans enerji senaryosu ile %50 yenilenebilir enerji senaryosu arasındaki karşılaştırma.

Kaynaklar	Referans Yılı 2018	50 Yenilenebilir Enerji 2023 için Senaryo	Fark (%)
Güneş PV	5064	13950	175,47
Rüzgar	6950	15350	120,86
Jeotermal	1260	2450	94,44
Hidroelektrik	27455	34387	25,25
Biyokütle	946	3400	259,41
Yerli Kömür	10213	14664	43,58
Doğal Gaz	25647	19736	-23,04
Nükleer	0	4800	

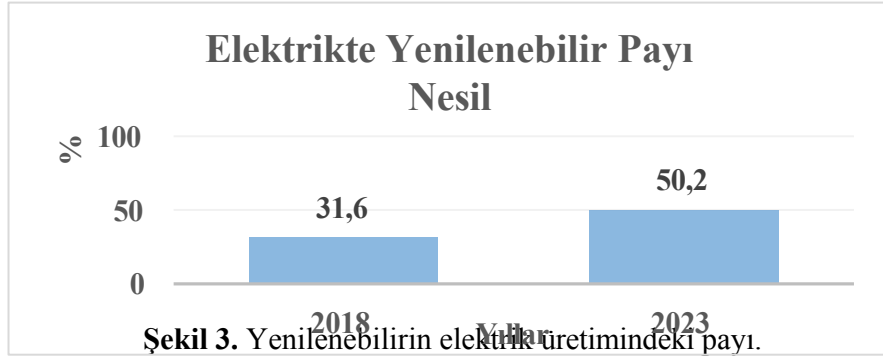
Tablo 10'da biyokütle, jeotermal, rüzgâr, güneş enerjisi ve yerli kömür santrallerinde önemli bir büyüme görülmektedir. Hükümetin enerji politikası nedeniyle, yerli kömür santralleri kurulu güç kapasitesi içinde yüksek bir paya sahiptir. Hedef, yerli ve yenilenebilir kaynakların kullanımına dayanmaktadır. Yıllık yenilenebilir elektrik üretimi, 2023 yılı için %50 yenilenebilir senaryosunda 188,72 TWh/yıl olarak tahmin edilirken, 2018 yılı için referans senaryoda 96,2 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi Simülasyonu



Şekil 2. Yenilenebilir elektrik üretimi. Yenilenebilir elektrik üretimi.

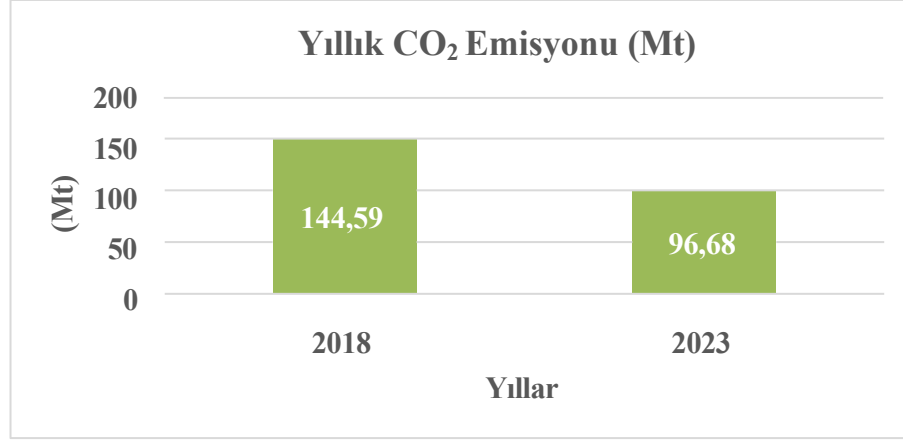
Aşağıdaki Şekil 3'te görülebileceği gibi, elektrik üretiminde YEK payı bu senaryonun ana hedefidir. 188,72 TWh/yıl, %50 YEK senaryosunda toplam elektrik üretiminin %50,2'sine karşılık gelirken, referans enerji senaryosunda 96,2 TWh/yıl toplam elektrik üretiminin %31,6'sına karşılık gelmektedir.



Şekil 3. Yenilenebilirin elektrik üretimindeki payı.

CO₂ emisyonlarının azaltılması, Paris Anlaşması'nın ve küresel temiz enerji hedeflerinin ana amaçlarından biridir. Küresel ısınmanın olumsuz etkilerini azaltmak için elektrik üretimindeki CO₂ emisyonlarının azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle bu parametre bu çalışmanın önemli bir . Yıllık CO₂ emisyonu

2018 ve 2023 yıllarında iki senaryonun EnergyPLAN analizlerinin sonucu aşağıdaki Şekil 4'te görülebilir.



