



ANKARA

HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİLERİN ELEKTRİK
ÜRETİMİNDEKİ YERİ VE TÜRKİYE AÇISINDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Emre AKIN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Neşe SONGÜR**

**YÜKSEK LİSANS
AMME İDARESİ ANABİLİM DALI
ENERJİ YÖNETİMİ BİLİM DALI**

OCAK – 2021



**FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİLERİN ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ YERİ
VE TÜRKİYE AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Emre AKIN

**YÜKSEK LİSANS
AMME İDARESİ ANABİLİM DALI
ENERJİ YÖNETİMİ BİLİM DALI**

**ANKARA HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2021

ETİK BEYAN

Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

Emre AKIN

07.01.2021

FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİLERİN ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ YERİ VE TÜRKİYE
AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Emre AKIN

ANKARA HACI BAYRAM VELİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Dünya nüfusunun giderek artması, kentleşme, teknolojik gelişmeler, endüstrileşme ve refah artışı sonucunda enerjiye olan talep de hızla artmaktadır. Günümüzde tüketmek zorunda olunan enerjinin büyük bir kısmı fosil kaynaklar olarak adlandırılan; petrol, doğal gaz ve kömür kaynaklarından sağlanmaktadır. Bugün, hemen hemen bütün ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için bu kaynakları tüketmektedirler. Fosil kaynakların; yeryüzünde asimetrik bir şekilde dağılmış olması, her geçen gün rezervlerin tükenmesi, enerji dönüşümleri sırasında çevreye zarar vermeleri ve küresel enerji fiyatlarındaki ani dalgalanmaların ekonomiler üzerinde baskı oluşturması dünya genelinde alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda, sınırsız, çevre ile uyumlu ve yenilenebilir olması sebebiyle güneş enerjisi geleneksel enerji kaynaklarına karşı önemli bir alternatif olmaktadır. Bu çalışmada, fotovoltaik teknolojisinin elektrik enerjisi üretimindeki yeri ile ilgili olarak bir araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle enerjinin; çevre, ekonomi ve ulusal güç üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Daha sonra enerji talebinin karşılanmasında fotovoltaik sistemlerin; güçlü ve zayıf yönleri, gelişimine yönelik izlenen politikalar incelenmiştir. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişiminin; enerji arz güvenliği, ulusal elektrik şebekesi, ekonomi ve çevre açısından önemi ortaya konulmuştur.

Bilim Kodu : 92802

Anahtar Kelimeler : Enerji, Güneş Enerjisi, Fotovoltaik Teknoloji

Sayfa Adedi : 133

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Neşe SONGÜR

Öğrenci ORCID ID :

THE ROLE OF PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES IN ELECTRICITY PRODUCTION AND ITS
EVALUATION IN TERMS OF TURKEY

(M.Sc. Thesis)

Emre AKIN

ANKARA HACI BAYRAM VELİ UNIVERSITY
THE INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2020

ABSTRACT

The demand for energy is rapidly increasing due to the population growth, urbanization, technological advancements, industrialization and the increase in prosperity. A great amount of the energy that is consumed in today's world is derived from the sources of petroleum, natural gas and coal that can be named as fossil fuel. Today, almost all the countries consume this type of resources so as to meet their needs for energy. The search for alternative energy sources on a global scale is caused by fossil fuels' asymmetrical distribution, its gradual exhaustion of the resources, the environmental destruction of it during its energy transformation and the pressure that the sudden fluctuations on global energy prices make on the economies. To this end, solar energy becomes a outstanding alternative to traditional energy sources owing to the fact that solar energy is inexhaustible, renewable and compatible with the environment. In this study, a research about the role of photovoltaic technology in energy production has been conducted. Within this framework, firstly the effects of energy on the environment, economy and the national power have been analyzed. Following that, the strengths and the weaknesses of photovoltaic systems and policies that are followed for the development of the system in terms of meeting energy demands have been discussed. In the generation of electric energy of Turkey, the importance of the development of photovoltaic systems in terms of energy supply security, national electricity grid, economy and environment have been presented.

Science Code : 92802

Key Words : Energy, Solar Energy, Photovoltaic Technology

Page Number : 133

Supervisor : Prof. Dr. Neşe SONGÜR

Student ORCID ID :

TEŞEKKÜR

Öncelikle bana kendisi ile çalışma fırsatı veren, tez çalıŐmamda beni yönlendiren, karşılaŐtıđım zorlukları aŐmamda bilgi ve tecrübesiyle yardımcı olan ve bu tezin oluşmasında bana büyük destek sağlayan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Neşe SONGÜR'e ve çalıŐmalarım sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ile bana yol gösterip yardımlarını esirgemeyen, tez jürimde bulunarak beni onurlandıran değerli hocam sayın Prof. Dr. Sencer İMER'e sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca ders aldığım hocalarıma, sağlamış olduğu destek için Elektrik Üretim A.Ő.'ye ve Şirket bünyesinde bulunan Üretim Planlama ve Yan Hizmetler Müdürlüđu çalıŐanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayatım boyunca destekleri ile hep yanımda olan annem Fatma AKIN'a, babam Erol AKIN'a, ablam Ümmühan AKIN'a ve bu süreçte bana en büyük motivasyonu sağlayarak destek olan sevgili eşim İnci Nur İLKYAZ AKIN ile biricik kızım Duru AKIN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLoların LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ, ENERJİ KAYNAKLARI VE ETKİLERİ.....	7
2.1. Enerji Kavramı.....	7
2.2. Enerji Kaynakları.....	9
2.2.1. Dönüştürülebilirliklerine Göre Enerji Kaynakları.....	12
2.2.1.1. Birincil enerji kaynakları.....	12
2.2.1.2. İkincil enerji kaynakları.....	14
2.2.2. Sürdürülebilirlik (Tükenebilirlik) Durumlarına Göre Enerji Kaynakları.....	15
2.2.2.1. Yenilenemez (Tükenir) enerji kaynakları.....	15
2.2.2.2. Yenilenebilir (Alternatif) enerji kaynakları.....	17
2.3. Enerji Tüketiminin Çevresel Etkisi.....	20
2.3.1. Yenilenemez (Fosil) Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkisi.....	20
2.3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkisi.....	21
2.4. Enerjinin Ekonomiye Etkisi.....	23
2.5. Enerji Ulusal Güç İlişkisi.....	26

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN GÜNEŞ ENERJİSİ	29
3.1. Enerji Kaynağı Olarak Güneş	29
3.2. Güneş Enerjisinin Teorik Potansiyeli	31
3.3. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretim Teknolojileri	32
3.3.1. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojileri	33
3.3.1.1 Parabolik oluk kollektör sistemi	35
3.3.1.2 Fresnel oluk kollektör sistemi	35
3.3.1.3 Güneş kuleli sistem	36
3.3.1.4 Parabolik çanak sistemi	36
3.3.2. Fotovoltaik Teknolojisi	37
4. ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNDE FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ	39
4.1. Fotovoltaik Teknolojinin Tarihsel Gelişimi	39
4.2. Türkiye’de Fotovoltaik Teknolojinin Durumu	41
4.3. Fotovoltaik Hücre	42
4.3.1. Yarı İletken Kavramı	43
4.3.2. Fotovoltaik Hücrenin Yapısı	45
4.3.3. Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi	46
4.3.4. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri	47
4.3.4.1. Birinci nesil FV hücreler	48
4.3.4.2. İkinci nesil FV hücreler	48
4.3.4.3. Üçüncü nesil FV hücreler	49
4.4. Fotovoltaik Modül ve Maliyeti	50
4.5. Fotovoltaik Sistem İndirgenmiş Elektrik Üretim Maliyeti	55
4.6. Fotovoltaik Sistem Piyasasının Gelişimi	61
4.7. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları	65

4.7.1. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları.....	65
4.7.2. Fotovoltaik Sistemlerin Dezavantajları.....	66
4.8. Dünya’da Fotovoltaik Sistem Piyasasının Gelişimine Yönelik Politikalar.....	67
4.8.1. Teşvik Politikaları.....	68
4.8.1.1. Alım garantisi (Feed in Tariff- FIT)	68
4.8.1.2. Mahsuplaşma (Net metering).....	68
4.8.1.3. Yatırım teşvikleri	69
4.8.1.4. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kredisi	69
4.8.1.5. Yenilenebilir enerji ihaleleri	70
4.8.2. Ülke Uygulamaları.....	71
4.8.2.1. Çin’de uygulama.....	71
4.8.2.2. ABD’de uygulama	72
4.8.2.3. Almanya’da uygulama	73
5. TÜRKİYE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ.....	75
5.1. Türkiye Enerji Sektörünün Genel Durumu	75
5.2. Türkiye Elektrik Sektörünün Genel Durumu	83
5.3. Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminde Fotovoltaik Sistemlerin Yeri	91
5.3.1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli	93
5.3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisine Yönelik Politikalar.....	99
5.4. Türkiye Elektrik Üretiminde Fotovoltaik Sistemlerin Gelişiminin Önemi	106
5.4.1. Enerji Arz Güvenliğini Sağlama Açısından Önemi	107
5.4.2. Ulusal Elektrik Şebekesine Olan Katkı Açısından Önemi	108
5.4.3. Ülke Ekonomisine Katkı Açısından Önemi	112
5.4.4. Çevre Açısından Önemi	115

6. SONUÇ	117
KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ	133



TABLoların LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Enerji birimleri arasında dönüşüm.	9
Tablo 2.2. Enerji kaynaklarının alt ısıl değerleri ve petrol eşdeğerine çevrim katsayıları. 10	
Tablo 2.3. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.	11
Tablo 2.4. Kaynaklara göre dünya birincil enerji tüketimi (Mtep) (1995-2040).	13
Tablo 2.5. Farklı elektrik üretim teknolojilerine ait emisyon değerleri (ton CO ₂ e/GWh). 22	
Tablo 2.6. 2017 Yılı G7 ve G20 ülkelerinde nüfus, GSYİH, birincil enerji tüketimi. ..	25
Tablo 2.7. Fucks eşitliğine göre 2017 yılı ulusal güç sıralaması.	28
Tablo 3.1. Zenit açısına bağlı olarak atmosfer üzerine düşen güneş enerjisi miktarı.	31
Tablo 3.2. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri kurulu gücü (MW).	34
Tablo 3.3. CSP ve FV sistemlerinin karşılaştırılması.	38
Tablo 4.1. Küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (TWh,%)....	64
Tablo 5.1. Türkiye'nin nüfusu, GSYİH'si, birincil enerji talep ve üretimi (1990-2018). 75	
Tablo 5.2. Türkiye birincil enerji üretim/tüketim değerlerinin kaynaklara göre dağılımı. 77	
Tablo 5.3. Türkiye elektrik enerjisi görünümü (1990-2018).	83
Tablo 5.4. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (1990-2018).	85
Tablo 5.5. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (1990-2018).	87
Tablo 5.6. Türkiye elektrik enerjisi tüketiminin sektörel dağılımı (%) (1990-2017).	88
Tablo 5.7. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde kaynakların kapasite faktörü değişimi (%).	89
Tablo 5.8. Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu (2019-2039).	90
Tablo 5.9. 2018 Yılı kaynak bazında kurulu güç değişimi (MW).	93
Tablo 5.10. Ülkelerin ortalama güneş ışınım değeri ve 2018 yılı FV elektrik üretimi..	95

Tablo 5.11. Bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri.....	96
Tablo 5.12. Türkiye güneş, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi potansiyeli.	98
Tablo 5.13. Kaynak türüne dayalı üretimde tesis tipine göre teşvik fiyatları.....	100
Tablo 5.14. Yerli aksam kullanılması durumunda ilave teşvik fiyatları.	101
Tablo 5.15. Güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin şehirlere göre dağılımı.	102
Tablo 5.16. Lisanssız FV üretim tesislerin kurulu güç kapasite gelişimi (MW).....	104
Tablo 5.17. Toplam kurulu gücün kaynaklara göre gelişim projeksiyonu (MW).....	106
Tablo 5.18. Türkiye'nin enerji ithalatı ve dış ticaret dengesi verileri (Milyar Dolar)...	113
Tablo 5.19. Türkiye'de sektörlere göre toplam sera gazı emisyonları (Milyon Ton CO ₂ e).	116

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji dönüşümü.	8
Şekil 2.2. Dünya birincil enerji kaynakları toplam tüketimi (Mtep) (1970-2040).....	13
Şekil 3.1. Yılın günlerine bağlı olarak atmosfer dışı güneş ışınımının değişmesi.	30
Şekil 3.2. Dünya genelinde güneş ışınımını en fazla alan bölgeler.	32
Şekil 3.3. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinde elektrik üretim süreci.	33
Şekil 3.4. Parabolik oluk kollektör sistemi.	35
Şekil 3.5. Fresnel oluk kollektör sistemi.	36
Şekil 3.6. Güneş kuleli sistem.	36
Şekil 3.7. Parabolik çanak sistemi.	37
Şekil 4.1. Atomik yapıya bağlı olarak elementlerin sınıflandırılması.	43
Şekil 4.2. Enerji band diyagramları.	44
Şekil 4.3. Fotovoltaik hücrede enerji dönüşümü.	45
Şekil 4.4. Fotovoltaik hücre yapısı.	46
Şekil 4.5. Küresel fotovoltaik hücre üretiminde FV teknolojilerin payları.	50
Şekil 4.6. Fotovoltaik hücre, fotovoltaik modül (panel), fotovoltaik dizi.	51
Şekil 4.7. Fotovoltaik hücre verimlilik oranı (%).	52
Şekil 4.8. Fotovoltaik modül verimlilik oranı (%).	52
Şekil 4.9. FV teknolojilerine göre hücre ve modül verimleri (%).	53
Şekil 4.10. Teknolojisine göre fotovoltaik modül fiyatları (2010-2018).	54
Şekil 4.11. Fotovoltaik sistem indirgenmiş elektrik üretim maliyeti (2010-2018).	56
Şekil 4.12. Ülkelere göre fotovoltaik sistem indirgenmiş elektrik üretim maliyeti (2010-2018).	57
Şekil 4.13. Yenilenebilir enerji teknolojilerin LCOE karşılaştırması (2010-2018).	58
Şekil 4.14. FV sistemlerin kurulum maliyetinin yıllara göre değişimi (2010-2018).	59

Şekil 4.15. Ülkelere göre fotovoltaik sistem kurulum maliyeti (2010-2018).....	59
Şekil 4.16. 2018 Yılı G20 ülkeleri fotovoltaik sistem bileşen maliyetleri.....	60
Şekil 4.17. 2018 Yılı dünya genelinde kaynak bazında kurulu güç artışı (GW).	61
Şekil 4.18. Küresel fotovoltaik sistem kurulu güç gelişimi (GW) (2008-2018).....	62
Şekil 4.19. 2018 Yılı ülkelere göre fotovoltaik sistem kurulu gücü (GW).....	63
Şekil 4.20. 2018 Yılı küresel elektrik enerjisi üretiminde FV payı (TWh,%).	63
Şekil 5.1. 2018 Yılı türkiye birincil enerji talep ve üretiminin kaynak dağılımı (Mtep).	78
Şekil 5.2. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığı (%).	79
Şekil 5.3. Doğal gaz kullanımının sektörel dağılımı (%) (2010-2018).....	80
Şekil 5.4. Yıllar itibarıyla toplam enerji ithalat maliyeti (2000-2018).	81
Şekil 5.5. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü gelişimi (MW) (1990-2018).....	84
Şekil 5.6. 2018 Yılı türkiye elektrik enerjisi kurulu güç dağılımı (%).	86
Şekil 5.7. 2018 Yılı türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (%)	88
Şekil 5.8. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde yerli ve ithal kaynakların payı (%) (2000-2018)	91
Şekil 5.9. Türkiye fotovoltaik kurulu güç kapasitesinin gelişimi (MW) (2014-2018)..	92
Şekil 5.10. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA).....	96
Şekil 5.11. Türkiye'nin aylık güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi.	97
Şekil 5.12. Güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin saha alanları.....	103
Şekil 5.13. Saatlik elektrik enerjisi tüketimi ve yük bölgeleri (01.08.2019).	110
Şekil 5.14. FV santrallerin saatlik elektrik enerjisi üretimi (01.08.2019).....	110
Şekil 5.15. PTF oluşumuna doğal gaz fiyatının ve döviz kurunun etkisi.	114

KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar

Açıklamalar

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
BP	British Petroleum
Cal	Kalori
CO₂	Karbondioksit
CSP	Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri
DSİ	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EİGM	Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPIAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FIT	Alım Garantisi (Feed in Tariff)
FV	Fotovoltaik (Photovoltaics-PV)
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	Güneş Enerjisi Santralleri
GÖP	Gün Öncesi Piyasası
GSYİH	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
GÜYAD	Güneş Enerjisi Yatırımcıları Derneği
GW	Gigawatt
HES	Hidroelektrik Santral
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
kWh	Kilowatt saat
LCOE	İndirgenmiş Enerji Maliyeti
LPG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol

MW	Megawatt
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NO₂	Nitrojen Dioksit
PTF	Piyasa Takas Fiyatı
REN21	21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politikası Ağı
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
SHURA	SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi
Si	Silisyum
SO₂	Kükürt dioksit
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TWh	Terawatt Saat
USD	ABD Doları
Wp	Watt Peak - PV modüllerin üreteceği maksimum güç
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

1. GİRİŞ

Avusturyalı bir filozof olan Ivan Illich (1926-2002), enerjinin bugün bizim anladığımızın çok daha ötesinde bir kavram olduğunu şu şekilde ifade etmiştir (Illich, 1983: 13):

“Bir fizikçi tarafından yazılan ‘E’ harfi ile bir iktisatçı veya politikacı tarafından kullanılan ‘Enerji’ kelimesi arasında çok az ortak nokta vardır. ‘E’ bir formül iken; ‘Enerji’ anlamlarla dolu bir kelimedir. ‘E’ sadece bir formül içerisinde anlam kazanırken, ‘Enerji’ ise doğanın işleyişini sürdürebilme yeteneğine sahip daha incelikli bir olguyu içinde barındırmaktadır. Enerji, çağımızı yansıtan hem bolluğu hemde kıtlığı aynı anda simgeleyen bir semboldür.”

Günümüzde stratejik bir öneme sahip olan enerji, ülkelerin gelişmişlik düzeyinin saptanmasında kullanılan başlıca parametreler arasında yer almaktadır. Enerji, kullanılan enerjilerin doğası nedeniyle değil, üretme ve tüketme şeklimiz nedeniyle bir medeniyet özelliği göstermektedir (Beltran, 2018: 1).

Enerji, toplumların zaman içindeki gelişiminin çoğunu analiz edebilen zengin bir kavramdır. İster üretim araçları, ister tüketim biçimleri olsun veya verimlilik ya da kıtlık dönemleri olsun, enerji arayışı insanlığı yeni kaynaklar arayışında daha da ileriye gitmeye, durmadan yenilik yapmaya, paylaşmaya ve fethetmeye teşvik etmiştir. Enerji, 18. yüzyılın sonlarından bu yana ekonomik büyümenin temeli olsa da enerji ile ilgili konular aslında jeopolitik, toplumsal, politik ve çevresel dengeleri etkilemektedir (Beltran, 2018: 1).

18. yüzyılda, Sanayi Devrimi öncesinde, enerji kullanımı sadece kas ve biyokütle kaynaklarının kullanımına dayanmaktaydı. Çoğu çalışma, el emeği ve hayvanlar tarafından sağlanırken, biyokütle kaynağı (çoğunlukla yakacak odun) ısıtma ve pişirme enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmıştır. Rüzgâr (yel değirmenleri) ve hidro (su değirmenleri) gibi diğer enerji kaynakları da mevcuttu, ancak toplam katkıları marjinal ve çok spesifik amaçlar için kullanılmıştır (örneğin unu öğütme) (Bertran, 2009: 2).

19. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, kömür yakan buhar motorunun icat edilmesi tarihte “Sanayi Devrimi” adı verilen bir dönemi başlatmıştır. Bu dönemde, buhar motorları için kömürün kullanılması enerji kaynaklarında büyük bir değişim yaratmıştır. İnsan kas gücünü ve hayvanları iş yapmak için kullanan tarım

toplumlarının çoğu hızla sanayileşerek iş yapmak için makineleri kullanmaya başlamıştır (Rowe, 2019: 1).

20. yüzyıl başladığında ise, büyük ilgi kömür üzerindedir, ancak içten yanmalı motorların icat edilmesi ile daha yüksek enerji içeren kaynaklara doğru kademeli bir değişim gerçekleşmiş ve petrol kömürün yerini almaya başlamıştır. 20. yüzyılın sonlarında, ana enerji sağlayıcısı olarak petrol dünya ekonomisinde yüksek düzeyde bir bağımlılığa ulaşmıştır. Teknik uzmanlık seviyesi arttıkça, doğal gaz gibi daha verimli fosil kaynaklardan yararlanılmış ve tamamen yeni bir enerji türü olan nükleer fizyon elde edilmiştir. Hidroelektrik, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da yararlanılmaya başlanmış ancak bunlar marjinal kaynaklar olarak kalmıştır (Bertran, 2009: 2).

Kömür ve petrol egemenliğine dayanan enerji çağı, 1973 petrol krizi yaşanana kadar sorunsuz olarak devam etmiştir. Ancak petrol krizi sonrası bu kaynakları az ya da çok ithal etmek zorunda olan ülkeler için enerji konusunda ciddi bir güven sorunu ortaya çıkmıştır. Kriz sonrası artan enerji fiyatları, enerjiye kesintisiz ve güvenilir erişme isteği, ekonomik büyüme ve artan nüfusa bağlı olarak enerji tüketiminin artması, fosil kaynakların birgün tükenecek olması ve fosil kaynakların tüketilmesi sonucu yaşanan çevresel sorunlar alternatif enerji kaynakları konusunda yoğun bir arayışın ortaya çıkmasına sebep olmuştur (DEK, 2007: 73).

Dünya Enerji Konseyi Başkanı Gadonneix, küresel enerji talebinin inanılmaz bir oranda arttığını ve 2050 yılına kadar küresel enerji talebinin en az iki katına çıkacağını söylemiştir (WEC, 2011: 4). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2040 yılına kadar her geçen yıl için enerjiye olan talebin; mevcut politikaların devam ettirilmesi halinde % 1,3, yeni politikaların uygulanması halinde ise % 1 oranında artarak yükseleceğini ve enerji kaynaklı emisyonlarda da sürekli bir artış olacağını belirtmektedir. Ayrıca, küresel elektrik enerjisi talebinin, yeni politikalar senaryosu çerçevesinde yılda % 2,1 oranında (birincil enerji talebinin 2 katı) büyüyeceği ifade edilmektedir (IEA, 2019b: 1,4).

Bu bağlamda, artan küresel enerji talebinin karşılanması, fosil kaynakların sebep olduğu emisyonların önlenmesi ve sürdürülebilir enerji arzı için güneş enerjisi potansiyelinden azami ölçüde yararlanılması gerektiği düşünülmektedir. Güneş enerjisi, hem ülkemizde hem de dünyada enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü

sağlayabilecek potansiyele sahiptir. Bu önemli enerji kaynağından faydalanmak için kullanılan sistemlerin başında ise fotovoltaik (FV) teknolojisi yer almaktadır.

Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisini arada herhangi bir süreç olmadan doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Fotovoltaik hücre teknolojileri, kullanılan ana malzemeye ve ticari olgunluk seviyesine bağlı olarak genellikle birinci, ikinci ve üçüncü nesil adı verilen sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır. Bunlardan birinci ve ikinci nesil teknolojiler ticarileşmiştir ve yaygın olarak günümüzde kullanılmaktadır. Üçüncü nesil ise Ar-Ge aşamasında olup henüz ticarileşmemiş teknolojilerdir (IRENA, 2012a: 11).

Çalışmanın Amacı ve Önemi:

2014 yılından bu yana, fotovoltaik sistemlerin küresel ağırlıklı ortalama elektrik üretim maliyeti, fosil yakıt maliyet aralığına düşmüş olması ve son yıllarda gelişen teknoloji ile verimliliğin artması, fotovoltaik yatırımlarına hız kazandırmıştır (IRENA, 2019a: 9). Bu nedenle, bu tez çalışmasının amacı, önemi her geçen gün artan ve yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri olan fotovoltaik teknolojisinin, Dünyada ve Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi içerisindeki yerini ortaya koymak ve Türkiye açısından önemine yönelik genel bir değerlendirme yapmaktır.

Fotovoltaik teknolojisi ile ilgili yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, son yıllarda hızla düşen fotovoltaik teknolojisi elektrik üretim maliyetinin beklenenden çok daha önce gerçekleşmesi ve böylece diğer teknoloji türleriyle elektrik üretimi maliyeti açısından rekabet edebilir duruma gelmesi sonucunda, Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişiminin; enerji arz güvenliği, ulusal elektrik şebekesi, ekonomi ve çevre açısından önemi ortaya konulmuştur.

Yanıt Aranılan Sorular:

Bu çalışmada sorulan ana soru, “Dünyada ve Türkiye’de fotovoltaik piyahasındaki gelişmeler nelerdir?” Bu amaçla; küresel enerji talebi ne düzeydedir ve gelecekte enerjiye olan talep nasıl seyredecektir?, Enerjinin; çevre, ekonomi ve ulusal güç üzerindeki etkileri nelerdir?, Enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisinin teorik potansiyeli nedir?, Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren teknolojiler nelerdir?,

Fotovoltaik sistemlerden nasıl elektrik üretilir?, Fotovoltaik sistemlerin diğer teknoloji türlerine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri nelerdir?, Fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşması için hangi enerji politikaları izlenmektedir? ve Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişimi niçin önemlidir? gibi alt sorulara yanıt aranmıştır.

Yöntem:

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşan nitel bir araştırma olup veri toplama yöntemlerinden doküman analizi kullanılmıştır. Analizlerde; 21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politikası Ağı (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century-REN21), British Petroleum (BP), Dünya Bankası (World Bank-WB), Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory-NREL), Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA), Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency-IRENA), SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (SHURA) gibi uluslararası kurum ve kuruluşlar ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ), Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) gibi Türkiye'deki kamu kurumları tarafından internet üzerinden sağlanan veri tabanlarındaki datalardan ve yıllık raporlardan faydalanılmıştır. Araştırma kapsamında, 1970-2018 yılları arası yayımlanan veriler kullanılmıştır.

Birinci bölümde, tezin giriş bölümü olarak tez konusunun önemini anlatan bir giriş metni hazırlanmıştır. Bu bölümde, enerji kaynaklarının zaman içerisindeki evrimi ile tezin kapsam ve amacı anlatılmıştır.

İkinci bölümde, enerji kaynakları, enerji kaynaklarının etkileri ve Alman fizikçi Wilhelm Fucks'ın (1902-1990) ulusal güç denklemi (The Equation Of National Power) ile ilgili genel bir bilgi sunulmuştur. Ayrıca, uluslararası kuruluşlar tarafından enerji üretimi/tüketimi ile ilgili hazırlanan yıllık raporlar incelenerek, küresel enerji talebinin yıllar içerisindeki değişimine ve bu talebi karşılamak için kullanılan enerji kaynaklarına dair bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ve bu enerjiyi elektrik enerjisine çeviren teknolojilerden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, güneş enerjisi teknolojilerinden biri olan ve bu çalışmanın da konusunu oluşturan fotovoltaik sistemler incelenmiştir. Fotovoltaik teknolojinin tarihsel gelişimi, yarı iletken kavramı, bir fotovoltaik hücrenin yapısı ve çalışma prensibi ile fotovoltaik sistem piyasasının gelişimi ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ayrıca, fotovoltaik sistemlerin güçlü ve zayıf yönleri ile bu sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik küresel politikalar değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, ETKB, EPDK, TEİAŞ, EPIAŞ, YEGM, TÜİK, DSI gibi kamu kurumlarının verileri incelenerek FV sistemlerin Türkiye'deki durumu araştırılmıştır.

Sonuç bölümünde, fotovoltaik teknolojisinin elektrik enerjisi üretimindeki yeri ve geleceği ile ilgili olarak bir değerlendirme yapılmış olup, Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişimine yönelik görüş ve önerilere yer verilmiştir.

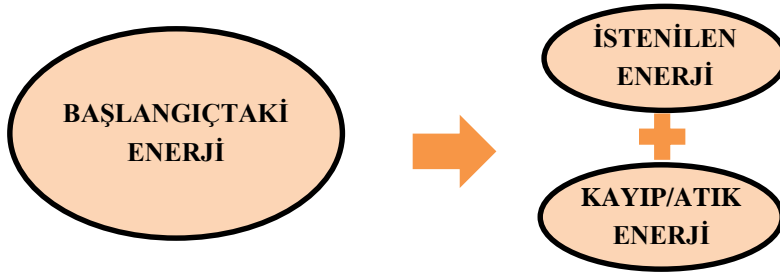
2. ENERJİ, ENERJİ KAYNAKLARI VE ETKİLERİ

Bu bölümde, enerji ve enerji kaynaklarına dair bilgilere yer verilmiştir. Uluslararası kuruluşlar tarafından enerji üretimi/tüketimi ile ilgili hazırlanan yıllık raporlar incelenerek, “Küresel enerji talebi ne düzeydedir ve gelecekte enerjiye olan talep nasıl seyredecektir?” sorusuna cevap aranmıştır. Ayrıca enerjinin hayatımızdaki öneminden bahsedebilmek için; “Enerjinin çevre, ekonomi ve ulusal güç üzerindeki etkileri nelerdir?” sorusuna yanıt aranmıştır.

2.1. Enerji Kavramı

Literatürde enerji kavramıyla ilgili birçok tanım yapılsa da enerjinin birden çok forma dönüşebilmesinden dolayı kapsamlı bir tanımın yapılması oldukça zordur. Bu bağlamda genel bir tanım yapmak gerekirse, enerjiyi, elle tutulamayan gözle görülemeyen, bir anlamda maddesel varlığı olmayan bir güç olarak düşünmek ve bir sistemin iş yapma yeteneğini veya gücünü niteleyen bir kavram olarak tanımlamak oldukça yerinde bir tanım olacaktır (Çepel, 1995: 41-79). Fizikte ise, enerjinin en basit tanımı “iş yapabilme gücüdür”. Bu tanım çok basit olmakla birlikte pratik açıdan anlamlıdır. Çok geniş anlamda ise enerji “madde” demektir. Uzaydaki enerjinin devamlı olarak maddeye, maddenin de tekrar enerjiye dönüştüğü göz önünde bulundurulursa; madde, somutlaşmış bir enerji biçimidir, ancak kendi başına hareket edemez (Göksu, 1999: 29-133). Bu açıklamalardan yola çıkarak enerji kısaca iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanabilir.

Fizikte, enerjinin en önemli özelliği ise “korunma” özelliğidir. 1915 yılında Amalie Emmy Noether tarafından ispatlanan Enerjinin Korunumu Yasasına göre, enerji hiçbir zaman yoktan var olamaz ya da vardan yok olamaz. Enerji sadece başka bir enerji türüne dönüşebilir ve bu dönüşümü esnasında sistemin toplam enerjisi korunur. Bir başka ifade ile evrendeki enerji miktarı sabittir. Termodinamiğin birinci kanununa göre dönüştürülebilen bir büyüklük olan enerjinin bir biçimden diğer bir biçime dönüşmesine “enerji dönüşümü” denilmektedir. Şekil 2.1’de enerjinin bir formdan başka bir forma dönüşmesi gösterilmiştir. Burada, enerji dönüşümü sırasında meydana gelen kayıp/atık enerji miktarı ile açığa çıkan enerji miktarının toplamı, başlangıçtaki enerji miktarına eşittir.



Şekil 2.1. Enerji dönüşümü.

Günümüzde farklı enerji türleri bulunmakla birlikte değişen ve gelişen yeni teknolojilere bağlı olarak bu enerji türleri gelişmekte ve yeni türlere dönüşebilmektedir. Günlük yaşantımızda enerjinin elektrik, ısı, ışık, ses gibi bir çok biçimi ile karşılaşmaktayız ve bunlardan bazıları diğerlerine oranla daha faydalıdır. Birçok alanda kullanılabilir ve kullanıldıkları alanlarda daha verimli olurlar. Kullanılabilirliği ve verimliliği fazla olan bu enerji biçimlerine “*Yüksek Nitelikli Enerji*” denilmektedir. Hayatın hemen hemen tüm alanlarında kullanılan elektrik enerjisi ise yüksek nitelikli bir enerjidir. Bu nedenledir ki, evrende değişik formlarda bulunan enerji türleri, kullanımında daha fazla verim elde edileceği düşünüldüğü enerji türüne dönüştürülmektedir.

Enerji; genel hatlarıyla, mekanik enerji, kimyasal enerji, ısı enerjisi ve elektrik enerjisi olmak üzere dört temel biçimde kullanılmaktadır ve kullanıldığı yere göre farklılık gösteren birçok birimi bulunmaktadır. Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) temel enerji birimi **Joule (J)** dür. Joule ise, bir Newton’luk bir kuvvetin bir cismi kuvvet doğrultusunda bir metre hareket ettirmesiyle yapılan işe eşittir.

Diğer enerji ölçü birimleri ise şöyledir;

Kalori (cal); ısı enerjisini ölçmek için kullanılmaktadır. 1 gram suyun sıcaklığını 1 °C artırmak için gereken enerji miktarını temsil etmektedir.

Newton metre (Nm); bir cisme aktarılan enerjinin ölçü birimidir. Kütlesi 1 kg olan bir cismin saniyedeki hızını her saniye bir metre daha artırmak için uygulanması gereken kuvvet miktarını ölçmek için kullanılmaktadır.

British Thermal Unit (BTU); bir libre suyun sıcaklığını 63° fahrenheit’tan 64° fahrenheit’a çıkartmak için gerekli olan enerji miktarıdır. İngiliz ölçü birimi olup soğutma enerjisi birimi olarak kullanılmaktadır.

Kilowatt saat (kWh); 1000 watt'lık güç seviyesinde 1 saatte üretilen veya tüketilen enerji miktarını ifade etmektedir.

Elektronvolt (eV); bir elektronun 1 voltluk potansiyel farkı altında kazandığı enerji miktarıdır.

Ton Eşdeğer Petrol (tep); enerji kaynaklarının tek bir birim ile ölçülmesi için kullanılan enerji birimidir. 1 ton ham petrolün verdiği eşdeğer enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Ton Eşdeğer Kömür (tek); enerji kaynaklarının tek bir birim ile ölçülmesi için kullanılan enerji birimidir. 1 ton kömürün verdiği eşdeğer enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında enerji ölçü birimlerinden kilowatt saat (kWh) ve ton eşdeğer petrol (tep) ölçü birimleri kullanılmıştır. Enerji birimleri arasındaki dönüşümler ise, Tablo 2.1'de verilmiştir (Quaschnig, 2016: 2).

	<i>kJ</i>	<i>kcal</i>	<i>kWh</i>	<i>kg ep</i>	<i>kg ek</i>
<i>1 kilojoule (1 kJ=1,000 W)</i>	1	0,2388	0,000278	0,000024	0,000034
<i>1 kilokalori (1kcal)</i>	4,1868	1	0,001163	0,0001	0,00014
<i>1 kilowatt-saat (kWh)</i>	3.600	860	1	0,086	0,1228
<i>1 kg eşdeğer petrol (kg ep)</i>	41.868	10.000	11,63	1	1,4286
<i>1 kg eşdeğer kömür (kg ek)</i>	29.308	7.000	8,14	0,7	1

Tablo 2.1. Enerji birimleri arasında dönüşüm.

(Quaschnig, 2016: 2)

2.2. Enerji Kaynakları

Doğada bulunan ve çeşitli yöntemler kullanılarak enerji elde edilen kaynaklara, enerji kaynakları denilmektedir. Petrol, kömür, odun, akarsu, güneş, rüzgâr gibi kaynaklardan elde edilen enerji, ekonomik amaçlar doğrultusunda farklı ihtiyaç alanlarında kullanılmaktadır (Doğanay ve Çoşkun, 2017: 2).

Enerji kaynaklarının üç önemli karakteristik özelliği bulunmaktadır. Bunlar; enerji kaynaklarının birçoğunun doğada az bulunmaları, dünya genelinde eşitsiz bir şekilde dağılmış olmaları ve enerji dönüşümünün çevreyi kirletici etkisinin oluşudur (Sonenblum, 1978: 13). Bunların yanısıra, herbir enerji kaynağından aynı oranda verimin alınmaması da bir dezavantaj olarak vurgulanabilir.

Yararlanılan enerji kaynaklarından herbirinin birim başına verdikleri kalori miktarları farklıdır. Bu sebeple, çeşitli enerji kaynaklarını doğru bir biçimde birbirleriyle karşılaştırabilmek ve miktarlarını tanımlamak için bütün enerji kaynaklarının aynı cinsten ifade edilmesi gerekir. Bu kapsamda, enerji kaynaklarının *ton eşdeğer petrol (tep)* veya *ton eşdeğer kömür (tek)* şeklinde aynı değerden verilmesine eşdeğer enerji denir. 1 tep; 1 ton ham petrolün yakılması ile elde edilecek olan enerjiye eşittir.

Ülkemizde tüm enerji kaynaklarının tep'e dönüşüm katsayıları "27 Ekim 2011 tarihli *Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik*" ile belirlenmiş olup, tüm karşılaştırma ve hesaplamalar buna göre yapılmaktadır. Tablo 2.2'de, ilgili yönetmelik içerisinde yer alan enerji kaynaklarının, alt ısı değerleri ve petrol eşdeğerine çevrim katsayıları verilmiştir.

<i>Miktar</i>	<i>Enerji Kaynağı</i>	<i>Alt Isıl Değeri</i>	<i>Birim</i>	<i>tep Çevrim Katsayısı</i>
1 ton	Taşkömürü	6.100.000	kCal	0,610
1 ton	Kok kömürü	7.200.000	kCal	0,720
1 ton	Linyit Santral	2.000.000	kCal	0,200
1 ton	Odun	3.000.000	kCal	0,300
1 ton	Ham Petrol	10.500.000	kCal	1,050
bin m ³	Doğal Gaz	8.250.000	kCal	0,825
bin kWh	Elektirik	860.000	kCal	0,086

Tablo 2.2. Enerji kaynaklarının alt ısı değerleri ve petrol eşdeğerine çevrim katsayıları.

Enerji kaynakları, dönüştürülebilirliklerine göre birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak; kullanışlarına göre ise yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Ayrıca, ticari enerji kaynakları ve ticari olmayan enerji kaynakları şeklinde de sınıflandırmalar mevcuttur. Ticari enerji

kaynakları modern bir endüstriyel ekonominin gereksinimini karşılayan uluslararası ve ulusal piyasası bulunan enerji türlerini kapsamaktadır. Petrol başta olmak üzere, doğal gaz, kömür, su gücü, elektrik ve nükleer enerji ticari olan enerji kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Ticari olmayan enerji kaynakları ise, geleneksel ekonomik sistemlerin kullandığı enerjidir. Tarımsal artıklar, hayvansal artıklar ve odun ticari olmayan enerji kaynaklarına birer örnektir (Bilginoğlu, 1991: 123). Sanayileşme gelişip ekonomi büyüdükçe ticari olan enerji kaynaklarına olan ilgi, talep ve üretim hergeçen gün artar iken, ticari olmayan enerji kaynaklarına olan talep ise zamanla azalmaktadır (Aydın, 2010: 319). Tablo 2.3’de enerji kaynaklarının sınıflandırılması gösterilmiştir (Koç ve Şenel, 2013: 33).

<i>Dönüştürülebilirliklerine Göre</i>	<i>Kullanışlarına Göre</i>
A) Birincil Enerji Kaynakları	A) Yenilenemez Enerji Kaynakları
Petrol	Petrol
Kömür	Kömür
Doğal Gaz	Doğal Gaz
Hidrolik	Uranyum
Güneş	Toryum
Rüzgâr	B) Yenilenebilir Enerji Kaynakları
Dalga	Hidrolik
Biyokütle	Güneş
Nükleer	Rüzgâr
B) İkincil Enerji Kaynakları	Dalga
Elektrik	Biyokütle
Benzin	Jeotermal
Mazot/Motorin	Hidrojen
LPG	
Kok	
Hava Gazı	
Odun Kömürü	

Tablo 2.3. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.

(Koç ve Şenel, 2013: 33)

2.2.1. Dönüştürülebilirliklerine Göre Enerji Kaynakları

Dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları; birincil enerji kaynakları ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır.

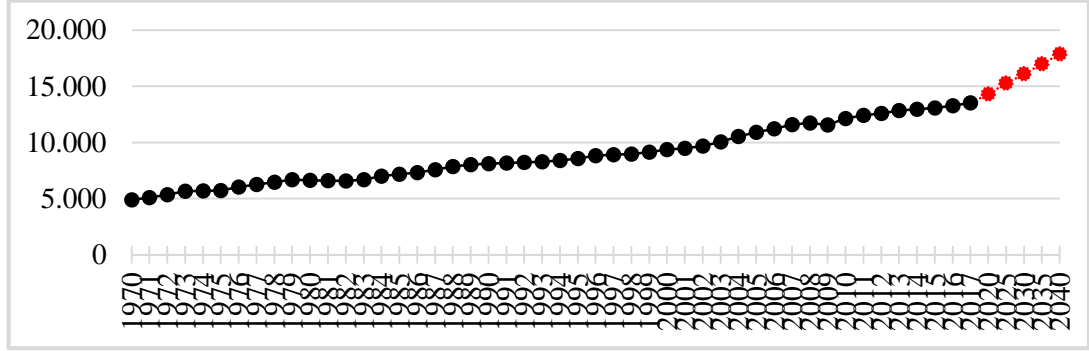
2.2.1.1. Birincil enerji kaynakları

Enerjinin herhangi bir dönüşüme veya değişime uğramamış haline birincil enerji kaynakları denilmektedir. Birincil enerji kaynakları doğada var olan kaynaklar olması sebebiyle doğal enerji kaynakları olarakta adlandırılmaktadır. Dünyada kullanılan enerjinin büyük bir bölümü birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Birincil enerji kaynakları doğrudan kullanılabilirlikleri gibi çeşitli yöntemler yardımıyla bir başka enerji türüne de dönüşebilmektedirler.

Birincil enerji üretiminde en büyük paya sahip olan kaynaklar sırasıyla petrol, kömür ve doğalgazdır. Güneş, hidrolik, rüzgâr, dalga, biyokütle ve nükleer de yer aldığı birincil enerji kaynakları; sahip oldukları çevresel etkiler, taşıma kolaylığı, nihai kullanım esnekliği, ihraç ve ikame potansiyeli gibi birçok açıdan birbirlerinden farklılıklar göstermektedirler (Bilginöglü, 1991: 123).

Petrol, kömür, doğal gaz gibi büyük bir paya sahip olan bu enerji kaynaklarının üretimi kadar, bunların tüketimi de büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda da, dünyada enerji tüketimi, bölgelere göre değişiklik göstermekle birlikte, artan nüfusa, teknolojik gelişmeye ve ekonomik büyümeye paralel olarak sürekli bir artış eğilimi göstermektedir (Akova, 2008: 2-31). Dünya birincil enerji kaynakları tüketimi 1970 yılında 4.875 Mtep iken, 2017 yılında 13.511 Mtep'e ulaşmıştır. 2017 yılı Dünya birincil enerji tüketiminde; petrol (%33,50) ilk sıra da yer alır iken bunu sırasıyla kömür (%27,60), gaz (%23,30), hidro (%6,80), nükleer (%4,41) ve yenilenebilir enerji (%4,23) izlemektedir (BP, 2018). Yapılan araştırmalara göre, 2019-2040 yılları arasında dünya genelinde birincil enerji kaynaklarının tüketimi artış göstermeye devam edecektir. British Petroleum (BP) tarafından hazırlanan dünyanın enerji görünümüyle ilgili 2019 raporunda, dünyada birincil enerji kaynakları tüketiminin 2040 yılında 17.866 Mtep'e ulaşması öngörülmektedir (Şekil 2.2). Özellikle Çin, Hindistan ve Asya'daki yaşam standartlarındaki iyileştirmelerin de etkisiyle küresel

enerji talebinin 2040 yılına kadar üçte bir oranında artış göstereceği beklenilmektedir (BP, 2019a: 7).



Şekil 2.2. Dünya birincil enerji kaynakları toplam tüketimi (Mtep) (1970-2040).

(BP, 2018; BP, 2019b)

Tablo 2.4’de görüleceği üzere, 2040 yılına kadar yapılan ön değerlendirme çalışmalarında, birincil enerji kaynakları tüketimi içinde fosil kaynaklı yakıtların payı azalırken yenilenebilir enerji kaynaklarının genel enerji tüketimi içindeki payı artmaktadır (BP, 2019b).

Yıllar	Petrol		Gaz		Kömür		Nükleer		Hidro		Hidro Hariç Yenilenebilir		Toplam Mtep
	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	
1995	3.391	40	1.816	21	2.224	26	526	6	563	7	45	1	8.565
2000	3.691	39	2.065	22	2.356	25	584	6	601	6	59	1	9.356
2005	4.030	37	2.368	22	3.106	29	627	6	660	6	103	1	10.894
2010	4.145	34	2.731	23	3.606	30	626	5	777	6	234	2	12.119
2015	4.396	34	2.987	23	3.765	29	583	4	881	7	449	3	13.060
2017	4.538	34	3.156	23	3.731	28	596	4	919	7	571	4	13.511
2020	4.675	33	3.382	24	3.779	26	673	5	993	7	802	6	14.304
2025	4.790	31	3.736	24	3.710	24	696	5	1.101	7	1.231	8	15.264
2030	4.829	30	4.041	25	3.647	23	739	5	1.164	7	1.674	10	16.095
2035	4.876	29	4.344	26	3.628	21	739	4	1.205	7	2.189	13	16.980
2040	4.860	27	4.617	26	3.625	20	770	4	1.245	7	2.748	15	17.866

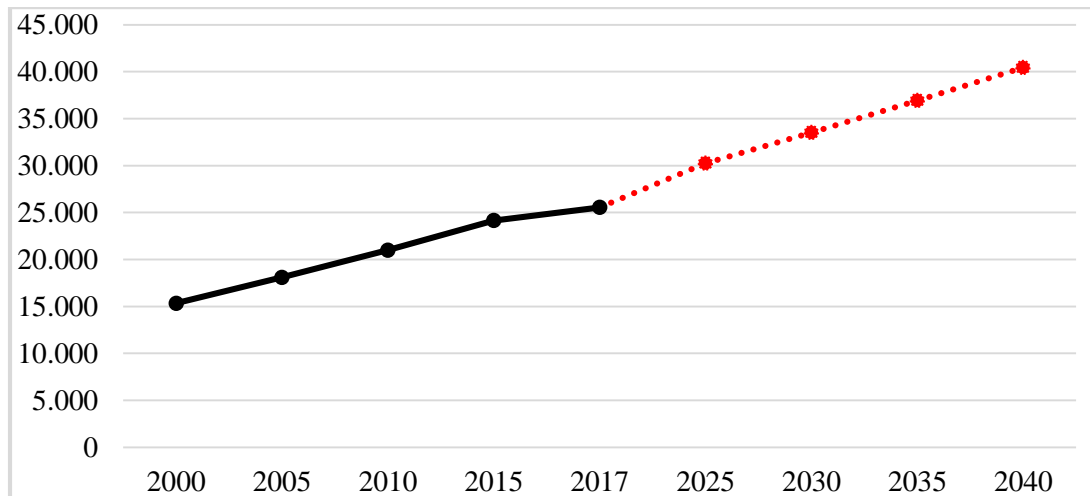
Tablo 2.4. Kaynaklara göre dünya birincil enerji tüketimi (Mtep) (1995-2040).