Şekil 4. Yıllık CO Yıllık CO₂ emisyonları.

Şekil 4'te görüldüğü üzere, EnergyPLAN'ın senaryo analizleri sonucunda CO₂ emisyonu 2018-2023 yılları arasında 144.587 Mt'den 96.683 Mt'ye düşürülmüştür.

5.1. Senaryoların Ekonomik Analizleri

Enerji santralleri, kurulumdan değişken ve sabit İşletme ve Bakım maliyetlerine kadar bazı genişlemelere sahiptir. Bu çalışmada, senaryoların gerçekleştirme ve bakım maliyetleri vardır. Yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonu önemli yatırımlar gerektirir. Daha yüksek YEK payı ve daha fazla kapasite artışı, daha yüksek yatırım maliyetleri anlamına gelmektedir. Bu bölüm, %50 YEK senaryosuna ulaşmak için gerekli yatırım maliyetlerini göstermektedir. Kapasite artırımlarının toplam yatırım maliyeti, %50 YEK senaryosuna ulaşmanın maliyetidir.

Enerji santrallerinin türüne göre yatırım maliyetleri Tablo 11'de görülebilir. 50'lik YEK senaryosu için toplam yatırım maliyeti 100357 M USD'dir. Ayrıca, 2018 ve 2023 yıllarında iki senaryo arasında 5 yıllık bir zaman aralığı bulunmaktadır. Daha sonra toplam yatırım maliyeti 5'e bölünerek yıllık toplam maliyet elde edilir. Bu hesaplamada toplam yıllık maliyet 20071,4 M USD'dir.

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

Bu, 2023 yılına kadar %50 YEK senaryosunu gerçekleştirmek için yıllık 20071,4 milyon USD yatırım yapılması gerektiği anlamına gelmektedir.

Tablo 11. Referans enerji senaryosu ile %50 yenilenebilir enerji senaryosu arasındaki maliyet karşılaştırması.

Kaynaklar	2023 için Kapasite Artışları	Birim Maliyetler (MUSD/MW)	Toplam Yatırım Maliyeti (MUSD)
Güneş PV	8886	1,33	11827
Rüzgar	8400	1,32	11080
Jeotermal	1190	2,68	3189
Hidroelektrik	6932	2,75	19077
Biyokütle	2454	4,08	10012
Yerli Kömür	4451	3,66	16295
Doğal Gaz	0	0,95	0
Nükleer	4800	6,02	28877
Toplam			100357

CO₂ vergileri ve elektrik iletim maliyetleri bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Senaryoların ekonomik analizini gerçekleştirmek için enerji santrallerinin maliyetleri kullanılmıştır.

Toplam yatırım maliyeti %50 YEK senaryosunun gerçekleştirilmesi için 100357 MUSD olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, Akkuyu nükleer santrali 28877 MUSD ile bu miktarın dörtte birinden fazlasını oluşturmaktadır. Hesaplama nükleer santral göz ardı edildiğinde, yerli ve yenilenebilir enerji santrallerinin maliyeti 71480 MUSD olmaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, 2023 yılı için Türkiye'nin %50 yenilenebilir enerji sistemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, zaman sınırlaması nedeniyle 2023 yılında bu senaryoya ulaşmanın bir hayal değil, zorlu bir süreç olduğunu göstermektedir. Bu senaryoyu uygulamak için önemli miktarda yatırıma ihtiyaç vardır. Akkuyu Nükleer Güç Santrali, enerji talebinin karşılanmasına yardımcı olmak için 2023 yılına kadar %100 çalışır durumda olmalıdır. Ayrıca, yenilenebilir enerji santrallerinin kurulu gücü enerji hedeflerinden daha fazla artırılmalıdır.

Referans enerji senaryosunda fosil yakıtların elektrik üretimindeki payı %68,4 iken, %50 YEK senaryosunda bu pay yaklaşık %40'a düşürülmüştür. Bu nedenle CO₂ emisyonu 144.587 Mt'dan 96.683 Mt'a düşürülmüştür. Bu düşüş sağlık, çevre ve ekonomi açısından önemlidir. Ayrıca bu çalışma, elektrik üretiminde fosil yakıtların payının azaltılmasıyla büyük miktarda CO₂ emisyonunun azaltılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

50 senaryosunda elektrik payında ithal kömür göz ardı edilmiş ve doğal gazın payı %30,3'ten %20'ye düşürülmüştür. Bu, Türkiye'nin enerji bağımlılığının da azaldığı ve önemli miktarda para tasarrufu sağlandığı anlamına gelmektedir. Daha düşük CO₂ emisyonu ve %50 yenilenebilir payının maliyeti 100357 MUSD olarak elde edilmiştir. Bu değer doğrudan %50 YEK senaryosunun toplam maliyeti olarak kabul edilebilir.