(BP, 2019b)

2.2.1.2. İkincil enerji kaynakları

Birincil enerji kaynaklarının enerji dönüşüm yöntemleriyle kullanımı daha elverişli olan enerji türlerine dönüştürülmesine ikincil enerji kaynakları denilmektedir. Elektrik, benzin, motorin/mazot, LPG, kok, hava gazı ve odun kömürü ikincil enerji kaynaklarındandır. Bu kaynaklar elde edilirken termik santraller, rafineriler gibi tesislerde dönüşüm kayıpları oluşmaktadır. Bu nedenle, ikincil kaynaklar, birincil kaynaklara göre çok daha pahalıdır (Türkyılmaz, 2011: 2).

Dünyada en çok talep edilen ikincil enerji türü ise elektrik enerjisidir. Günlük yaşantımızın hemen her alanında yer bulan elektrik enerjisi aynı zamanda çağdaşlaşmanın da önemli bir göstergesidir. 2000 yılında 15.334 TWh olan küresel elektrik enerjisi üretimi yaklaşık olarak 1,7 kat artışla 2017 yılında 25.553 TWh'a ulaşmıştır. Bu üretim değerlerinden kömür (%38,58) ilk sıra yer alır iken, bunu sırasıyla doğal gaz (%22,92), hidro (%16,08), nükleer (%10,32), rüzgâr (%4,25), petrol (%3,68), biyoenerji (%2,44), güneş FV (%1,70) ve jeotermal enerji (%0,04) izlemektedir (IEA, 2019a). Yapılan çalışmalara göre 2019-2040 yılları arasında elektrik enerjisine olan talep artmaya devam edecektir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından elektrik enerjisi üretiminin 2040 yılında 40.443 TWh'a ulaşması öngörülmektedir (Şekil 2.3). Dünya nüfusundaki artış ve sanayileşmenin devam etmesiyle 2040 yılına kadar elektrik enerjisine olan talebin yaklaşık %60 oranında artması beklenmektedir (IEA, 2018: 528).



Şekil 2.3. Dünya elektrik enerjisi üretimi (TWh) (2000-2040).
(IEA, 2018: 528; IEA, 2019a)

2.2.2. Sürdürülebilirlik (Tükenebilirlik) Durumlarına Göre Enerji Kaynakları

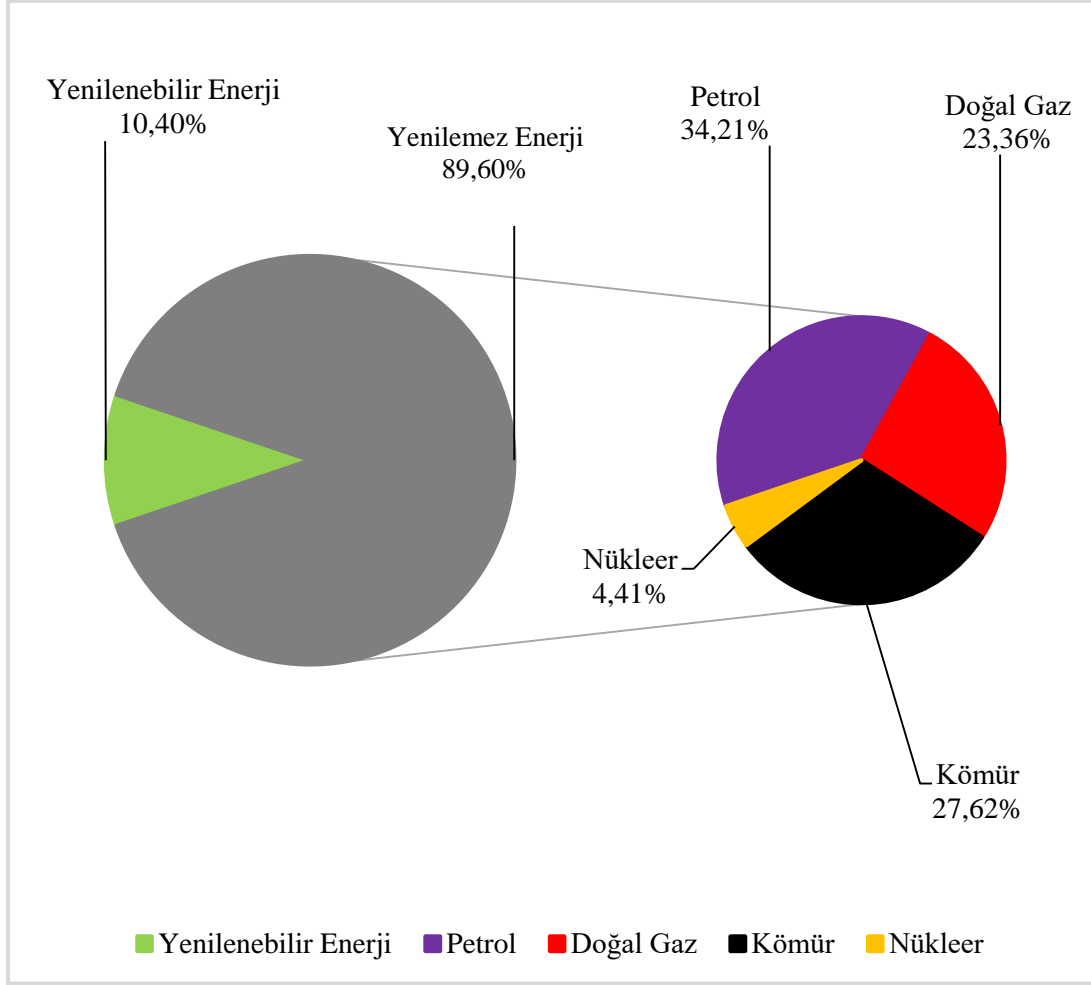
Enerji kaynaklarında bir diğer sınıflandırma şekli ise, enerji kaynaklarının kullanımı sonunda sürdürülebilirlik, tükenebilirlik veya yenilenebilirlik özellikleri dikkate alınarak yapılan sınıflandırmadır (Koç ve Kaya, 2015: 37).

2.2.2.1. Yenilenemez (Tükenir) enerji kaynakları

Literatürde yenilenemez enerji kaynakları; fosil yakıtlar, konvansiyonel enerji kaynakları, geleneksel enerji ve birincil enerji kaynakları olarak da adlandırılmaktadır. Bu grup enerji kaynaklarının en büyük özelliği sadece birkere kullanılabilmeleri, tükenir ve rezervlerin sınırlı olmasıdır. Bu kaynaklar, yeni keşfedilen rezervler ile artsa da günün birinde bu kaynaklarında tükenileceği tahmin edilmektedir (Doğanay ve Çoşkun, 2017: 3). Bu kaynakların kullanımındaki en büyük problem ise, sebep oldukları çevre kirliliğidir.

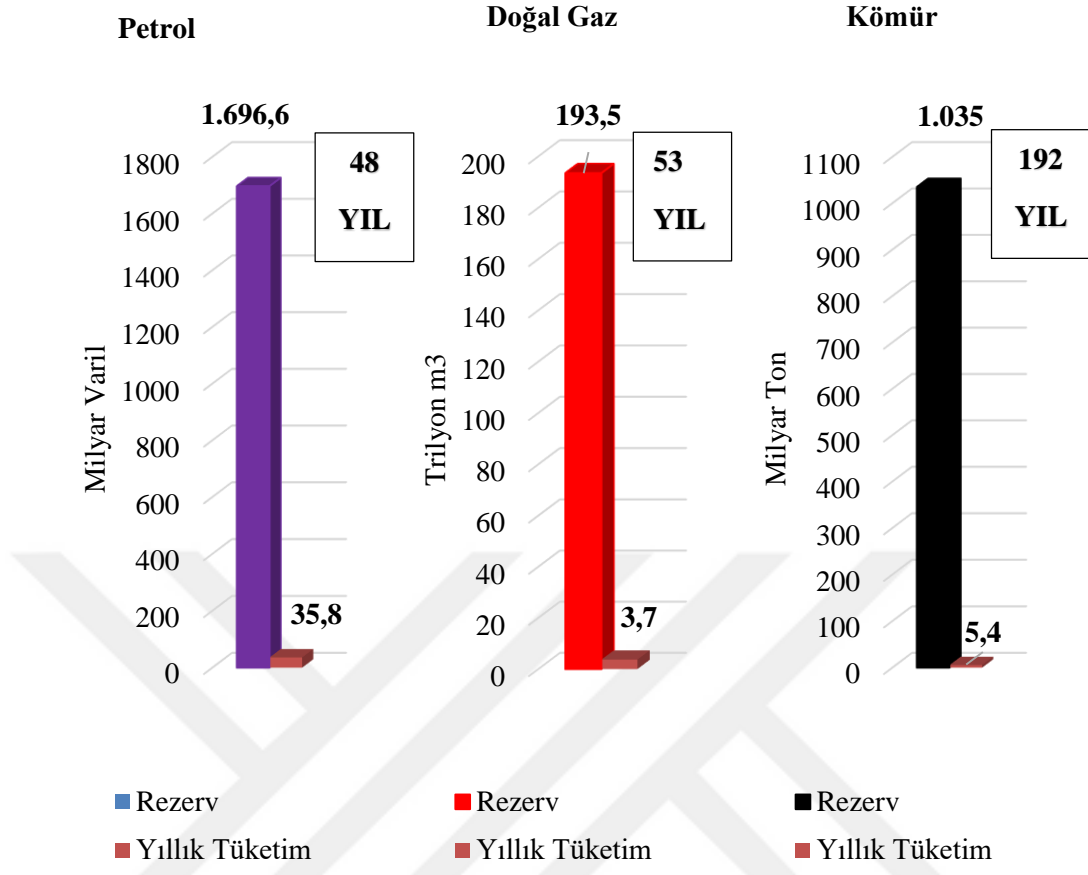
Yenilenemez enerji kaynakları, fosil yakıtlar ve çekirdek kaynaklılar (radyoaktif elementler) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Petrol, kömür ve doğal gaz fosil kaynaklı yenilenemez enerji kaynakları iken, uranyum ve toryum ise çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynaklarıdır.

Şekil 2.4'de 2017 yılı dünya genelinde kaynaklara göre enerji tüketim oranları verilmiştir (BP, 2018). 2017 yılı içerisinde dünya enerji tüketiminin %10,40 yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanırken, %89,60'sı yenilenemez enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Günümüzde enerji tüketiminde fosil yakıtlar büyük bir paya sahiptir.



Şekil 2.4. 2017 Yılı küresel enerji tüketiminde yenilenemez enerji payı (%).
 (BP, 2018)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payı artmakla birlikte, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin 2040 yılına kadar ağırlığını koruyacağı öngörülmektedir. Petrol ve doğal gaz rezervleri azalmakta olup, rezerv miktarları kritik seviyeye yaklaşmaktadır. Şekil 2.5’de yenilenemez enerji kaynaklarından petrol, doğal gaz ve kömürün 2017 yılı itibarıyla kanıtlanmış toplam rezervleri, yıllık tüketim miktarları ve kalan rezerv ömürlerine ilişkin bilgi verilmiştir (BP, 2018).



Şekil 2.5. Fosil yakıt rezervleri ve kalan rezerv ömürleri.

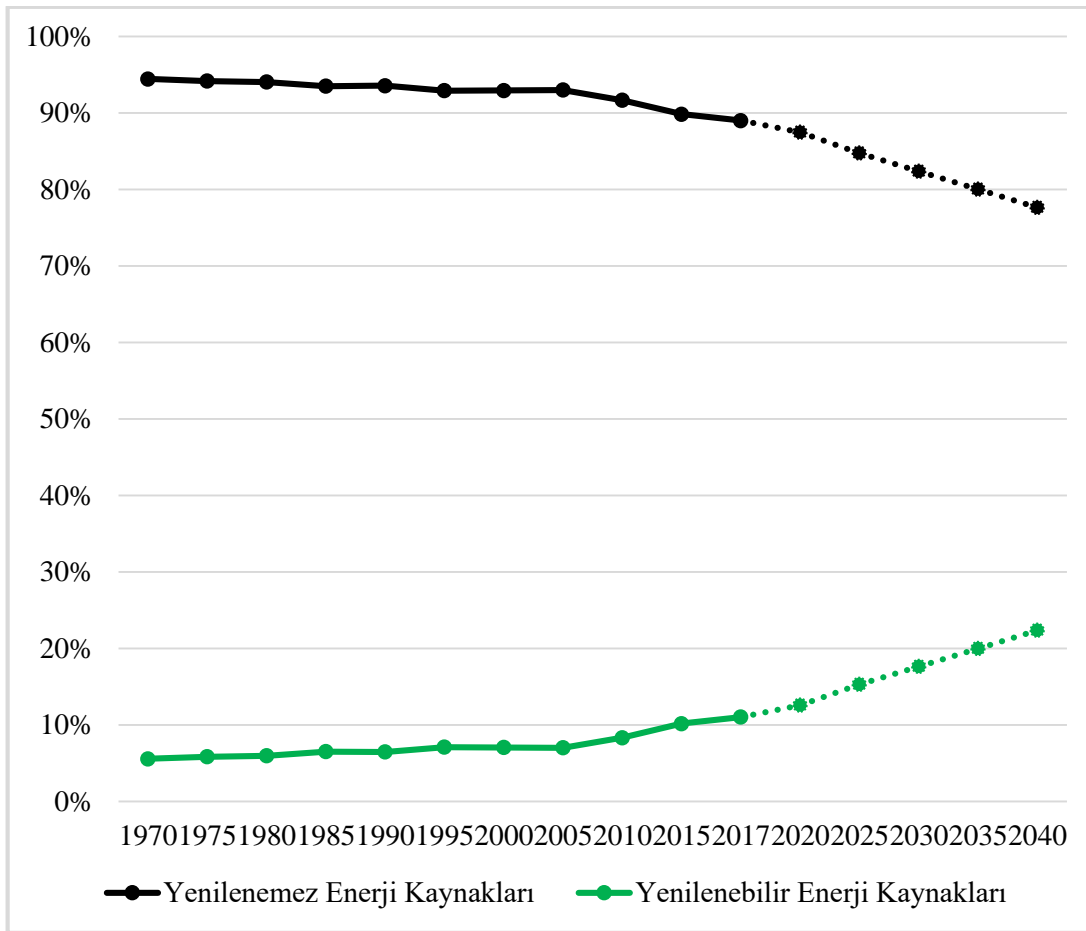
[Kalan rezerv ömürleri, (BP, 2018) verilerinden yararlanılarak araştırmacı tarafından hesaplanmıştır.]

2017 yılı sonu itibarıyla, Dünya genelinde toplam petrol rezervi 1.696,6 milyar varil civarında belirlenmiş olup, bu miktar yaklaşık 48 yıllık küresel petrol tüketimini karşılayacaktır. Doğal gaz rezervi ise, yaklaşık 194 trilyon m³ olup küresel doğal gaz ihtiyacını 53 yıl boyunca karşılayacaktır. Kömür rezervi ise fosil yakıtlar arasında en fazla rezerve sahip olup 192 yıl boyunca küresel ihtiyacı karşılayabilecektir.

2.2.2.2. Yenilenebilir (Alternatif) enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları doğada var olan, tükenmeyen, kendini daima yenileyerek sürekliliğini devam ettiren, tekrar tekrar kullanılabilen temiz enerji kaynaklarıdır. Hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga, biyokütle ve hidrojen enerjisi başlıca yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. 2040 yılına kadar fosil

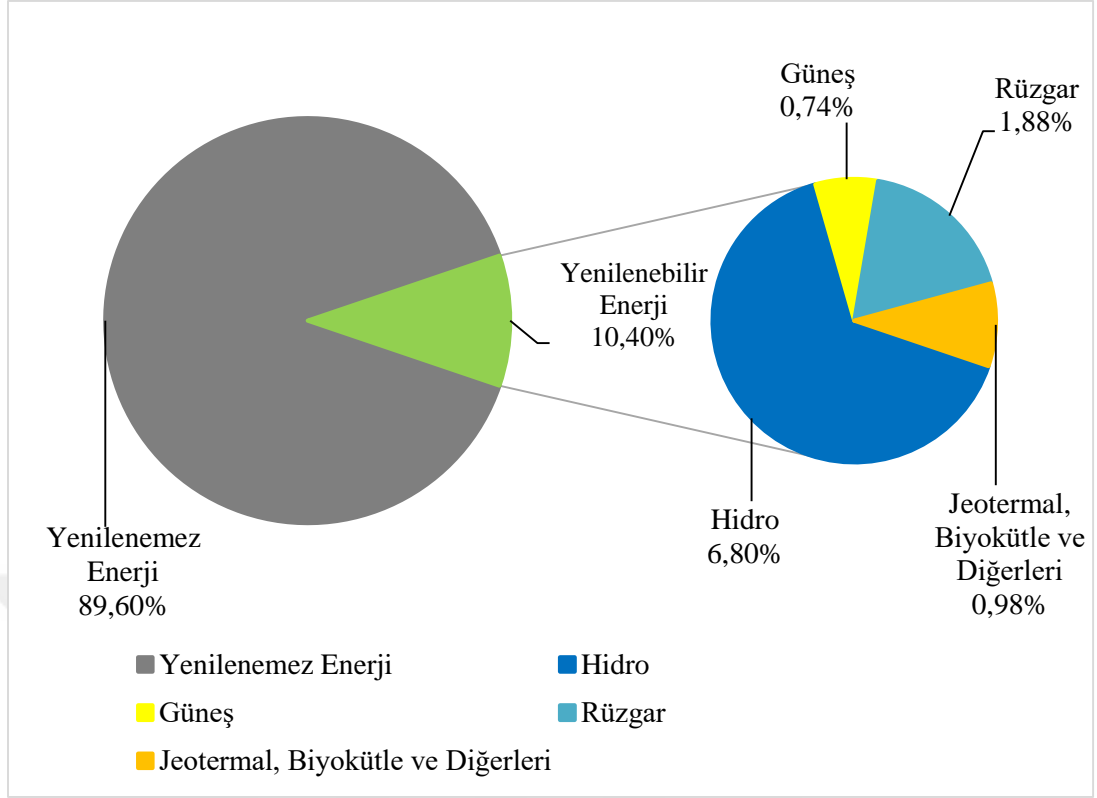
kaynaklı yakıtların küresel enerji tüketimindeki payları azalma eğiliminde olsa da bu kaynaklar, hakim kaynaklar olmaya devam edecektir (Şekil 2.6). BP “2019 Enerji Görünümü” adlı raporda ise, gelecek 20 yıl içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının dünyanın temel enerji kaynağı olacağını ve bu kaynakların günümüzde küresel enerji talebinin yaklaşık %11’ini karşılarken 2040 yılından itibaren bu oranın %22 olacağı öngörülmektedir. 2040 yılına kadar yenilenebilir enerjinin yıllık ortalama %7,6 büyüme oranı ile en hızlı büyüme oranına sahip enerji kaynağı olması beklenmektedir (BP, 2019a: 53; BP, 2019c).



Şekil 2.6. Dünya birincil enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payı (%).

(1970-2040) (BP, 2019a: 53; BP, 2019c)

2017 yılı içerisinde küresel enerji tüketiminin %10,40 yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Şekil 2.7’de bu kaynakların enerji tüketimindeki payları gösterilmiştir (BP, 2018).



Şekil 2.7. 2017 Yılı küresel enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payı (%).
(BP, 2018)

Günümüzde nüfus artışı, sanayinin gelişmesi ve ekonomik büyüme nedeniyle enerjiye olan talebin her geçen gün artması, fosil yakıtların sınırlı miktarda ve bir gün bitecek olması alternatif enerji kaynaklarının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilirliğin sağlanması ve doğal dengenin korunması için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması giderek önem kazanmaktadır (Seydioğulları, 2013: 19-25).

Enerjinin, ülkelerin ekonomik faaliyetleri ve ulusal güçleri açısından vazgeçilmez bir unsur olmasının yanısıra, büyük boyutlarda tüketilmesi birtakım çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle enerjinin; çevre, ekonomi ve ulusal güç açısından değerlendirilmesi önemlidir.

2.3. Enerji Tüketiminin Çevresel Etkisi

Enerji, temelde iki nedenden ötürü sürekli olarak dünyanın gündeminde yer almaktadır. Bu nedenlerden biri enerji kaynaklarının yetersizliği iken, bir diğeri ise enerji dönüşüm teknolojilerinin çevreye verdikleri zararlardır.

Enerji-Çevre ilişkisini tanımlayabilmek için öncelikle çevre tanımının yapılması gerekmektedir. Çevre, “*insan faaliyetleri ve canlı varlıklar üzerinde hemen ya da uzun vadede, dolaylı ya da dolaysız bir etkide bulunabilecek fiziksel, kimyasal, biyolojik ve toplumsal etkenlerin belirli bir zamandaki toplamıdır.*” Bu toplamı etkileyen en önemli öğelerden biri enerjidir (MEB, 2012: 6). Günümüzde artan enerji tüketimine bağlı olarak çevresel sorunlarda artmaktadır. Kullanılan tüm enerji kaynaklarının çevreye etkisi olmakla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımından doğan çevresel sorunlar yenilenemez enerji kaynaklarına göre çok daha azdır.

2.3.1. Yenilenemez (Fosil) Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkisi

Günümüzde tüketmek zorunda olduğumuz enerjinin büyük bir kısmı fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Fosil kaynaklar, hemen hemen bütün ülkelerde temel enerji üretim kaynağı olarak sürekli tüketilen ve tüketildikçe de sürekli çevreye zarar veren kaynaklardır. Bu kaynakların enerji üretiminde kullanılması sonucunda hava kirliliği, küresel ısınma, asit yağmurları, su kirliliği, iklim değişikliği gibi bir takım çevresel etkileri olmaktadır.

Fosil yakıtların yanmaları sonucunda enerji elde edilirken yanma ürünleri olarak küresel ısınmaya ve asit yağmurlarına sebep olan CO₂, SO₂ ve NO₂ gibi gazlar ile arsenik, kurşun, nikel, kadmiyum gibi zehirli metaller açığa çıkmakta ve atmosfere bırakılmaktadırlar. Burada yanma sonucu açığa çıkan CO₂ gazı küresel ısınmaya sebep olan sera gazlarının en önemlisidir ve toplam sera gazı miktarı içindeki payı %80 civarındadır (MEB, 2012: 7). SO₂ ve zehirleyici olan NO_x'ler ise asit yağmurlarının meydana gelmesinde birinci derecede etkili olmaktadır.

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi sırasında buhar üretme, soğutma ve temizleme işlemleri için yüksek miktarlarda su kullanılmaktadır. Soğutma suları kullanılmadan önce santralin makinelerine zarar verilmemesi için birtakım kimyasal işlemlere tabi tutulmaktadır. Bu işlem ise, atık sularının demir 2 sülfat (FeSO₄)

bakımından zenginleşmesine neden olmaktadır. Bu suların alındıkları kaynağa tekrar geri verilmeleri, bu kaynakta kirliliğin artmasına neden olduğu belirtilmektedir. Ayrıca bir diğer etki ise, atık suyun sıcaklığıdır. Sıcak suyun tekrar kaynağına verilmesi neticesinde kaynak suyun sıcaklığını da arttırmakta ve burada yer alan canlı hayatını olumsuz yönde etkilemektedir (CSB, 2019a: 1-5).

Nükleer güç santrallerinde ise fisyon işlemi sonucunda büyük miktarlarda radyoaktivite ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, nükleer santrallerden çevreye olabilecek en büyük etki, olası bir kaza durumunda büyük miktarlarda radyoaktif maddenin çevreye yayılması ve bunun da insan sağlığı ve diğer canlılar üzerinde büyük hasar oluşturmasıdır (CSB, 2019b: 1-3).

Yenilenemez enerji kaynaklarının kullanımı ile ortaya çıkan bu olumsuz sonuçlar gerek insanların sağlıklarını gerekse bitki ve hayvan yaşamını tehdit etmektedir. Yenilenemez enerji kaynakları, sürdürülebilir bir gelişme sağlayamadıkları gibi çevresel problemlere de neden olmaktadır.

2.3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkisi

Artan enerji gereksinimi karşılayabilmek ve yenilenemez enerji kaynaklarının çevreye olan olumsuz etkilerini azaltabilmek amacıyla alternatif enerji arayışı günümüzde artmıştır. Halihazırda kullanılmakta olan yakıtlara alternatif olabilecek, tükenme olasılığı bulunmayan veya daha az olan, çevreye zarar vermeyecek enerjilerin kullanılması ve yaygınlaşması günümüz enerji politikaları içerisinde yerini almaktadır.

Enerji kaynaklarının çevresel etkileri değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara karşı olan avantajları ön plana çıkmaktadır. Fosil kaynakların çevreye her alanda zarar verdikleri, yenilenebilir kaynakların ise emisyonlar, hava kirliliği ve iklim değişikliğine hemen hemen hiç zarar vermedikleri, diğer çevresel etkilerinin ise en alt düzeyde seyrettiği görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklı üretim tesislerinde oluşan atıklar, genellikle sistemde kullanılan malzeme ve maddelerden oluşmaktadır. Oluşan atık miktarı ise, fosil kaynaklı enerji üretim tesislerinde oluşan atıklarla kıyaslanmayacak kadar düşük seviyededir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, emisyon değerleri bakımından kendi aralarında sıralandığında ise, en az emisyon veren kaynak hidrolik enerjisidir. Bunu sırasıyla rüzgâr, nükleer, biyokütle ve güneş FV takip etmektedir. Tablo 2.5’de farklı elektrik üretim teknolojilerine ait emisyon değerleri gösterilmiştir (WNA, 2011: 6). Fotovoltaik tesislere göre, linyit santralleri yaklaşık 12 kat, kömür santralleri yaklaşık 10 kat, doğal gaz santralleri ise yaklaşık 6 kat daha fazla emisyonu neden olduğu görülmektedir.

<i>Kaynak Türü</i>	<i>Teknoloji</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Düşük</i>	<i>Ortalama</i>
<i>Yenilenemez Enerji Kaynakları</i>	<i>Linyit</i>	1372	790	1054
	<i>Kömür</i>	1310	756	888
	<i>Petrol</i>	935	547	733
	<i>Doğal Gaz</i>	891	362	499
<i>Yenilenebilir Enerji Kaynakları</i>	<i>Güneş FV</i>	731	13	85
	<i>Biyokütle</i>	101	10	45
	<i>Nükleer</i>	130	2	29
	<i>Rüzgâr</i>	124	6	26
	<i>Hidroelektrik</i>	237	2	26

Tablo 2.5. Farklı elektrik üretim teknolojilerine ait emisyon değerleri (ton CO₂e/GWh).

(WNA, 2011: 6)

Enerji kaynaklarının çevresel etkilerinde baz alınan en önemli göstergelerden biri santrallerin sebep oldukları CO₂ emisyonlarının miktarıdır. 1.200 MW kapasitede ve yılda 3.200 saat çalışarak 3 milyon 840 bin MWh elektrik üretecek bir hidroelektrik santrale kıyasla, aynı miktar elektrik üretecek bir linyit santrali 5 milyon ton, bir taşkömür santrali 4 milyon ton, bir petrol santrali 3 milyon ton, bir doğalgaz santrali 2 milyon ton CO₂ emisyonuna neden olacaktır (MMO, 2008: 52).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ucuz olması, enerji dönüşümü sırasında atık bırakmaması veya çok az atık bırakmaları, çevreyi kirletmeyerek zarar vermemesi, son derece sağlıklı ve güvenilir olması bu kaynaklara büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sera gazı emisyonlarının azalmasına ve böylece iklim değişikliği ile mücadele etmede önemli bir katkı sağlayacaktır (CSB, 2016: 61).

2.4. Enerjinin Ekonomiye Etkisi

Enerjinin, kaynaklar itibarıyla çeşitlenmesi, sanayinin ve toplumun her alanında geniş ölçüde yer alması ve kullanılması enerjinin önemli ekonomik faaliyetlerden biri olarak ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Böylece enerji kaynakları ile ekonomik faaliyetler arasındaki ilişkiyi ele alan ve ekonominin bir dalı olan “*Enerji Ekonomisi*” oluşmuştur (İsmayilov, 2018: 25).

Enerji ile ekonomi arasında çift yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Ekonomik büyüme enerji tüketimini artırmakta, enerji tüketimi ise ekonomik büyümeyi etkilemektedir. Ekonomik faaliyetlerin yapısı ve büyüme hızlarıyla enerji kaynaklarının tüketimi arasında bir bağ bulunmaktadır. Enerji tüketimindeki %1’lik artış, GSYH’yi %0,12-0,39 oranında arttırmaktadır (Narayan ve Smyth, 2008: 2331-2341). Ülkelerin ekonomik büyümeleri, üretime bağlı olarak gelişim göstermelerinin neticesinde enerji ekonomik büyümeyi etkileyen bir unsur haline gelmiştir. Üretim, sanayi sektörü tarafından gerçekleştirilen bir faaliyettir ve en temel girdisi de enerjidir. Ayrıca, sanayi sektörü, bir ülkenin nihai enerji tüketimi içerisinde en fazla paya sahip olan alanıdır. Buradan yola çıkarak enerjinin ekonomik büyümeyi sağlamada önemli bir rolü bulunduğu söylenebilir.

Dünya enerji arzı ve talebi birbirleriyle ilişkili bir takım değişkenlere bağlıdır. Bu değişkenlerin en önemlileri ise, faydalanılabilir kaynak miktarı, kaynak temin edilebilirliği, ve ekonomilerin büyüme hızlarıdır. Bir ekonomide enerjiye olan talep; ülkenin bulunduğu coğrafyaya, nüfus artışına, gelir düzeyine, enerji fiyatlarına, enerji tüketim alışkanlıklarına ve mevcut sermaye büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir (Bilginoğlu, 1991: 124-126).

Sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte artan enerji kullanımı, enerjiyi stratejik bir konuma getirmiştir. Bu sebeple enerji, enerji kaynaklarına sahip olmayan ülkeler için tehlike unsuru olmaktadır. Dünya genelinde enerji kaynaklarının dağılımına bakıldığında enerji kaynaklarının pek de istikrarlı olmayan bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Söz konusu istikrarsızlıklar enerji kaynaklarına da yansımakta ve enerji arzı konusunda ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Nitekim bu istikrarsızlıklar 1973 ve 1978 yıllarında petrol krizlerinin yaşanmasına sebep olmuştur. 1973 yılında meydana gelen kriz sonrasında; petrol varil fiyatları 3 USD’den 13-15 USD’ye, 1978 yılından sonra ise; 14 USD’den 39 USD’ye yükselmiştir. Petrol

fiyatlarının artması sonucunda üretim maliyetleri de hızla artmıştır. Nitekim enerji arzı konusunda yaşanan bu darboğazın ülke ekonomilerine faturası oldukça ağır olmuştur. Netice itibarıyla ülkeler olası bir kriz durumunda olumsuz yönde etkilenmemek için bir takım yeni politika arayışlarına girmişlerdir. Bu doğrultuda izlenen enerji politikaları yeniden şekillendirilmekte; sürdürülebilir enerji arzınının sağlanmasına yönelik enerji sepetlerindeki kaynaklar çeşitlendirilmekte; hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle kaynaklarından oluşan yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır (Koçaslan, 2006: 5).

Enerji planlamaları, bir ülkenin refah düzeyine ve geleceğine etki edeceği için ekonomik düzen içerisinde, enerjinin hangi kaynaklardan ve ne miktarlarda sağlanacağı, hangi alanlarda kullanılacağı birer politik karar niteliği taşımaktadır.

Enerji tüketimi, ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren en önemli göstergelerinden biridir. Tüketilen enerji miktarındaki artış, ekonomik gelişmişlik ve refah seviyesinin de artışına neden olmaktadır. Tablo 2.6’da dünyanın en gelişmiş ülkeleri olan G7 ülkeleri (ABD, Almanya, Fransa, İngiltere, İtalya, Japonya, Kanada) ile gelişmekte olan G20 ülkelerinin (Türkiye, Arjantin, Avustralya, Brezilya, Çin, Endonezya, Güney Afrika, Güney Kore, Hindistan, Meksika, Rusya, Suudi Arabistan) 2017 yılı için; nüfusları, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) durumları (World Bank, 2019a) ile birincil enerji tüketim değerleri verilmiştir (BP, 2018). Tablo incelendiğinde, dünya toplam enerji arzının %29,31’i, dünya nüfusunun %10,18’ine sahip olan ve ekonomik büyüklükte sanayileşmiş ülkeler olarak adlandırılan G7 ülkeleri tarafından tüketildiği görülmektedir. Küresel enerji talebinin yaklaşık üçte biri, bu gelişmiş ülkeler tarafından gelmekte olup bu eğilim gelecek yıllarda da devam edeceği söylenebilir. Tabloda dikkat çeken diğer bir nokta ise, GSYİH sıralamasına göre şu an Dünya’nın en büyük ekonomisi konumunda bulunan ABD dünya toplam enerji arzının %16,54’ünü tüketirken, dünyanın en hızlı büyüyen ekonomisi ve en kalabalık ülkesi olan Çin’in, tek başına dünya toplam enerji arzının %23,18’ini tüketmekte oluşudur. Ekonomisindeki bu hızlı büyümeyle Çin’in enerjiye olan talebi hızla artmaktadır. Türkiye ise, ekonomik büyüklük olarak 852 milyar dolarlık GSYİH’siyle 192 ülke arasında 17’nci sırada bulunurken, birincil enerji tüketiminde %1,17’lik pay ile 16’ıncı sırada yer almaktadır. Türkiye enerji arzında yenilenebilir

enerji kaynakların kullanılması ile milli gelirin artması beklenmektedir (Çağlı vd., 2013: 170).

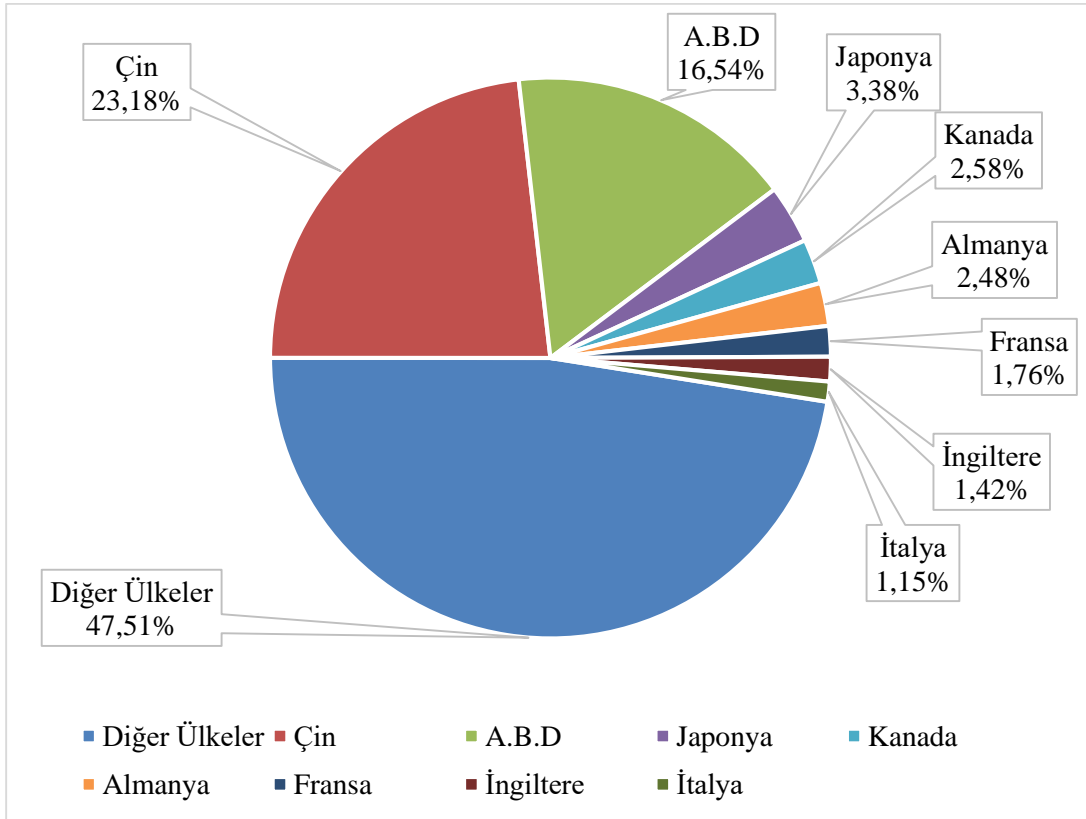
	<i>Nüfus</i>	<i>GSYİH (Milyar \$)</i>	<i>Birincil Enerji Tüketimleri (Milyon tep)</i>	<i>Birincil Enerji Tüketim Payı</i>
<i>A.B.D</i>	325.147.121	19.485	2.234,9	%16,54
<i>Almanya</i>	82.657.002	3.693	335,1	%2,48
<i>Fransa</i>	66.865.144	2.586	237,9	%1,76
<i>İngiltere</i>	66.058.859	2.638	191,3	%1,42
<i>İtalya</i>	60.536.709	1.947	156,0	%1,15
<i>Japonya</i>	126.785.797	4.860	456,4	%3,38
<i>Kanada</i>	36.540.268	1.647	348,7	%2,58
G7 TOPLAM	764.590.900	36.856	3.960,4	%29,31
<i>Arjantin</i>	44.044.811	643	85,9	%0,64
<i>Avustralya</i>	24.601.860	1.331	139,4	%1,03
<i>Brezilya</i>	207.833.831	2.054	294,4	%2,18
<i>Çin</i>	1.386.395.000	12.143	3.132,2	%23,18
<i>Endonezya</i>	264.645.886	1.015	175,2	%1,30
<i>Güney Afrika</i>	57.000.451	349	120,6	%0,89
<i>Güney Kore</i>	51.466.201	1.531	295,9	%2,19
<i>Hindistan</i>	1.338.658.835	2.653	753,7	%5,58
<i>Meksika</i>	124.777.324	1.158	189,3	%1,40
<i>Rusya</i>	144.496.740	1.579	698,3	%5,17
<i>Suudi Arabistan</i>	33.099.147	689	268,3	%1,99
<i>Türkiye</i>	81.101.892	852	157,7	%1,17
G20 TOPLAM	4.522.712.878	62.851	10.271,2	%76,02
AVRUPA BİRLİĞİ	512.191.098	17.345	1.689,2	%12,50
DÜNYA	7.510.990.456	80.886	13.511,2	%100,00

Tablo 2.6. 2017 Yılı G7 ve G20 ülkelerinde nüfus, GSYİH, birincil enerji tüketimi.

(BP, 2018; World Bank, 2019a)

Şekil 2.8’de, Çin ile G7 ülkelerinin dünya toplam enerji arzındaki enerji tüketim payları gösterilmiştir. Dünya genelinde tüketilen enerjinin yarısından fazlası (%52,49) sadece bu sekiz ülke tarafından tüketilmektedir (BP, 2018). Bir ülkenin ekonomik büyümesini ve gelişmesini sürdürülebilir kılması için, ihtiyaç duyduğu enerjiye

zamanında erişmesi gerekmektedir. Bu gelişmiş ülkelerin enerji ihtiyaçları için, enerji kaynaklarında sürekliliğin sağlanması anlamına gelirken, enerji ihtiyacı her yıl daha da artan gelişmekte olan ülkeler için ise, yeni enerji kaynaklarının bulunması/karşlanması anlamına gelmektedir (Yazar, 2011: 11).



Şekil 2.8. Çin ile G7 ülkelerinin dünya toplam enerji arzındaki enerji tüketim payları (%).
(BP, 2018)

Enerjinin ekonomi için önemli bir unsur olması nedeniyle dünya devletleri enerji kaynaklarını elde etmek ve yönetmek için birbirleriyle yarışmaktadır. Bu sebeple, ulusal güç açısından enerji kaynaklarına erişimin önemi giderek artmaktadır.

2.5. Enerji Ulusal Güç İlişkisi

En yalın ifadeyle güç kavramı Robert A. Dahl tarafından, “*A aktörünün B aktörü üzerinde sahip olduğu ve B'nin aksi takdirde yapmayacağı bir şeyi, B'ye yaptırmasına yarayan unsur*” olarak tanımlanmaktadır (Dahl, 1957: 202).

Ülkelerin küresel jeopolitik sistemdeki durumlarını belirlemek için ulusal güçlerinin değerlendirilmesi, ölçülmesi ve ulusal güçlerinin karşılaştırılması her zaman siyaset bilimi ve uluslararası ilişkiler dalında çalışan bilim insanlarının temel ilgi alanlarından biri olmuştur. Bu açıdan birçok uzman, yöntemler ve tek değişkenli ile çok değişkenli modeller oluşturarak ulusal gücü değerlendirmeye çalışmışlardır (Zarghani, 2008: 230).

Alman bir fizikçi olan Wilhelm Fucks (1902–1990), 1965 yılında yayınlamış olduğu “*Güç Formülleri: Nüfus, Ekonomi, Potansiyeller Üzerine Tahminler (Formeln zur Macht: Prognosen über Völker, Wirtschaft, Potentiale)*” adlı kitapta bir ulusun gücünün, enerji tüketimi, çelik üretimi ve nüfus ile hesaplanabileceğini belirtmiştir. Fucks’un eşitliği,

$$Ulusal Güç = \sqrt[3]{N} \cdot E \cdot \zeta \quad (\text{Eş. 2.1})$$

şeklinde dir. Eşitlikte; N , Nüfus; E , Enerji tüketimi (mtep/yıl), ζ , Çelik üretimi (ton/yıl)’dir. Eş. 2.1’de nüfusun üçüncü kökü alınarak nüfus etkisi azaltılmıştır. Nitekim Fucks, 1965 yılında geliştirmiş olduğu yaklaşım ile dünya güçlerini o zamana uygun bir şekilde sıralayabilmişti (İmer, 2008: 3-5).

Tablo 2.7’de, Fucks’un eşitliği kullanılarak 2017 yılı için ulusal güç kıyaslaması yapılmıştır (BP, 2018; World Bank, 2019a; World Steel Association, 2019: 1-2). Fucks tarafından geliştirilen bu yaklaşıma göre Çin, sahip olduğu nüfus, enerji tüketimi ve çelik üretimi göstergeleriyle açık ara farkla birinci sırada yer almaktadır. Çıkan sonucun günümüz dünya güçleri sıralamasını tam olarak yansıtamamasının nedeni ulusal gücün yalnızca bu parametreler ile açıklanamayacak olmasıdır. Ancak şu da bir gerçektir ki ülkelerin sahip oldukları doğal kaynaklar ulusal güç bileşenleri içerisinde stratejik bir öneme sahiptir. Morgenthau’ya göre, doğal kaynaklar bir devleti diğer devletler karşısında güçlü kılan nitel unsurlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, tarihsel olarak bakıldığında da, enerji güvenliği ile ulusal güç arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır (Karabulut, 2016: 32). Bu bağlamda, enerji kaynaklarının yeryüzünde asimetrik bir şekilde dağılmış olması, bu kaynaklara yeterince sahip olamayan ülkeler için tehdit unsuru oluşturmaktadır. Özellikle ABD, Çin gibi enerji

tüketimleri fazla olan ülkelerde, gelecekte enerjinin nereden nasıl karşılanacağı önemli bir mesele haline gelmiştir.

<i>Sıra</i>	<i>Ülke</i>	<i>Nüfus (Milyon)</i>	<i>Birincil Enerji Tüketimleri (Milyon tep)</i>	<i>Ham Çelik Üretimi (Bin Ton)</i>	<i>Ulusal Güç Göstergesi</i>
1	<i>Çin</i>	1.386,4	3.132,2	870,9	30.415.222
2	<i>Avrupa Birliği</i>	512,2	1.689,2	168,5	2.277.528
3	<i>A.B.D</i>	325,1	2.234,9	81,6	1.254.215
4	<i>Hindistan</i>	1.338,7	753,7	101,5	842.743
5	<i>Rusya</i>	144,5	698,3	71,5	261.967
6	<i>Japonya</i>	126,8	456,4	104,7	239.968
7	<i>Güney Kore</i>	51,5	295,9	71,0	78.180
8	<i>Almanya</i>	82,7	335,1	43,3	63.201
9	<i>Brezilya</i>	207,8	294,4	34,8	60.648
10	<i>Türkiye</i>	81,1	157,7	37,5	25.614
11	<i>Meksika</i>	124,8	189,3	20,0	18.876
12	<i>Kanada</i>	36,5	348,7	13,2	15.283
13	<i>Fransa</i>	66,9	237,9	15,5	14.972
14	<i>İtalya</i>	60,5	156,0	24,1	14.742
15	<i>Endonezya</i>	264,6	175,2	5,2	5.844
16	<i>İngiltere</i>	66,1	191,3	7,5	5.793
17	<i>Suudi Arabistan</i>	33,1	268,3	4,8	4.162
18	<i>Güney Afrika</i>	57,0	120,6	6,3	2.924
19	<i>Avustralya</i>	24,6	139,4	5,3	2.160
20	<i>Arjantin</i>	44,0	85,9	4,6	1.403

Tablo 2.7. Fucks eşitliğine göre 2017 yılı ulusal güç sıralaması.