Zaman sınırlaması ve politik hedefler nedeniyle, enerji depolama sistemleri %50 YEK senaryosuna entegre edilmemiştir. Çünkü enerji santrallerine depolama entegrasyonu önemli miktarda para ve zaman gerektirmektedir. Ancak, daha yüksek YEK payına sahip senaryolar için enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Özetle, ulusal düzeyde yüksek oranda YEK gerçekleştirilmesi birçok fayda sağlamakla birlikte yüksek miktarda maliyete de neden olmaktadır. Ancak bu durum sağlık giderleri gibi birçok açıdan göz önünde bulundurulmalıdır,

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

CO₂ emisyonlarının neden olduğu çevresel sorunlar. Daha sonra temiz enerjiye geçişin gerçek maliyeti belirlenebilir.

REFERANSLAR

Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2011). "İrlanda için %100 Yenilenebilir Enerji Sistemine Doğru İlk Adım". *Applied Energy*, Elsevier, 88 (2), s. 502-507.

Ćosić, B., Krajačić, G., & Duić, N. (2012). "2050 Yılında %100 Yenilenebilir Enerji Sistemi: Makedonya Örneği". *Enerji*, Cilt 48, Sayı 1, s. 80-87.

EPIAŞ (Aralık, 2018). "Aylık Elektrik Piyasası Raporları". <https://www.epias.com.tr/en/spot-electricity%20market/electricity-market-reports/electricity-market-monthly-reports/> adresinden alındı.

EPIAS Şeffaflık Platform (2018). "Final Günlük Üretim Programı". <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/planlama/kgup.xhtml> adresinden alındı.

Fernandes, L., & Ferreira, P. (2014). "Portekiz Elektrik Sisteminde Yenilenebilir Enerji Senaryoları". *Energy*, Vol. 69, pp. 51-57.

IRENA (2020). "Yenilenebilir Güç Nesil Maliyetler içinde 2019". *Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA)*. ISBN 978-92-9260-244-4. Erişim adresi: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>

Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2009). "%100 Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Enerji Sistemi Analizi - 2030 ve 2050 Yıllarında Danimarka Örneği". *Energy*, Cilt 34, Sayı 5, s. 524-531.

Lund, H., & Thellufsen, J. Z. (Eylül) 2019). "EnergyPLAN: Gelişmiş Enerji Sistemler Analiz Bilgisayar Model Dokümantasyon Sürümü 15". *Sürdürülebilir Enerji Planlama Araştırma Grup, Aalborg Üniversitesi, Danimarka*. Erişim tarihi <https://www.energyplan.eu/wp-content/uploads/2020/09/documentation.pdf> adresinden

*Türkiye'nin %50 Yenilenebilir Enerji Senaryosu ile Enerji Sistemi
Simülasyonu*

Melikoğlu, M. (2016). "Türkiye'nin Vizyon 2023 Enerji Hedeflerinde Yenilenebilir Enerji ve Nükleer Enerjinin Rolü: Ekonomik ve Teknik İnceleme". *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, 62, s. 1-12.

Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı (Temmuz, 2019). "On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)". *Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı* . ve *Cumhuriyet* . *Türkiye*. Geri alındı

<https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/06/>

[Eleventh_Development_Plan-2019-2023.pdf](#) adresinden

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2018). "Bilgi Bankası-Enerji-Elektrik". *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik-en> .adresinden alındı

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2018). "Enerji Denge Tabloları". *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. Erişim adresi <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari>

Cumhuriyet . *Türkiye* Bakanlık . *Enerji ve Ulusal Kaynaklar* (2020). "2019-2023 Stratejik Planı". *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. https://sp.enerji.gov.tr/ETKB_2019_2023_Stratejik_Planı.pdf .adresinden alındı

ABD Enerji Bilgi Yönetim (Ocak, 2020). "Maliyet ve Performans Özellikler . Yeni Üretme Teknolojiler, *Yıllık Enerji Görünüm 2020*". *ABD Enerji Bilgi İdaresi (EIA)*. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf .adresinden alındı