(BP, 2018; World Bank, 2019a; World Steel Association, 2019: 1-2)

Buraya kadar olan kısımda, küresel enerji arzından ve enerji öneminden bahsedilmiştir. Yıllar itibarıyla küresel enerji arzının artış trendi içerisinde olması, fosil kaynakların giderek azalması ve dünya genelinde iklim değişikliği konusunda tedirginliğin başlaması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Bu sebeple bir sonraki bölümde, gelecekte enerji talebinin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi anlatılmıştır.

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN GÜNEŞ ENERJİSİ

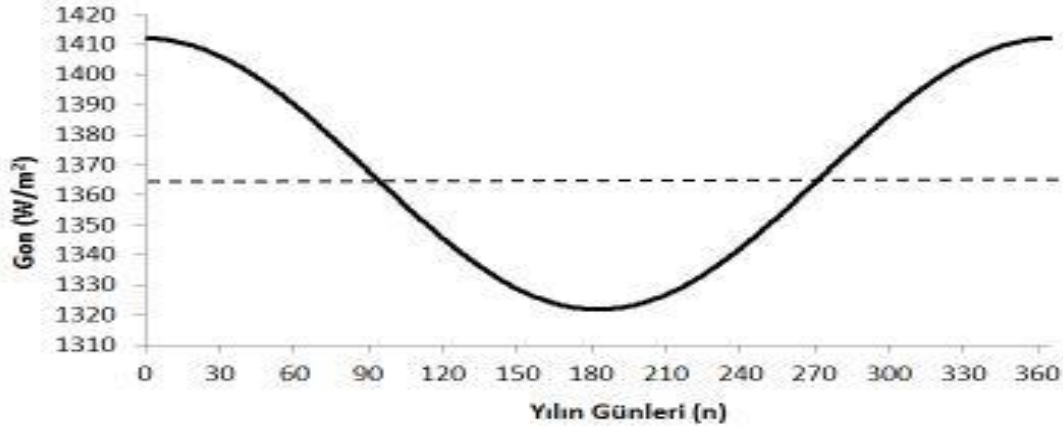
Bu bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisine dair bilgilere yer verilmiştir. Artan enerji talebinin karşılanmasında güneş enerjisinin önemli bir potansiyele sahip olduğunu gösterebilmek için “Enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisinin teorik potansiyeli nedir?, Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren teknolojiler nelerdir?” sorularına yanıt aranmıştır.

3.1. Enerji Kaynağı Olarak Güneş

Güneş, dünyanın sahip olduğu en önemli enerji kaynağıdır. Güneş, dünyada yaşamın varlığı ve devamı için vazgeçilmez bir unsur olmakla birlikte pekçok doğal enerji kaynaklarının da kökeni olmaktadır.

Güneş enerjisi, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden açığa çıkan enerjinin ışıyım biçiminde uzaya yayılmasıdır. Güneşten dünya üzerine metrekare alan başına watt olarak düşen bu enerji akışına “Güneş Işıyımı” denilmektedir. Bu ışıyımın daha milyonlarca yıl süreceğini göz önünde bulundurulursa, güneş enerjisinin dünya için sonsuz bir enerji kaynağı olduğu söylenebilir.

Güneş ışıyımının şiddeti dünya atmosferinin dışında, ortalama 1.367 W/m^2 değerindedir. Bu değer “Güneş Sabiti” olarak adlandırılmaktadır. Yıl boyunca atmosfer dışına gelen ışıyım miktarı dünya ve güneş arasındaki mesafeye bağlı olarak (147 milyon km-152 milyon km) 1.325 W/m^2 ile 1.420 W/m^2 değerleri arasında değişebilmektedir. Şekil 3.1’de, atmosfer dışına gelen ışıyım şiddetinin aylara göre değişimi gösterilmektedir (Şahan vd., 2015: 99). Dünyanın şekli ve atmosferden dolayı güneş enerjisinin yeryüzündeki dağılımı büyük farklılıklar göstermekte olup, yeryüzüne ulaşabilen güneş enerjisi miktarı $0-1.100 \text{ W/m}^2$ mertebesindedir (DEK, 2009: 2).



Şekil 3.1. Yılın günlerine bağlı olarak atmosfer dışı güneş ışınımının değişimi.

(Kesikli çizgi güneş sabitinin yerini göstermektedir.) (Şahan vd., 2015: 99)

Önceki bölümde üzerinde durulduğu üzere, fosil kaynaklarının sınırlı ve tükenir bir enerji kaynağı olması, hem üretimleri hem de tüketimleri sırasında çevre kirliliğine sebep olması, bu kaynaklara sahip olamayan ülkelerin enerji arz sorunu yaşamaları, enerji ihtiyacının sürekli artması neticesinde sınırsız, çevre ile uyumlu ve yenilenebilir olan kaynak ve teknolojilerin araştırılmasını ve geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu sebepten dolayı, içinde güneş enerjisinin de yer aldığı alternatif enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisi yeryüzünde en yaygın bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre; potansiyeli, kullanım kolaylığı, temizliği, yenilenebilirliği ve çevre dostu olması gibi nedenler ile daha kolay bir şekilde yaygınlaşabilecek durumdadır. Diğer enerji kaynaklarına göre; kurulum maliyetlerinin yüksekliği, düşük verim, düşük kapasite faktörü gibi bazı teknolojik ve ekonomik zorlukların aşılması, güneş enerjisinin gelecekte daha da cazip hale gelmesini sağlayacaktır (DEK, 2009: 1). Güneş enerjisinin daha düşük maliyetle daha yaygın ve verimli kullanılabilmesi için son zamanlarda yapılan Ar-Ge çalışmaları hız kazanmıştır.

Güneş enerjisine dair teknolojilerin kullanılması, ülkelerin mevcut teknolojilerini geliştirmesine, üretim maliyetlerini azaltmasına ve ekonomilerine katkı sağlamasına yardımcı olmasının yanısıra enerji üretiminde dışa bağımlılığın azaltılmasında ve arz güvenliğinin sağlanmasında ciddi miktarda katkı sağlamaktadır. Bu nedenle güneş enerjisi potansiyelinin etkin bir şekilde kullanılması önemli olacaktır.

3.2. Güneş Enerjisinin Teorik Potansiyeli

Güneş enerjisi, dünyadaki yenilenebilir kaynaklar arasında en yüksek teorik potansiyele sahip olanıdır. Dünya atmosferinin en uç noktasında, güneş ışınlarına dik bir düzleme gelen güneş enerjisi miktarı yaklaşık 1.370 W/m^2 'dir. Herhangi bir anda güneş ışınını kesen dünyanın enine kesit alanı πr^2 'dir (dünyanın yarıçapı, $r = 6.378 \text{ km}$). Ancak, bu güneş ışınının zaman içinde ortalaması alındığı dünyanın yüzey alanı $4\pi r^2$ 'dir. Bu nedenle, dünyanın dış atmosferine çarpan ortalama güneş enerjisi miktarı, $(1.370 \text{ W/m}^2)/4 = 342,5 \text{ W/m}^2$ 'dir. Atmosferden dolayı yeryüzüne bu enerjinin tamamı ulaşmamaktadır. Yeryüzü yüzeyine gelen güneş enerjisinin yaklaşık %30'u atmosferden geri yansıtılırken, yaklaşık %19 kadarlık kısmı ise atmosfer ve bulutlar tarafından soğrulmaktadır. Bu nedenle, teorik olarak dünya yüzeyine çarpan ortalama güneş enerjisi miktarı $342,5 \text{ W/m}^2 \times (1-0.49) = 174,7 \text{ W/m}^2$ olarak hesaplanmaktadır (Tsao vd., 2019: 10). Tablo 3.1'de, Zenit açısına (Dünya yüzeyine dik gelen açı ile güneş arasındaki açıdır) bağlı olarak atmosfer üzerine düşen güneş enerjisi miktarındaki değişim gösterilmiştir (Eriksson, 2019: 44). Burada yatay düzleme gelen Zenit açısı arttıkça atmosfer üzerine düşen güneş enerjisi miktarı azalmaktadır. Yani birim yüzeye düşen enerji miktarının artması için güneş ışınının, birim yüzeye dik açı ile gelmesi gerekmektedir.

<i>Zenit Açısı</i>	<i>Atmosfer Üstündeki Güneş Enerjisi Miktarı (W/m^2)</i>	<i>Oran (%)</i>
0°	1370	%100
10°	1349	%98
30°	1186	%87
60°	685	%50
90°	0	%0

Tablo 3.1. Zenit açısına bağlı olarak atmosfer üzerine düşen güneş enerjisi miktarı.

(Eriksson, 2019: 44)

Dünya yüzeyinin farklı bölgelerine çarpan güneş enerjisi miktarı farklıdır. Yeryüzündeki yerin %40'ı (sıcak kuşakta) yaklaşık 225 W/cm^2 güneş enerjisi alırken, %52'si (ılıman kuşakta) yaklaşık 150 W/m^2 , %8'i (soğuk kuşakta) ise yaklaşık 75 W/m^2 güneş enerjisi almaktadır. Dünya genelinde ortalama güneş enerjisi miktarı ise

174,7 W/m² olarak hesaplanmaktadır (Tsao vd., 2019: 10-11). Şekil 3.2’de, dünya genelinde güneş ışınımını en fazla alan bölgeler gösterilmiştir (Altuntop ve Erdemir, 2013: 70).



Şekil 3.2. Dünya genelinde güneş ışınımını en fazla alan bölgeler.
(Altuntop ve Erdemir, 2013: 70)

Dünyanın yüzey alanı ($4\pi r^2$) üzerindeki güneş enerjisinin teorik potansiyeli ise;

$$\begin{aligned} P &= (174,7 \text{ W/m}^2) \times (4\pi r^2) \\ &= (174,7 \text{ W/m}^2) \times 4\pi \times (6.378 \times 10^3 \text{ m})^2 \\ &= \sim 89.300 \text{ TW'dır.} \end{aligned}$$

2018 yılı içerisinde dünya genelinde üretilen toplam elektrik gücü 3 TW (26.672 TWh) kadardır (IEA, 2019d: 25). Yeryüzüne güneşten gelen güç ise, bu değer 28.000 katından daha fazladır. Bir yıl boyunca dünyanın tüm yüzeyine düşen güneş enerjisi miktarı; dünyanın bilinen petrol rezervinin 281 katı, bilinen kömür rezervinin ise 93 katıdır [(BP, 2018) verilerinden yararlanılarak araştırmacı tarafından hesaplanmıştır.].

1970’lerden sonra güneş enerjisinden faydalanma konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır. Yöntem, teknolojik düzey ve kullanılan malzeme açısından çeşitlilik gösteren farklı teknolojiler ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmektedir (YEGM, 2019).

3.3. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretim Teknolojileri

Günümüzde güneş enerjisi iki farklı şekilde değerlendirilmektedir. Bunlar; ısıya dönüştürme ve elektrik enerjisine çevirmedir. Bunlardan ikincisi olan güneş

enerjisinden elektrik üreten tesisler, Devlet Planlama Teşkilatının 2001 yılında hazırladığı raporda şöyle tanımlanmıştır (DPT, 2001: 30-31):

“Watt mertebesinde (küçük haberleşme sistemleri veya diğer sistemler) kW mertebesine (kırsal bölgelerde katodik koruma, sinyalizasyon, haberleşme sistemleri, pompalama ve sulama tesisleri, evler, çiftlikler gibi şebekeden bağımsız tüketiciler ile şebekeye bağlı evler, tesisler) ve MW mertebesine kadar uzanan üretim seviyesi ile birden fazla kesimin elektrik ihtiyacının karşılanmasına yardımcı olmaktadır.”

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri (dolaylı dönüşüm) ve fotovoltaik teknolojisi (doğrudan dönüşüm) olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Fotovoltaik teknolojisinde “güneş hücreleri” kullanılırken, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinde “aynalar (kollektörler)” kullanılmaktadır.

3.3.1. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojileri

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinde (concentrated solar power-CSP) güneş ışını, çeşitli yoğunlaştırıcılar (aynalar) vasıtasıyla belli bir bölgede toplanarak yüksek sıcaklıkta ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Güneşten elde edilen bu ısı enerjisi ile ısı transferini sağlayan akışkanın (su, sentetik yağ, eriyik tuz v.b.) ısıtılması sağlanmaktadır. Böylece geleneksel termik santrallerde olduğu gibi elektrik üretmek için ısı ve buhar üretilmektedir (Şekil 3.3). Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri bulutlu gökyüzü altında veya gün batımından sonra elektrik üretmek için bir ısı depolama sistemi ile donatılabilmektedir. Termal depolama sayesinde kapasite faktörü önemli ölçüde artabilmektedir (IRENA, 2013: 1-3).



Şekil 3.3. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinde elektrik üretim süreci.

Bu tesislerin çalışması için doğrudan gelen güneş ışınımı gerekmektedir. Bu nedenle, Orta Doğu, Kuzey Afrika, Güney Afrika, Hindistan, Amerika Birleşik Devletleri'nin güneybatısı, Meksika, Peru, Şili, Batı Çin, Avustralya, Güney Avrupa ve Türkiye bu sistemlerin kurulumu için uygun bölgelerdir (IRENA, 2013: 3). Dünya

genelinde yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinin kurulu gücü, 2000 yılında 419 MW iken, 2018 yılında 5.465,7 MW'a ulaşmıştır (Tablo 3.2) (IRENA, 2019b). Bu sistemlerin hala gelişim aşamasında olması sebebiyle ilk yatırım ve elektrik enerjisi üretim maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle küresel çapta kullanımları henüz yaygın değildir.

	2000	2005	2010	2015	2018
<i>İspanya</i>	0,0	0,0	732,0	2.304,0	2.304,0
<i>ABD</i>	419,0	388,0	473,0	1.758,0	1.758,0
<i>Fas</i>	0,0	0,0	20,0	180,0	530,0
<i>Güney Afrika</i>	0,0	0,0	0,0	100,0	400,0
<i>Hindistan</i>	0,0	0,0	0,0	228,5	228,5
<i>B.A.E.</i>	0,0	0,0	0,0	100,1	100,1
<i>Suudi Arabistan</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0
<i>Cezayir</i>	0,0	0,0	25,0	25,0	25,0
<i>Mısır</i>	0,0	0,0	0,0	20,0	20,0
<i>Meksika</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	14,0
<i>Çin</i>	0,0	0,0	2,7	13,9	13,9
<i>İtalya</i>	0,0	0,0	4,7	6,1	6,1
<i>İsrail</i>	0,0	0,0	6,1	6,1	6,1
<i>Tayland</i>	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0
<i>Almanya</i>	0,0	0,0	2,0	2,0	2,0
<i>Avustralya</i>	0,0	0,4	3,0	3,0	2,0
<i>Türkiye</i>	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
<i>Romanya</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
<i>Kore Cumhuriyeti</i>	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
<i>Dünya</i>	419,0	388,4	1.268,5	4.752,9	5.465,7

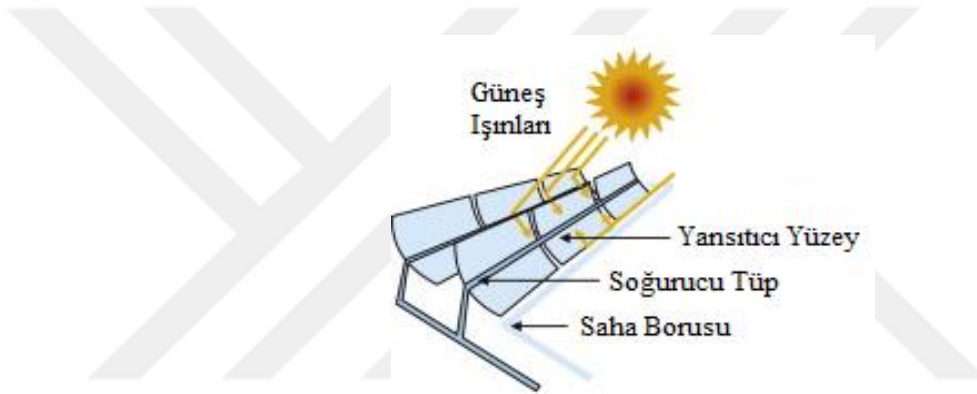
Tablo 3.2. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri kurulu gücü (MW).

(IRENA, 2019b)

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri, güneş ışığını yoğunlaştırma prensibine, alıcıların yapılandırılmasına, kullanılan ısı transfer akışkanına ve ısı depolamasına dahil olup olmamasına göre; Parabolik Oluk Kollektör Sistemi, Fresnel Oluk Kollektör Sistemi, Güneş Kuleli Sistem, Parabolik Çanak Sistemi olmak üzere dört grupta toplanmaktadır.

3.3.1.1 Parabolik oluk kollektör sistemi

Parabolik oluk kollektör sistemi; güneş kollektörleri (aynalar), ısı alıcıları (tüpler) ve destek yapılarından oluşmaktadır (Şekil 3.4) (IEA, 2014a: 12). Parabolik şekilli aynalar güneş ışınını kollektörün odağında yer alan ısı alıcılarının üzerine odaklarlar (IRENA, 2012b: 4-5). Isı alıcıları, enerji emilimini en üst seviyeye çıkarmak ve kızılötesi ışınlamayı en aza indirmek için özel bir kaplamaya sahiptirler. Güneş ısısı, alıcı tüp içerisinde akan bir ısı transfer akışkanı (sentetik yağ, eriyik tuz v.b.) tarafından taşınır ve buhar üretimi için buhar üreticisine aktarılır (IRENA, 2013: 7-8).

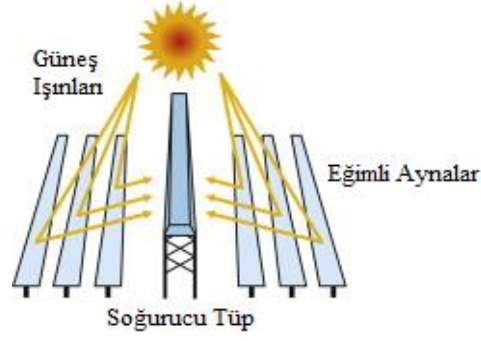


Şekil 3.4. Parabolik oluk kollektör sistemi.

(IEA, 2014a: 12)

3.3.1.2 Fresnel oluk kollektör sistemi

Fresnel oluk kollektör sistemi, parabolik oluk kollektör sistemine benzemektedir. Bu sistemde, güneş ışınını ayna alanının birkaç metre yukarısındaki sabit bir alıcıya odaklandırmak için farklı açılarda yerleştirilmiş düz veya hafif kavisli aynalar kullanılmaktadır (Şekil 3.5) (IEA, 2014a: 12). Her ayna hattı güneş ışınını sabit alıcıya odaklayabilmek için güneş izleme sistemi ile donatılmıştır. Fresnel oluk kollektör sisteminin optik verimliliği, üretim ve kurulum maliyeti parabolik oluk kollektör sistemine kıyasla daha düşüktür. (IRENA, 2013: 8-9).

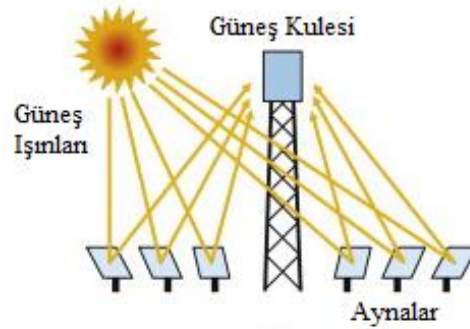


Şekil 3.5. Fresnel oluk kollektör sistemi.

(IEA, 2014a: 12)

3.3.1.3 Güneş kuleli sistem

Güneş kuleli tesislerde “*heliostat*” adı verilen bilgisayar kontrollü çok sayıda ayna, güneşi iki eksen üzerinde ayrı ayrı izler ve güneş ışınımını elektrik üreten merkezi bir kulenin üzerine monte edilmiş tek bir alıcıya yoğunlaştırır (Şekil 3.6) (IEA, 2014a: 12). Güneş kuleli sistemler diğer yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemelerine kıyasla; verimlilik, ısı depolama, kapasite faktörü ve maliyet açısından bazı avantajlara sahiptir (IRENA, 2013: 9-11).



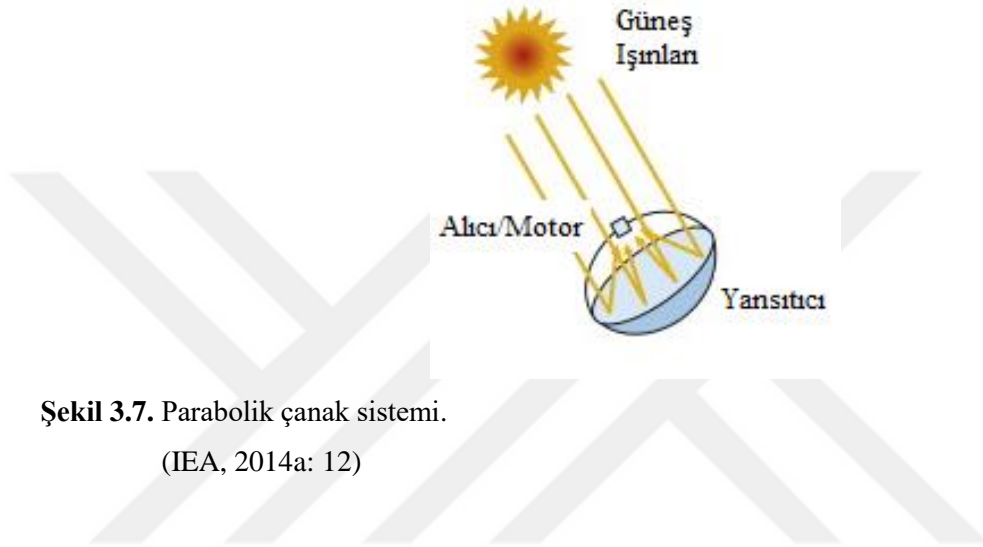
Şekil 3.6. Güneş kuleli sistem.

(IEA, 2014a: 12)

3.3.1.4 Parabolik çanak sistemi

Parabolik çanak sisteminde güneş ışını, çanak şeklindeki aynaların odak noktasına yerleştirilmiş stirling motoru veya mikro türbinden oluşan bir alıcının

üzerine odaklandırılır (Şekil 3.7) (IEA, 2014a: 12). Diğer yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinin aksine ayrı bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu özelliği, sistemin su kısıtlı bölgelerde kullanıma uygun olmasını sağlar. Elektrik üretim maliyetinin oldukça yüksek olması diğer sistemlerle rekabet gücünü olumsuz etkilemektedir (IRENA, 2013: 11-12).



Şekil 3.7. Parabolik çanak sistemi.
(IEA, 2014a: 12)

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri, fotovoltaik güneş teknolojileri gibi belli bir gelişmişliğe ve doygunluğa henüz erişmemiş olan sistemlerdir. Elektrik üretim maliyetlerinin yüksek olması bu sistemlerin yaygınlaşmasında ki en büyük sorun olmaktadır.

3.3.2. Fotovoltaik Teknolojisi

Güneş pilleri olarak da adlandırılan fotovoltaikler, arada başka bir süreç olmadan güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen elektronik cihazlardır. Günümüzde FV, en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojilerinden biridir ve gelecekteki küresel elektrik enerjisi üretimini karşılamada önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Fotovoltaik teknolojisi ile ilgili bilgiler dördüncü bölümde daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Tablo 3.3'de, güneş enerjisinden elektrik üretim sistemlerinin karşılaştırılması verilmiştir (Power From Sunlight, 2019).

<i>CSP</i>	<i>FV</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CSP Sistemlerinin elektrik üretim maliyeti FV sistemlerine göre daha yüksektir. • CSP Sistemleri büyük ölçekli güneş enerjisi santralleridir. • CSP Sistemlerinde elektrik üretimi için doğrudan güneş ışığı kullanılır. • CSP Sistemlerinde güneş ışını çeşitli yoğunlaştırıcılar vasıtasıyla belli bir bölgede toplanarak öncelikle ısı enerjisi sonrasında ise elektrik enerjisi üretilmektedir. • CSP Sistemlerinde işletme ve tesis bakım maliyetleri yüksektir. • CSP Sistemlerinde türbin döngüsünü soğutmak için büyük miktarda su gerekir. • CSP Sistemleri sadece güneşli bölgelerde ekonomik olarak uygulanabilir. • CSP sistemlerini inşa etmek için daha fazla alan ve zaman gerektirir. 	<ul style="list-style-type: none"> • FV Sistemlerinin elektrik üretim maliyeti CSP sistemlerine göre çok daha ucuzdur. • FV Sistemleri kullanım için daha fazla olanak sunarlar. (büyük güçte FV Santralleri, çatı sistemleri, küçük ev aletleri) • FV Sistemlerinde elektrik üretimi için doğrudan ve dolaylı güneş ışığı kullanılır. • FV Sistemlerinde güneş ışını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. • FV Sistemlerinde işletme ve tesis bakım maliyetleri düşüktür. • FV Sistemlerinde ek soğutma sistemine ihtiyaç yoktur. • FV sistemleri aynı zamanda daha az güneş ışığına sahip bölgelerde ekonomik olarak uygundur. • FV sistemleri daha kolay ve çok daha kısa sürede oluşturulabilir.

Tablo 3.3. CSP ve FV sistemlerinin karşılaştırılması.

(Power From Sunlight, 2019)

Söz konusu teknolojiler arasındaki en belirgin fark enerji dönüşüm sürecinde görülmektedir. Fotovoltaik teknolojisinde, güneş enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülürken, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinde güneş enerjisi ilk olarak ısı enerjisine, daha sonra ise elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu teknolojilerden hangisinin tercih edileceği ise; kurulu güç, maliyet, verimlilik, sistemin kurulması planlanan sahanın özelliği gibi bir çok etkene bağlı olup tüm bu değişkenlerin birbiriyle kıyaslanması sonucunda yatırım kararı verilmektedir. Fotovoltaik teknolojisinin, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerine göre elektrik üretim maliyetinin daha ucuz olması, elektrik üretiminde bu teknolojinin daha çok yaygınlaşmasına neden olmuştur. Bir sonraki bölümde fotovoltaik teknolojisine ilişkin detaylı bilgiler yer almaktadır.

4. ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNDE FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde araştırmanın temel sorularından olan, “*Fotovoltaik sistemlerden nasıl elektrik üretilir?*, *Fotovoltaik sistemlerin diğer teknoloji türlerine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri nelerdir?*, *Fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşması için hangi enerji politikaları izlenmektedir?* sorularına yanıt aranarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerden en yaygın kullanımda olan fotovoltaik teknolojisi anlatılmıştır. Fotovoltaik sistemlerin maliyet ve verim analizleri yapılarak bu sistemlerin zaman içerisindeki gelişimi ve dünyadaki durumu değerlendirilmiştir.

4.1. Fotovoltaik Teknolojinin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik (Photovoltaic-PV) sözcüğü, Yunancada ışık anlamına gelen “*photos*” ve ve elektriğin öncüsü Alessandro Volta’dan gelen “*voltaic*” sözcüklerinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Fotovoltaik, görünür veya başka ışık radyasyonuna maruz kaldığında gerilim üretebilme kabiliyetini ifade etmektedir. Fotovoltaik özellik sonucu elektrik enerjisi üreten yapılar “*fotovoltaik hücre*” olarak adlandırılmaktadır (Graf, 1999: 563). Çıkış gücünü artırmak amacıyla birden fazla fotovoltaik hücrenin bir yüzey üzerinde birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak oluşturulan yapıya ise “*fotovoltaik modül*” adı verilmektedir.

Fotovoltaik hücrelerinin tarihi, Fransız fizikçi Alexander Edmond Becquerel’in 1839 yılında fotovoltaik etkiyi keşfetmesiyle başlamaktadır. Becquerel, platin tabakalar üzerinde yaptığı bilimsel çalışmalar sırasında elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemiştir. Katı cisimlerde ise, fotovoltaik etki ilk olarak 1876 yılında William Grylls Adams ve Richard Evans Day tarafından selenyum kristalleri üzerinde gösterilmiştir. Selenyum güneş pilleri, güneş ışığını yeterince dönüştüremese de ısı veya hareketli parçalar olmadan katı bir malzemenin ışığı elektriğe dönüştürebileceğini kanıtlamıştır. Becquerel’in fotovoltaik etkiyi keşfetmesinden yaklaşık 44 yıl sonra, Amerikalı bir mucit olan Charles Fritts ise, selenyum kullanarak ilk güneş hücrelerini icat etmiştir (EERE, 2019: 1-12).

20. yüzyılın başlarında ucuz olması, bol miktarda bulunması ve birçok uygun kimyasal özellik içermesi nedeniyle fotovoltaiklerde selenyum yerine silikon tercih

edilmiştir. İlk silikon FV hücreleri, güneş enerjisinin %1'inden daha azını dönüştürmeleri bu teknolojinin 1950'lere kadar geçerli bir ticari güç kaynağı olarak görülmemesine neden olmuştur. 1954 yılında, Bell Laboratuvarları araştırmacılarından Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson'un, günlük elektrik ekipmanlarını çalıştırmak için güneş enerjisini yeterli güce dönüştürecek %4 (daha sonra %6) verimli silikon fotovoltaik hücre geliştirmeleri fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olmuştur. Birinci nesil FV hücresi olarak da bilinen bu ilk güneş FV sisteminden, zaman içerisinde %15-%20 verim elde edilse de yüksek üretim maliyeti nedeniyle, güneş enerjisi endüstrisi geleneksel enerji kaynaklarıyla rekabet edememiştir. 1956 yılında bir watt'lık bir hücre, watt başına yaklaşık 300 dolara mal olurken, fosil yakıt bazlı enerji santralleri watt başına 50 sente üretebilmekteydi. Yüksek maliyetten dolayı bu yıllarda fotovoltaik teknolojisi yeterli ilgili göremese de, NASA bu yenilikçi teknolojiyi uzay araçlarının enerji gereksinimini sağlamak için kullanmıştır. Günümüzde hala fotovoltaik teknolojisi, uzay çalışmalarında güvenilir enerji kaynağı olmayı sürdürmektedir (Hoang, 2017: 2-4).

1973 ve 1978 yıllarında dünya genelinde petrol krizlerinin yaşanması, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmaya teşvik etmiş, güneş enerjisine olan ilgiyi artırmıştır. Nitekim 1974 tarihli New York Times gazetesinin, “Enerji Kutlaştıkça, Bilim Yine Güneşe Bakıyor” başlıklı makalesinde o dönem güneş enerjisine olan ilgi şöyle ifade edilmiştir (Bayard, 1974: 31):

“Bugün, geleneksel yakıtların fiyatları artarken ve rezervleri azalırken, güneşten elde edilecek enerjinin hükümetlerin, sanayicilerin ilgisini neden çektiğini, bu enerji kaynağının nasıl yakalanacağını ve geniş bir ölçekte nasıl verimli olarak kullanılacağını öğrenmek için bilimadamlarını laboratuvarlara hapsetmelerini, çöllere göndermelerini ve çatılara çıkartmalarını anlamak zor olmasa gerek.”

Yaşanan petrol krizlerinden sonra fotovoltaik teknolojisine yönelik olarak dünya genelinde büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme süreci başlatılmıştır. Büyük şirketlerin de fotovoltaik teknolojiye yönelmeleri sonucunda zamanla FV hücrelerin verimleri artmış maliyetleri azalmıştır. FV hücrelerin verimlerine ve maliyetlerine ilişkin detaylı bilgiler ilerleyen başlıklarda verilmiştir.

1983 yılında dünya geneli fotovoltaik üretimi 21,3 MW'ı aşmıştır. 1994 yılında, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından %30 enerji dönüşüm verimini aşan

ilk fotovoltaik güneş pili geliştirilmiştir. 1999 yılına gelindiğinde ise, dünya genelinde fotovoltaik sistem kurulu güç kapasitesi 1.000 MW'a ulaşmıştır (EERE, 2019: 1-12).

2018 yılı içerisinde, laboratuvar şartlarında fotovoltaik hücrede %47,1, fotovoltaik modülde ise %40,6 verim ile yeni dünya rekoru elde edilmiştir (NREL, 2019a; NREL, 2019b). Bu dönemde dünya genelinde toplam fotovoltaik sistem kurulu güç kapasitesi 505,4 GW ulaşmıştır (IEA, 2019c).

Halihazırda fotovoltaik teknoloji geliştirme çalışmaları ve yatırımlar küresel çapta artarak devam etmektedir. Kendi teknolojisini oluşturmak amacıyla Türkiye'de de birtakım araştırma faaliyetleri yürütülmektedir.

4.2. Türkiye'de Fotovoltaik Teknolojinin Durumu

Ülkemizde ilk defa 1960'lı yılların başında güneş enerjisi alternatif enerji kaynağı olarak anlaşılmış ve bu konuda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1975 yılına gelindiğinde güneş konusunda ilk ulusal kongre İzmir'de gerçekleştirilmiş ve yine bu dönemde Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) bünyesinde ilk pasif güneş enerjisi uygulaması tesis edilmiştir. 1978 yılında Ege Üniversitesi bünyesinde kurulan Güneş Enerjisi Enstitüsü (EÜ-GEE) bu alanda kurulmuş olan ülkemizdeki ilk ve tek enstitü olup günümüzde halen faaliyetlerine devam etmektedir (EÜ-GEE, 2019). Türkiye'nin enerji ihtiyacının güneş santrallerinden karşılanmasını sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesi amacıyla 2009 yılında ODTÜ bünyesinde Güneş Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi (GÜNAM) açılmıştır. Ayrıca TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) ile çeşitli üniversiteler tarafından da fotovoltaik teknolojinin araştırılması ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bununla birlikte, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), gözlem istasyonları vasıtasıyla elde ettiği güneşlenme süresi, ışınım şiddeti ve diğer iklimsel verilerin kayıt edilmesi, değerlendirilmesi ve bu bilgilerin dağıtılması konusunda aktif olarak çalışmaktadır. Diğer taraftan, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM), içerisinde güneş enerjisinin de yer aldığı yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalara ve projelere destek sağlamaktadır.

1 Aralık 2014 tarihinde başlayan Milli Güneş Enerji Santrali Geliştirme Projesi (MİLGES) ile, Türkiye'nin kendi teknolojisi ile fotovoltaik güneş enerjisine dayalı

santral teknolojilerinin geliştirilmesi, ekipman ihtiyaçlarının yerli üretilmesi ve dünyaya ihracat yapan bir ülke konumuna gelebilmesi için gerekli altyapının oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir araya gelen TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü, ODTÜ-GÜNAM ve özel sektörün işbirliği sonucunda Türkiye'nin ilk endüstriyel fotovoltaik güneş hücresi üretim tesisi kurulmuştur. Yapılan deneme üretiminde multi kristal standart hücrelerde %18,5 ve üzeri verime, mono kristal PERC tipi hücrelerde %21 civarında verimliliğe ulaşılmıştır. Proje kapsamında; fotovoltaik hücre geliştirme çalışmaları ODTÜ-GÜNAM, fotovoltaik hücre ve panel üretim çalışmaları özel sektör, fotovoltaik merkezi evirici geliştirilmesi ve üretimi ile güneş enerji santral izleme ve kontrol sistemi (SCADA) çalışmaları TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü tarafından yürütülmektedir (MİLGES, 2019).

FV üretim faaliyetleriyle ilgili olarak, şu anda Türkiye'de hammadde ve silikon devre dilimi (wafer) üreticisi bulunmamaktadır. Türkiye'de 3 şirket güneş pili üretirken, yıllık 3.500 MW'tan fazla üretim kapasitesine sahip 30'dan fazla FV modülü üreticisi bulunmaktadır. Türkiye ayrıca yurtdışında birkaç üreticiye FV modül malzemelerinin (cam, çerçeve v.b.) tedarik edilmesinde evsahipliği yapmaktadır (Solar Power Europe, 2019: 73).

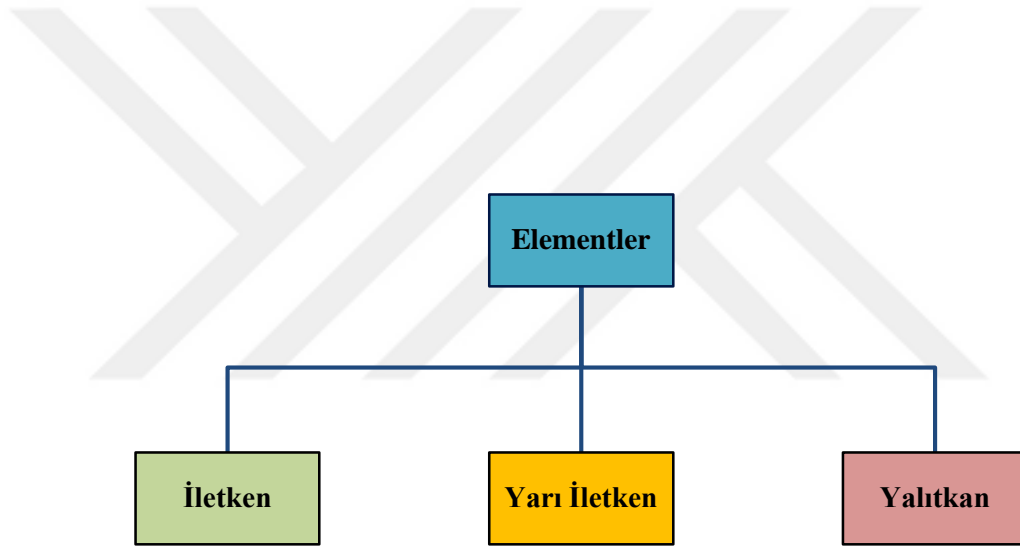
Yukarıdaki bölümlerde de açıklandığı üzere fotovoltaik teknolojisi kısaca, güneş ışınının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak ifade edilebilir. Bu enerji dönüşümünde ise, fotovoltaik hücre adı verilen yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır.

4.3. Fotovoltaik Hücre

1950'li yıllardan itibaren ileri teknoloji ürünü olarak ortaya çıkan fotovoltaik teknolojisi, fotonlar (ışık tanecikleri) vasıtasıyla özel yarı iletken düzeneklerinden elektrik enerjisinin doğrudan üretilebilmesidir (Oğuz vd., 2015: 47-58). Bu dönüşümü gerçekleştiren fotovoltaik hücrelerin yapımında yarı iletken malzemeler kullanılmasından dolayı, bir fotovoltaik hücre yapısının ve çalışma prensibinin iyi anlaşılabilmesi için yarı iletken kavramının ne olduğunun bilinmesi gereklidir.

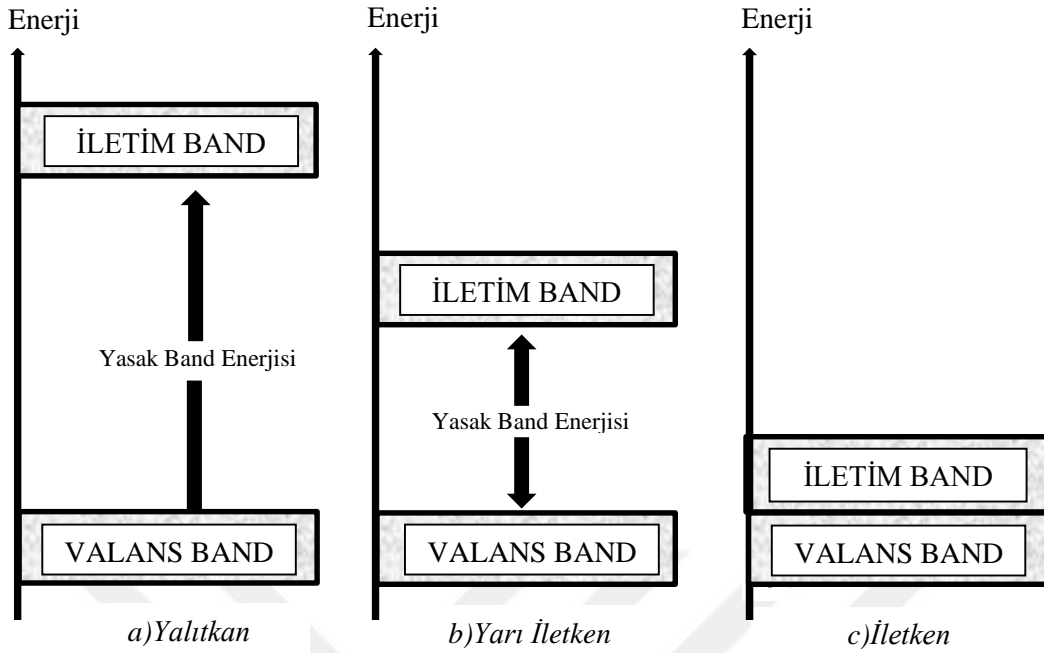
4.3.1. Yarı İletken Kavramı

Maddenin atomik yapısı, elektrik enerjisinin oluşturulmasını ve kontrol edilmesini belirlemektedir. Atomik yapıya bağlı olarak elementler; iletken, yarı iletken ve yalıtkan olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Şekil 4.1). Elektrik akımını çok küçük direnç göstererek ileten malzemelere “*iletken*”, normal şartlar altında elektrik akımına direnç gösterip iletmeyen malzemelere “*yalıtkan*” adı verilmektedir. Yarı iletken malzemeler ise, normal koşullar altında yalıtkan özellik gösteren ancak ısı, ışık ve magnetik etki altına bırakıldıkları zaman iletkenlik özelliği kazanan ve bu dış etki ortadan kalktığı zaman ise tekrar yalıtkan olabilen malzemelerdir.



Şekil 4.1. Atomik yapıya bağlı olarak elementlerin sınıflandırılması.

Bir maddeyi elektriksel açıdandan iletken hale getirebilmek için dışarıdan bir enerji uygulanması gerekir. Bu enerji miktarı ile; “*iletkenlik bandı*”, “*yasak band*” ve “*valans bandı*” adı verilen üç ayrı enerji bandının oluşması sağlanmaktadır (Şekil 4.2) (Özek, 1998: 6-16).



Şekil 4.2. Enerji band diyagramları.
(Özek, 1998: 6-16)

Valans Elektronu: Valans bandında yer alan ve maddelerin iletkenlik özelliğini belirleyen elektronlara “*valans (serbest) elektronları*” denilmektedir. Bu elektronlar atomun en yüksek enerji seviyeli elektronlarıdır. Valans elektronlarının yüksek enerji seviyeli elektronlar olması, bu elektronların atomdan ayrılmaya daha eğimli hale getirir.

Valans Bandı: Atomların en dış orbitalindeki valans elektronlarının yer aldığı banttır.

Yasak Band: Elektron bakımından boş bulunan ve valans bandındaki elektronların iletkenlik bandına geçmesini zorlaştıran boşluğa denir. Diğer bir ifadeyle elektronların bulunabileceği enerji seviyeleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır.

İletkenlik Bandı: Valans bandından kopan ve akım taşıyabilecek durumda olan elektronların yer aldığı banda denir. Bu band en yüksek enerji seviyesine sahiptir. Elektronlarının bu banda geçmesiyle maddeler iletken hale gelirler.

Saf bir yarı iletken maddede, elektronların bir banddan diğerine geçmesiyle iletkenlik meydana gelir. Valans bandında yer alan elektronlar çekirdeğin çekim kuvveti etkisiyle yörüngelerinden çıkamazlar. Bu elektronların serbest hale geçebilmeleri için dışarıdan yeteri miktarda enerjinin uygulanması gerekmektedir. Bu

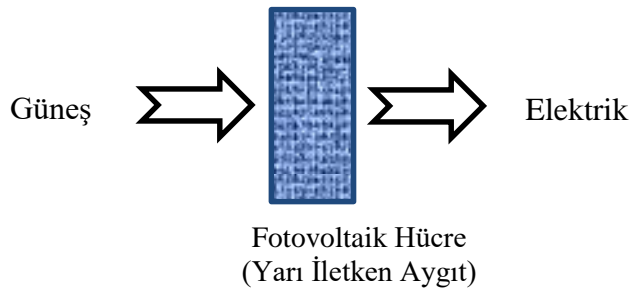
enerjiyi alan valans elektronu valans bandından çıkıp yasak bölgeyi, yani yasak band aralığını, geçerek iletkenlik bandına ulaşır ve burada akım taşıyıcı olarak görev yapar (Özek, 1998: 6-16). Yarı iletkenlerdeki yasak band aralığı, yalıtkan ve iletkenlerin band aralığı değerleri arasında bir değere sahiptir. Yalıtkanların yasak band aralığının yarı iletkenlere göre daha geniş olması ve iletkenlerin sıcaklık arttığında dirençlerinin artması ve böylece iletkenliklerinin azalması nedeniyle fotovoltaik hücre yapımında yarı iletken malzemeler tercih edilmektedir (Batur, 2013: 17).

Yarı iletkenler, ısı ve ışık etkisiyle belirli bir oranda iletkenlik özelliği kazanmaktadırlar. Saf yarı iletken malzemeye yapısal özelliklerini bozmayacak şekilde bazı özel maddeler eklenerek elektriksel özellikleri kontrollü bir biçimde değiştirilmektedir. Katkılama adı verilen bu işlemin sonucunda iletkenlik özelliği artırılmış n-tipi ve p-tipi yarı iletkenler elde edilmektedir. Elde edilen bu katkı yarı iletkenin n-tipi veya p-tipi olması katkı maddesine bağlıdır. Periyodik cetvelin 5A grubunda bulunan bir elementin eklenmesi sonucunda fazla elektron sağlanarak n-tipi yarı iletkenler elde edilirken, periyodik cetvelin 3A grubunda bulunan bir elementin eklenmesi sonucunda fazla boşluklar (hole) oluşturularak p-tipi yarı iletkenler elde edilmektedir (Özek, 1998: 6-16).

Yarı iletken materyaller arasında silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi yarı iletken malzemeler fotovoltaik hücre üretiminde en elverişli olanları (EİGM, 2019a) olup, yüksek verimli farklı malzemeler üzerine de çalışmalar yapılmaktadır.

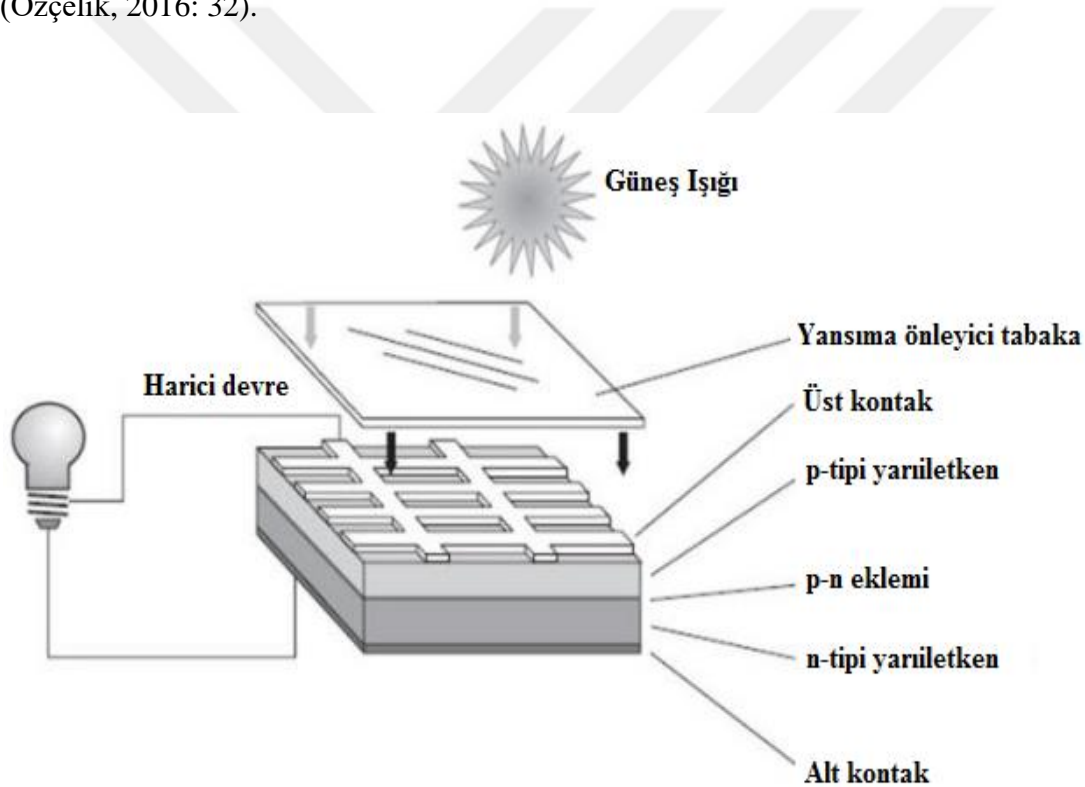
4.3.2. Fotovoltaik Hücrenin Yapısı

Fotovoltaik hücreler yüzeylerine gelen güneş ışığını direk olarak elektrik enerjisine dönüştürebilen yarı iletken maddelerdir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Fotovoltaik hücrede enerji dönüşümü.

Bir fotovoltaik hücre, elektron eksikliği (yada boşluk fazlalığı) olan p-tipi yarı iletken katmanı ile elektron fazlalığı olan n-tipi yarı iletken katmanını içermektedir. Bu iki katmanın sandwich adı verilen üst üste yerleşim şekliyle birleştirilmesi sonucunda “*p-n eklemi (p-n junction)*” adı verilen yapı oluşmaktadır. Oluşturulan bu p-n eklemde doğal olarak bir elektrik alan meydana gelir. Bu yapıya, elektriksel bağlantı için yarı iletkenin n-tipi ve p-tipi tarafında uygun metaller kullanılarak temas noktaları (üst kontak-alt kontak) eklenir. Yansıma nedeniyle ortaya çıkan ışık enerjisinin kaybını önlemek için yüzey üstünün yansıma önleyici kaplama ile kaplanmasıyla en basit şekilde fotovoltaik hücre oluşturulmuş olunur (SRM University, 2007: 1-32). Şekil 4.4’de bir fotovoltaik hücrenin yapısı gösterilmiştir (Özçelik, 2016: 32).



Şekil 4.4. Fotovoltaik hücre yapısı.

(Özçelik, 2016: 32)

4.3.3. Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi

Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi, fotovoltaik etkiye, yani elektromanyetik radyasyona cevap olarak iki farklı malzemenin birleşme yerindeki (p-n eklemde) potansiyel bir farkın oluşmasına dayanır (Jäger vd., 2014: 23).

p-n eklemının fotovoltaik hücre olarak çalışabilmesi için eklem bölgesinde fotovoltaik olayının sağlanması gerekir. Bu fotovoltaik etki iki aşamada gerçekleşir:

- 1) İlk önce p-n eklem bölgesine ışık düşürülerek, elektron-boşluk çiftlerinin oluşturulması sağlanır.
- 2) Daha sonra oluşan elektrik alan yardımıyla bu elektron-boşluk çiftleri birbirlerinden ayrılır.

Güneş ışınları, fotonlardan yani parlak enerji paketlerinden oluşur. Fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki çeşitli dalga boylarına bağımlı olarak farklı niceliklerde enerji içerirler. Bir fotovoltaik hücre güneş ışınına maruz kaldığı zaman, fotonlar yarı iletken malzemeler tarafından absorbe edilir (soğrulur) ve fotonların enerjisi yarı iletkendeki elektronlara aktarılır. Absorbe edilen bu enerji, elektronların enerjisini artırır ve böylece bu elektronların valans bandından iletim bandına geçmelerini sağlar. Elektronların, valans bandından iletim bandına geçmeleri sonucunda valans bandında boşluklar (hole) oluşur ve bu durum “*elektron-boşluk çifti*” olarak adlandırılır. Oluşan bu elektron-boşluk çiftleri p-n eklemındaki elektrik alanı etkisiyle birbirlerinden ayrılır. Böylece, birbirlerinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri, fotovoltaik hücrenin uçlarında elektriksel bir güç çıkışı oluştururlar (SRM University, 2007: 1-32).

Bir elektron-boşluk çiftinin oluşabilmesi için fotovoltaik hücre üzerine düşen güneş ışınındaki fotonun enerjisi, yarı iletkenin yasak band enerji aralığına eşit ya da daha büyük olmalıdır. Eğer fotonun enerjisi yasak band enerji aralığından daha küçük enerjiye sahip ise, bu durumda, elektron-boşluk çifti oluşamaz ve fotovoltaik etki sağlanamaz (İTÜ, 2019).

4.3.4. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Son yıllarda, fotovoltaik hücre teknolojisi, fosil yakıt bazlı enerjinin küresel ısınma ve iklim değişikliği üzerindeki etkisine olan ilginin artmasının bir sonucu olarak, sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak olağanüstü bir şekilde büyümüştür. Bugüne kadar geliştirilen farklı fotovoltaik hücreler, kullanılan hammaddeye ve ticari uygunluk seviyesine bağlı olarak nesiller adı verilen üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır (Luceño-Sánchez vd., 2019: 3). Bunlar;

- Birinci nesil (Kristal Silisyum, Galyum Arsenit) FV hücreler
- İkinci nesil (İnce Filmler) FV hücreler

- Üçüncü nesil FV hücreler

4.3.4.1. Birinci nesil FV hücreler

Birinci nesil fotovoltaik hücrelerin üretiminde kullanılan malzemeler silisyum (Si) ve galyum arsenittir (GaAs). Silisyumun, yerkabuğunda en bol bulunan ikinci element olması, toksik olmaması ve dayanıklı kristal yapısından dolayı ticari güneş panelleri imalatında en yaygın kullanılan malzeme olmuştur ve fotovoltaik hücre pazarının yaklaşık %95'ini (Fraunhofer ISE, 2019: 5) oluşturmaktadır. Birinci nesil FV hücreler, nispeten pahalı olmalarına rağmen yüksek verimlilik nedeniyle en eski ve en çok kullanılan teknoloji türüdür. Silisyumun rezerv sıkıntısının olmaması gelecekte bu hücrelerin maliyetlerinin dahada düşebileceği anlamına gelmektedir (Luceño-Sánchez vd., 2019: 5).

Birinci nesil fotovoltaik hücreler; monokristal silisyum, polikristal silisyum ve galyum arsenit (GaAs) hücreleri olarak üç kategoriye ayrılırlar. Günümüzde monokristal silisyum hücre veriminin %26,7 (NREL, 2019a) olmasına rağmen saf kristal gereksiniminden ötürü üretimleri pahalı olabilmektedir. Polikristal silisyum hücre verimi ise %22,3'e (NREL, 2019a) ulaşmıştır. Her ne kadar monokristal silisyum hücrelerin verimliliği polikristal silisyum hücrelerden daha yüksek olsa da, polikristal silisyum hücrelerin üretimi daha kolay ve ucuzdur. Böylece monokristal silisyum hücreler ile rekabet ederler. Galyum arsenit hücreler ise, şu anda kristalli bir yapıya sahip olmalarına veya ince bir tabaka halinde olmalarına bağlı olarak laboratuarda %27,8-30,5 (NREL, 2019a) aralığında verime ulaşmaktadır. Galyum arsenit hücrelerde birden fazla yarı iletken malzemenin kullanılması, daha geniş bir ışınım emilimini sağlar ve böylece hücrenin enerji dönüşüm verimliliği artar. Ancak galyum elementinin silisyum kadar yerkabuğunda bolca bulunmaması fotovoltaik hücre üretiminde silisyuma kıyasla daha az tercih edilmesine sebep olmaktadır (Luceño-Sánchez vd., 2019: 5-7).

4.3.4.2. İkinci nesil FV hücreler

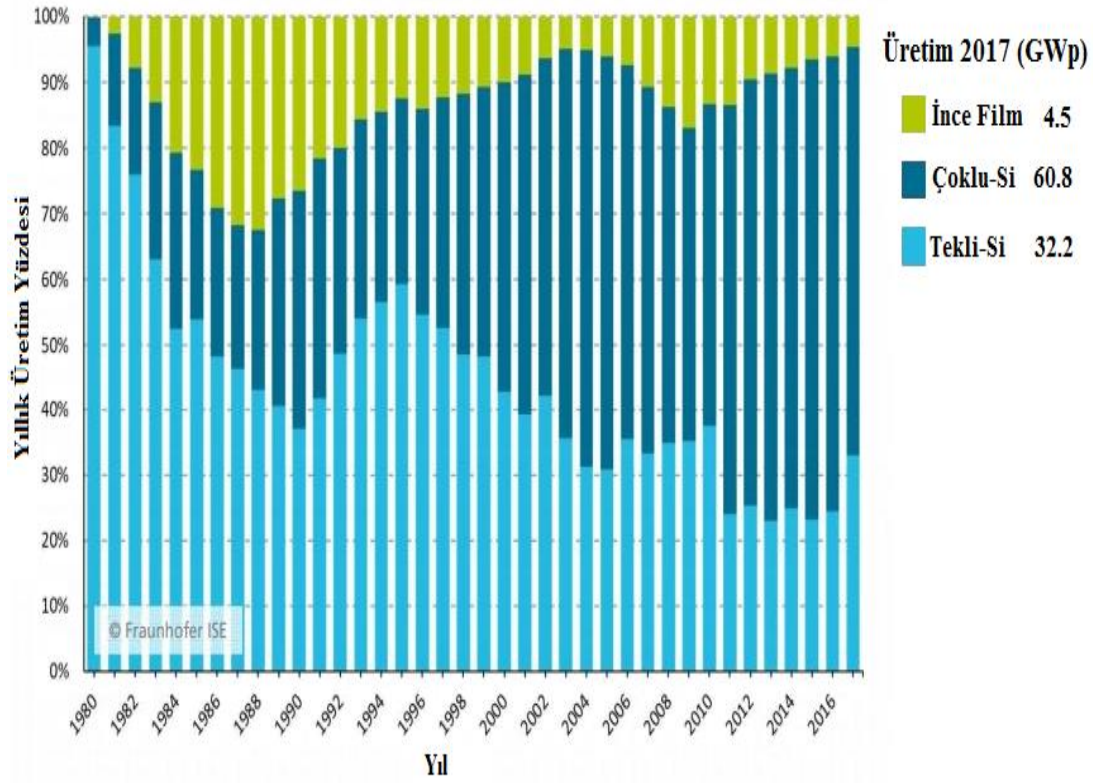
Birinci nesil fotovoltaik hücrelerin yüksek maliyetlerini azaltmak amacıyla ince film teknolojileri üzerine araştırma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Birinci nesil FV

hücrelerine göre ince film hücreleri genellikle daha düşük maliyetlidir, ancak büyük ölçüde de daha düşük verimlilik oranlarına sahiptir. Laboratuvar şartlarında ulaşılan en iyi verim, %23,4'lük (NREL, 2019a) bir verim ile Bakır-İndiyum-Galyum-Selenür (CIGS) fotovoltaiik hücreler için elde edilmiştir (Luceño-Sánchez vd., 2019: 7). CIGS malzemesinin yanı sıra, ikinci jenerasyon FV hücreler arasında amorf Silisyum (a-Si), Kadmiyum Tellür (CdTe) ve Kadmiyum Sülfat (CdS) malzemeleri de yer almaktadır (Kibria vd., 2014: 51).

4.3.4.3. Üçüncü nesil FV hücreler

Üçüncü nesil FV hücrelerden organik yarı iletken FV hücreleri, umut verici olan ancak henüz ticari olarak kanıtlanmayan yeni teknolojilerdir. Büyük ölçekli enerji üretimi için ekonomik açıdan uygun bir FV teknolojisi hedefine ulaşma potansiyeline sahiptir. Çünkü organik yarı iletkenler, silikon gibi inorganik yarı iletkenlere göre daha ucuz bir alternatiftir. Diğer teknolojilere göre üretimleri kolaydır. Daha basit tekniklerle işlenebilir. Mekanik olarak daha sağlamdırlar ve yüksek sıcaklıklarda yüksek verimler elde edilir. Organik güneş pilleri üzerine yapılan araştırmalar, güneş enerjisinin dönüşüm verimliliğini arttırmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, inorganik güneş pilleriyle rekabet etmek için hala çok uzun bir yol vardır (Kibria vd., 2014: 51). Çok eklemli FV hücrelerde ise laboratuvar koşullarında elde edilen verim %40'ı (NREL, 2019a) geçmektedir.

Şekil 4.5'de, dünya genelinde fotovoltaiik hücre üretiminde FV teknolojilerinin yıllara göre payları gösterilmiştir (Fraunhofer ISE, 2019: 21). 2017 yılı küresel fotovoltaiik üretiminin yaklaşık %95'i birinci nesil FV hücrelerden elde edilmiştir. Bu dönemde ikinci nesil FV hücrelerin payı ise %5 civarındadır. Birinci nesil FV hücrelerin, dayanıklı ve yüksek verimliliğe sahip olması fotovoltaiik üretiminde bu hücrelerin daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır.

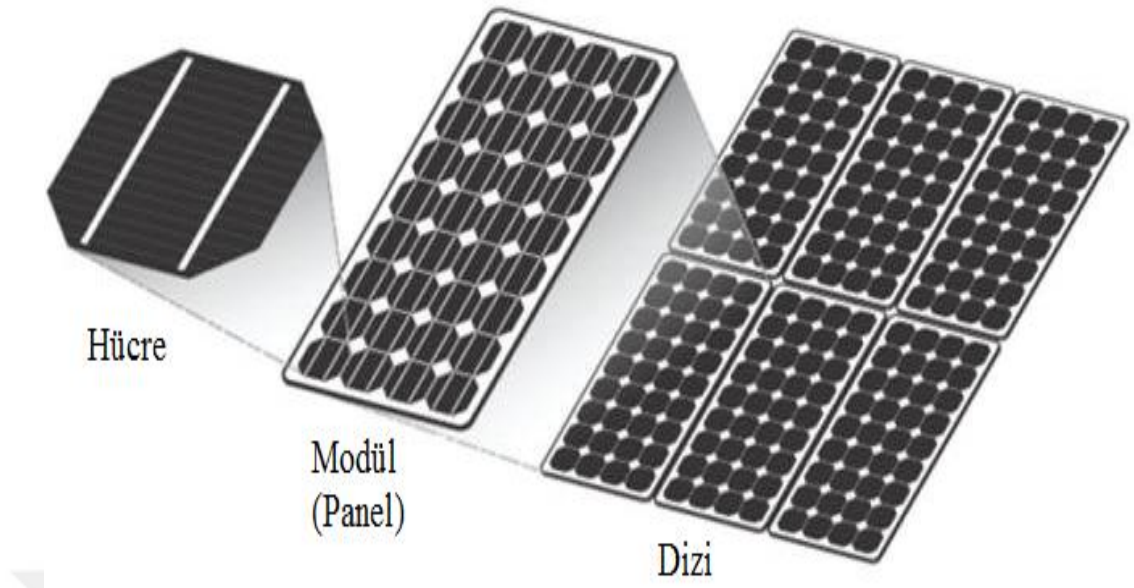


Şekil 4.5. Küresel fotovoltaik hücre üretiminde FV teknolojilerin payları.
(Fraunhofer ISE, 2019: 21)

Fotovoltaik hücreler, fotovoltaik teknolojinin en temel yapısını oluşturmaktadır. Çok sayıda fotovoltaik hücrenin bir araya getirilmesi ile fotovoltaik modül (panel), fotovoltaik modüllerin bir araya getirilmesiyle dizi adı verilen yapılar elde edilmektedir.

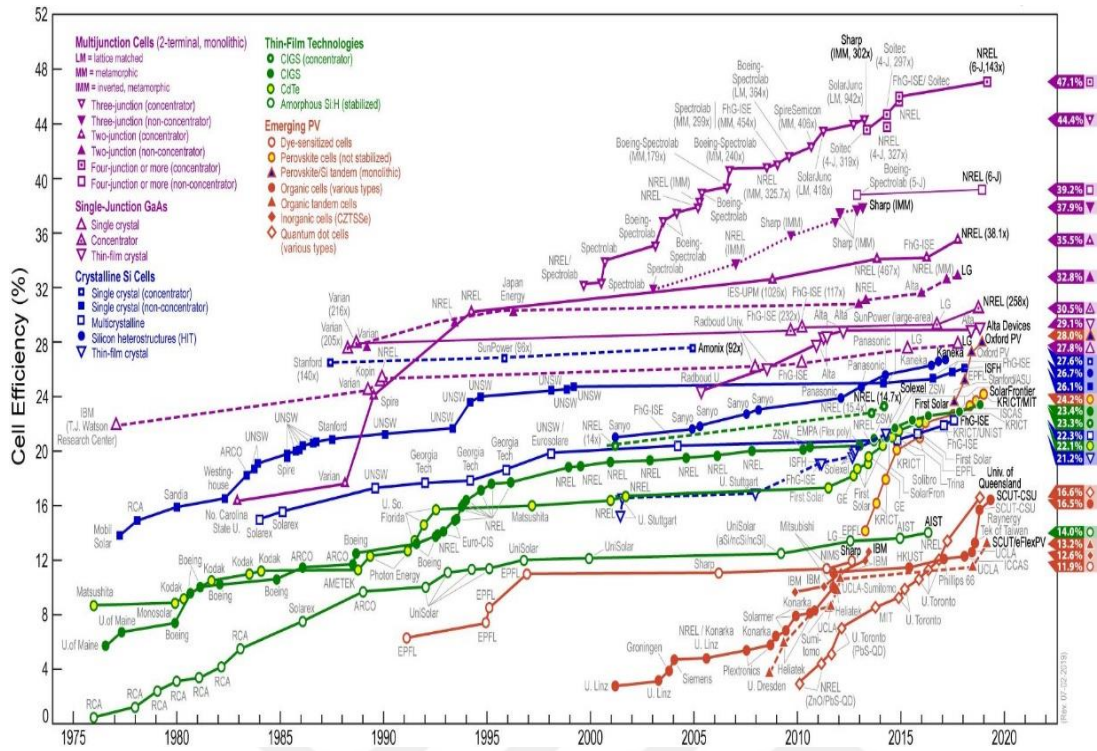
4.4. Fotovoltaik Modül ve Maliyeti

Fotovoltaik hücrenin sınırlı boyutundan dolayı tek bir fotovoltaik hücreden elde edilecek olan güç oldukça azdır. Bu nedenle çoğu uygulamalar için tekbaşlarına kullanılmaları yeterli olmamaktadır. Yüksek güçler elde etmek amacıyla çok sayıda fotovoltaik hücrenin bir yüzey üzerine birbirine paralel ya da seri olarak bağlanmaları sonucu oluşan yapıya “*fotovoltaik modül (panel)*” adı verilir (Şekil 4.6) (El-Shimy vd., 2018: 1-2). Güç ihtiyacına bağlı olarak, fotovoltaik modüllerin birbirlerine paralel ya da seri olarak bağlanmaları sonucunda ise watt mertebesinde mega watt mertebelerine varan güçler elde edilir (Öztürk, 2017: 1).

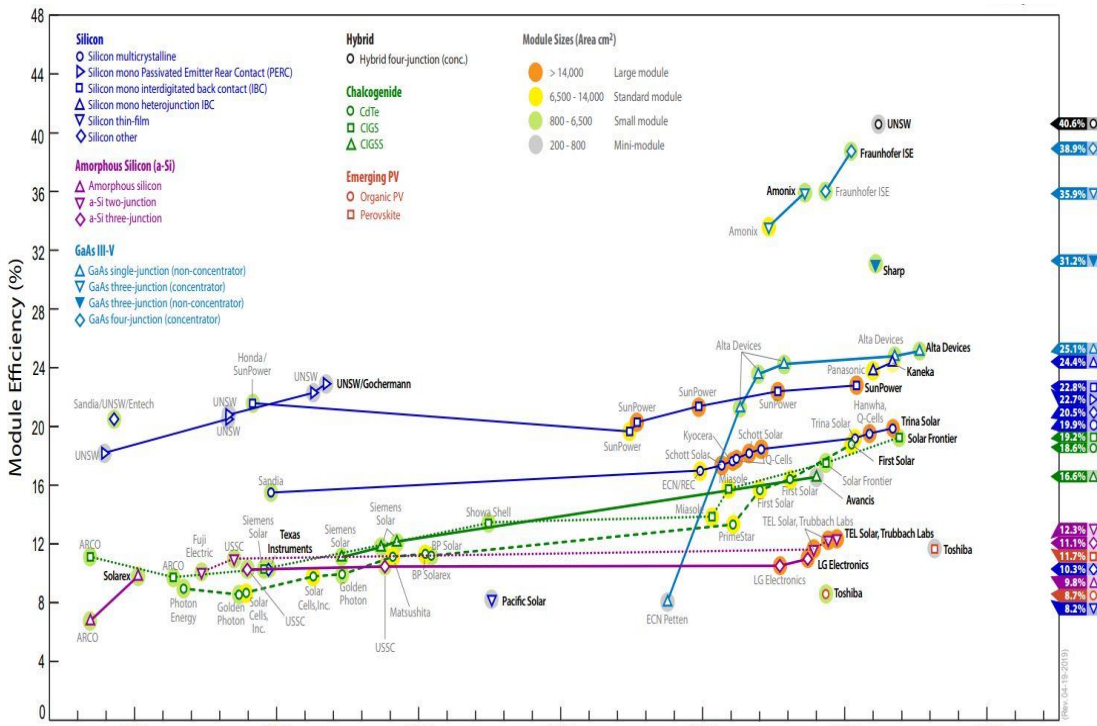


Şekil 4.6. Fotovoltaik hücre, fotovoltaik modül (panel), fotovoltaik dizi.
(El-Shimy vd., 2019: 1-2)

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (The National Renewable Energy Laboratory-NREL), günümüze kadar olan bir dizi fotovoltaik teknoloji araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda, fotovoltaik hücre (Şekil 4.7) ve fotovoltaik modül (Şekil 4.8) için en yüksek dönüşüm verim değerlerinin bir derlemesini her yıl yapmaktadır. Günümüz teknolojisi şartları altında laboratuar ortamında fotovoltaik hücrede %47,1 fotovoltaik modülde ise %40,6 verime ulaşılarak şüana kadarki en iyi dünya rekorları elde edilmiştir.

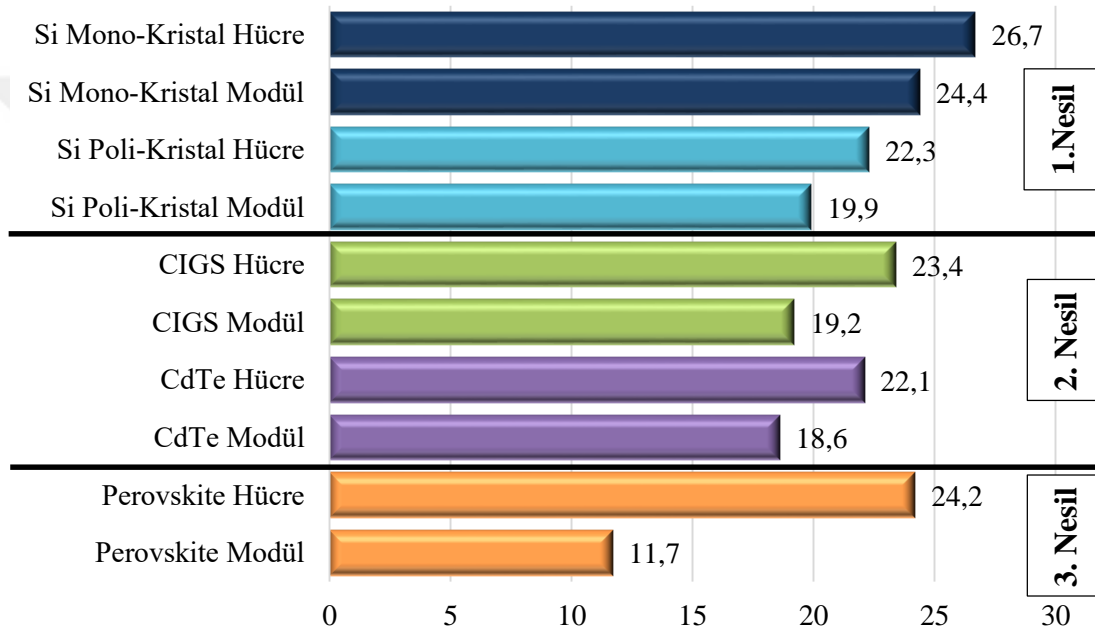


Şekil 4.7. Fotovoltaik hücre verimlilik oranı (%).
(NREL, 2019a)



Şekil 4.8. Fotovoltaik modül verimlilik oranı (%).
(NREL, 2019b)

Şekil 4.9’da, ticari açıdan en yaygın kullanılan FV teknolojilerinin hücre (NREL, 2019a) ve modül (NREL, 2019b) verimlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Nem, sıcaklık gibi iklim koşullarına ve güneş ışınım şiddetine bağlı olarak fotovoltaik modüllerin verimlilikleri ve çalışma ömürleri değişebilmektedir. Yapılan çalışmalarda sıcaklığa dayanıklılık açısından, 2. nesil FV modüllerin diğer yapıdaki modüllere göre avantajlı olduğu ortaya konulmuştur (Başay vd., 2019: 325-336). Sistem tasarımı yapılırken verim-maliyet analizine göre modül seçimi yapılmaktadır.

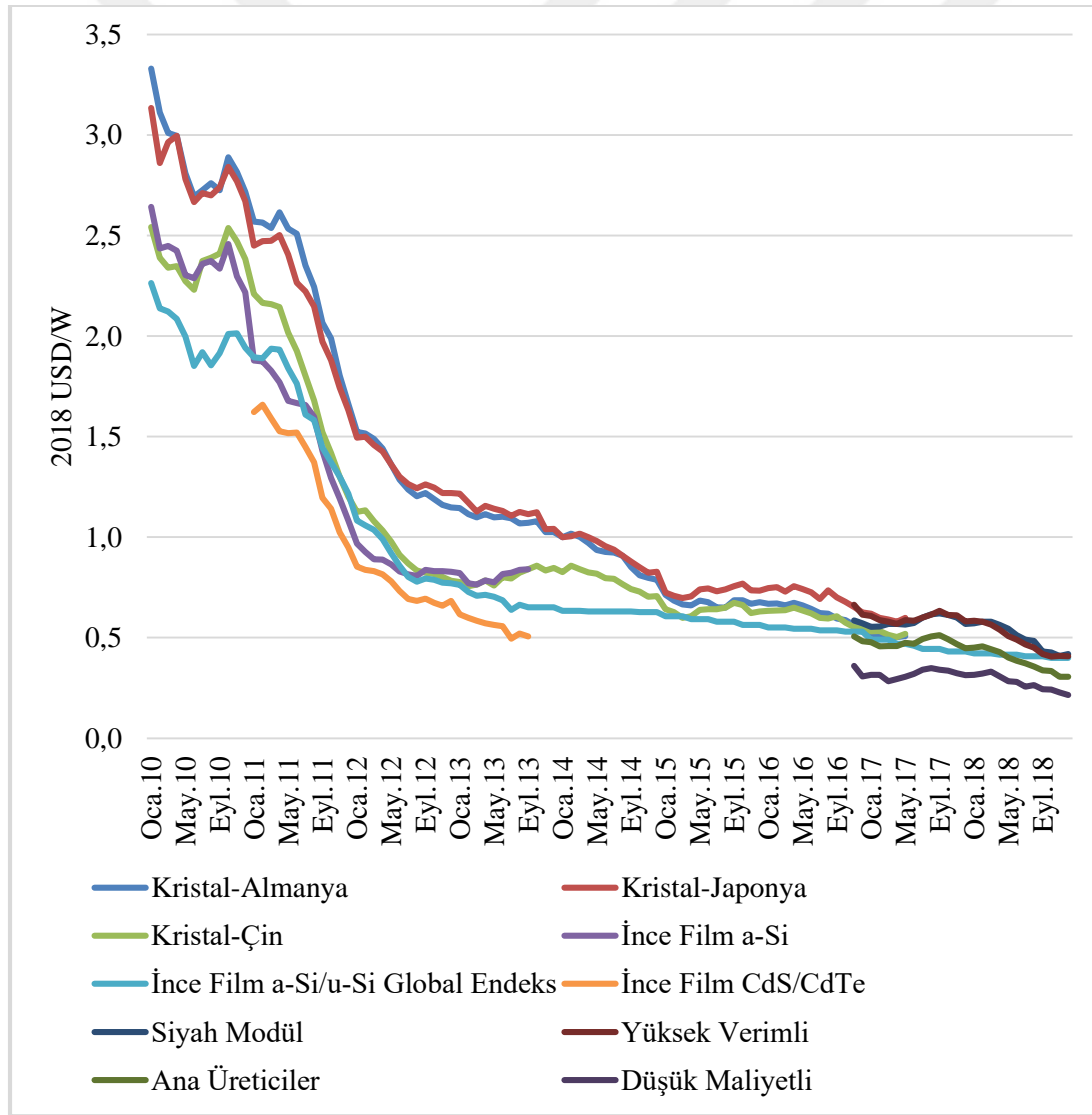


Şekil 4.9. FV teknolojilerine göre hücre ve modül verimleri (%).

(NREL, 2019a; NREL, 2019b)

FV modül maliyeti, projenin boyutuna ve FV modülün tipine bağlı olarak bir fotovoltaik sistemin toplam sermaye maliyetinin yaklaşık olarak üçte biri ile yarısına tekabül etmektedir. Bu nedenle, FV modül maliyetlerinde devam eden azalma, fotovoltaik sistemlerin rekabet edebilirliğinin artırılmasında kilit bir bileşendir. Üreticinin maliyet yapısına, piyasa özelliklerine ve modül verimliliğine bağlı olarak geniş bir fiyat aralığı bulunmaktadır. Buda küresel çapta ortalama bir FV modül fiyatının elde edilmesini zorlaştırmaktadır (IRENA, 2012a: 15,28).

FV modüllerinin mutlak maliyeti ve yapısı, teknolojiye göre değişmektedir. Geleneksel c-Si FV modüller, en pahalı FV teknolojisi olmakla birlikte aynı zamanda en yüksek ticari verime sahiptir. Ancak, CIGS modülleri c-Si modüllerinin verimlilik seviyelerine yaklaşmaktadır ve c-Si FV modüllere kıyasla daha ucuzdur. 2009 yılı sonundan bu yana, FV modül fiyatlarında yaklaşık %90 oranında düşüş gerçekleşmiştir (Şekil 4.10). 2018 yılı içerisinde Avrupa'daki modüller için gösterge fiyatları; düşük maliyetli üreticiler için 216 USD/kW, ana üreticilerin ürünleri için 306 USD/kW, yüksek verimlilik modülleri için 400 USD/kW ve “tüm siyah” paneller için 420 USD/kW arasında değişmektedir (IRENA, 2019a: 21,43).



Şekil 4.10. Teknolojisine göre fotovoltaik modül fiyatları (2010-2018).
(IRENA, 2019a: 43)

Fotovoltaik modüller ve diğer bileşenlerin (akümülatör, invertör, kablolama, montaj malzemesi vs.) bir araya getirilmesi ile oluşturulan sisteme fotovoltaik sistem denir. Fotovoltaik sistemler, şebekeden bağımsız (off grid) veya şebekeye bağlı (on grid) olarak dizayn edilebilir. Bu tez çalışmasında şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlere odaklanılmış olup bu sistemlerin elektrik üretim maliyetleri, kurulum maliyetleri ve piyasa gelişimleri araştırılmıştır.

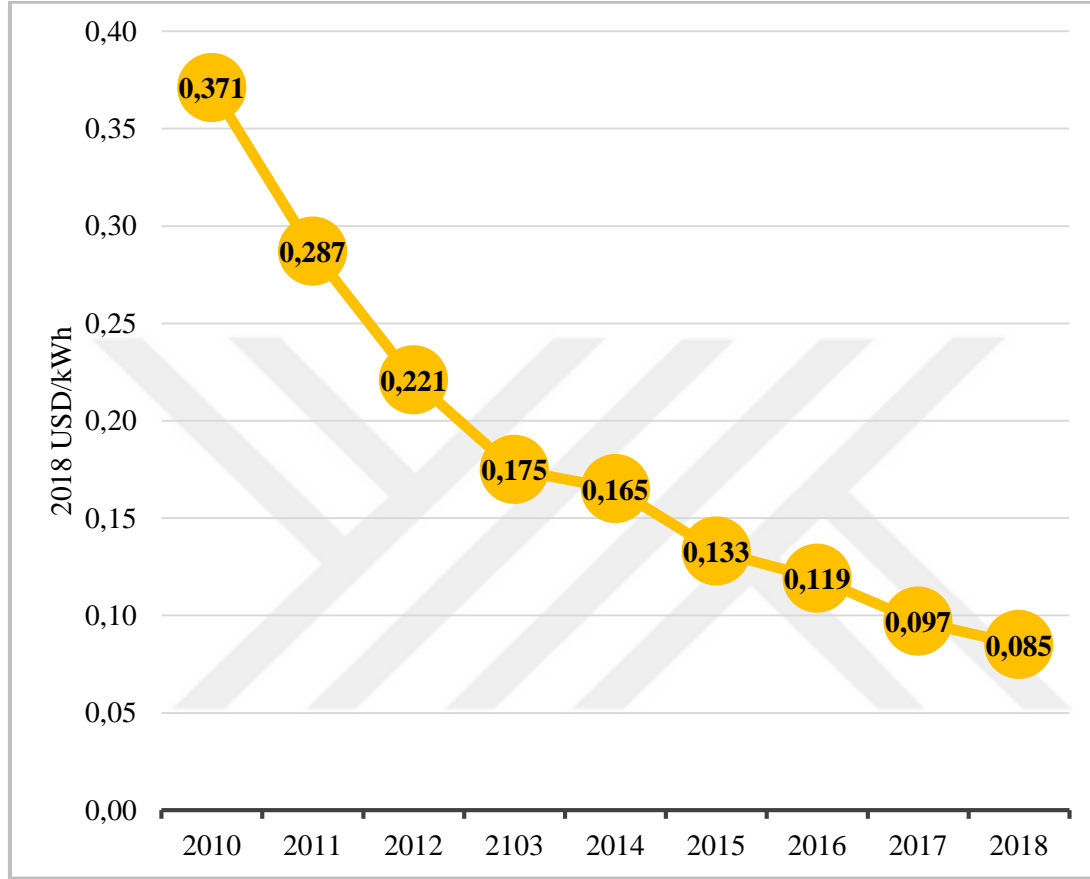
4.5. Fotovoltaik Sistem İndirgenmiş Elektrik Üretim Maliyeti

İndirgenmiş elektrik üretim maliyeti (Levelized Cost of Electricity-LCOE), bir elektrik üretim teknolojisinin uzun vadede ekonomik rekabet edebilirliğini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan bir metodolojidir. LCOE yaklaşımı ile, bir enerji santralının ana maliyet bileşenleri (yatırım maliyeti, işletme/bakım maliyeti, yakıt maliyeti ve hizmet dışı kalma maliyeti gibi) dikkate alınarak ortaya çıkan maliyetlerin bugünkü değerinin, sistemin ekonomik ömrü boyunca üreteceği toplam enerji miktarının bugünkü değerine oranı ile ortalama elektrik üretim maliyeti hesaplanır. LCOE, ayrıca, enerji üreten farklı teknolojiler arasında karşılaştırma yapılmasına olanak sağlar (Campbell, 2008: 2).

Bir fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektriğin maliyeti, sermaye maliyeti, değişken maliyetler, güneş ışınımı seviyesi ve fotovoltaik hücre verimliliği ile belirlenir. Bu parametrelerden sermaye maliyeti, finansman maliyeti ve verimlilik en kritik olanıdır ve bu parametrelerdeki gelişmeler maliyet azaltma konusunda en büyük fırsatı sağlar (IRENA, 2012a: 15).

IRENA Yenilenebilir Maliyet veritabanındaki verilere göre, 2014'ten bu yana, dünya genelinde fotovoltaik sistemlerinin indirgenmiş elektrik üretim maliyetinin ağırlıklı ortalaması fosil yakıt maliyeti (0,05-0,17 USD/kWh) aralığına düşmüştür. FV modül fiyatlarındaki ve sistemi oluşturan diğer bileşenlerin fiyatlarındaki düşüşlerden kaynaklı maliyetlerin azalmasıyla birlikte, fotovoltaik sistemler de doğrudan fosil yakıtlarla rekabet edebilir duruma gelmiştir. 2010 ve 2018 yılları arasında fotovoltaik sistemlerin küresel ağırlıklı ortalama indirgenmiş elektrik üretim maliyeti, %77 oranında azalarak 0,371 USD/kWh'dan 0,085 USD/kWh'a gerilemiştir. 2018'de yıllık düşüş ise, %13 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.11). 2020 sonrasında, devreye alınacak

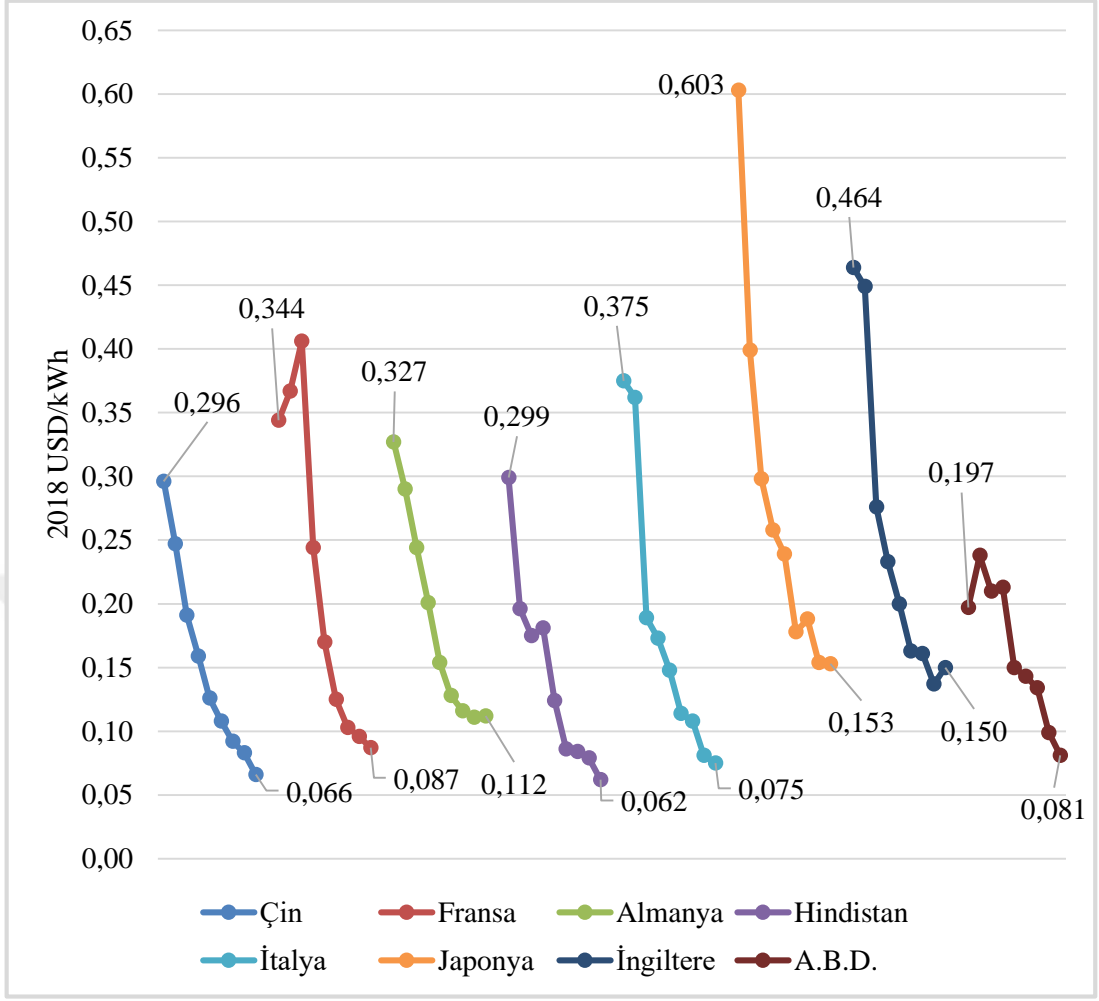
yeni FV santralleri için maliyetlerin 0,048 USD/kWh'a kadar düşmesi ve böylece mevcut kömürle çalışan elektrik santrallerinin marjinal işletme maliyetinden daha ucuz olması beklenmektedir (IRENA, 2019a: 9,15,47).



Şekil 4.11. Fotovoltaik sistem indirgenmiş elektrik üretim maliyeti (2010-2018).

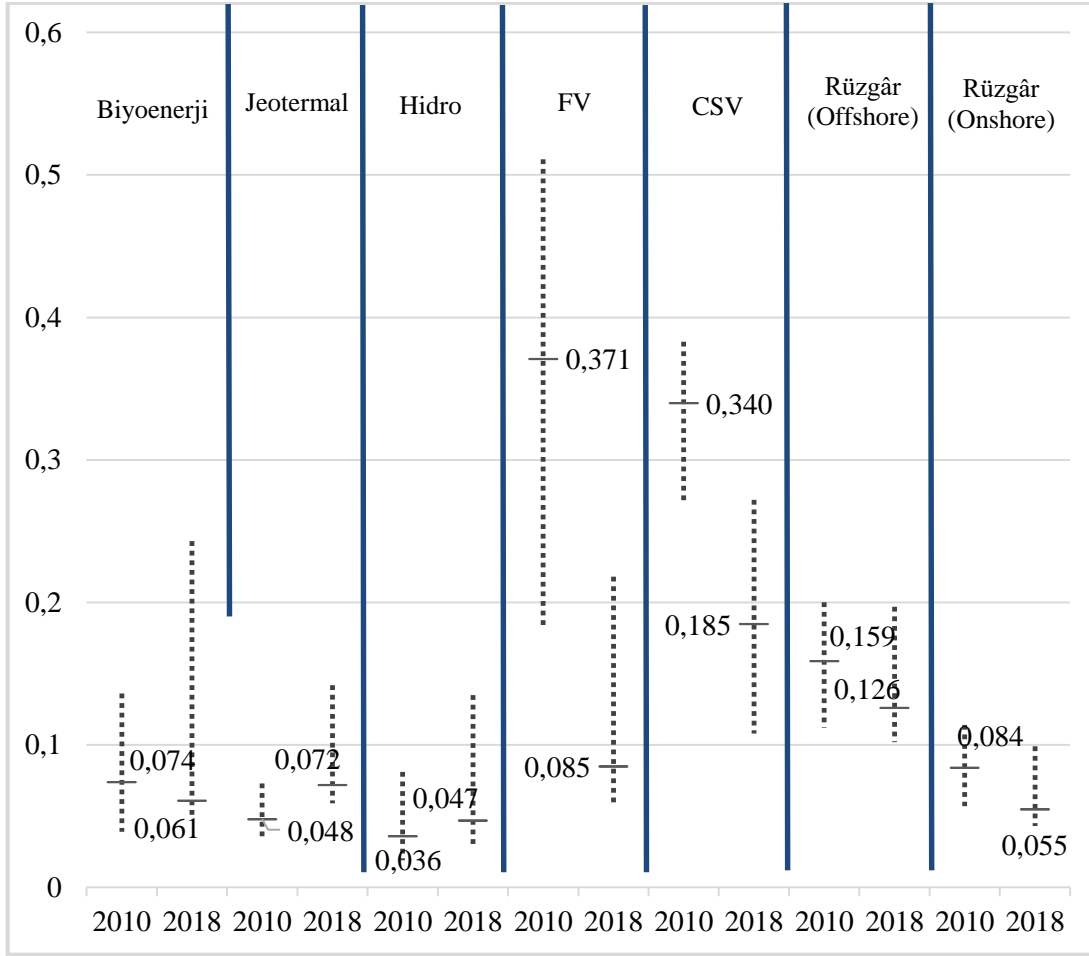
(IRENA, 2019a: 47)

Ülke bazlı ortalama LCOE'ye bakıldığında zaman ise, 2010 ve 2018 yılları arasında, ülkelere bağlı olarak %62'den %80'e varan oranlarda düşüşler gerçekleşmiştir. 2018 yılı içerisinde en düşük LCOE, 0,062 USD/kWh ile Hindistan olurken, en yüksek LCOE, 0,153 USD/kWh ile Japonya olmuştur (Şekil 4.12) (IRENA, 2019a: 48). Piyasada faaliyet gösteren firmaların ürettikleri modüllerin verimlilik ve perakende satış fiyatlarının farklı olması, ülkelerin bu alanda sağlamış oldukları teşviklerin ve vergi uygulamalarının farklılık göstermesi, dünya üzerinde güneş ışınım değerinin coğrafi koşullara göre değişebilmesi gibi nedenlerden dolayı indirgenmiş elektrik üretim maliyeti ülkeden ülkeye değişmektedir.



Şekil 4.12. Ülkelere göre fotovoltaik sistem indirgenmiş elektrik üretim maliyeti (2010-2018). (IRENA, 2019a: 48)

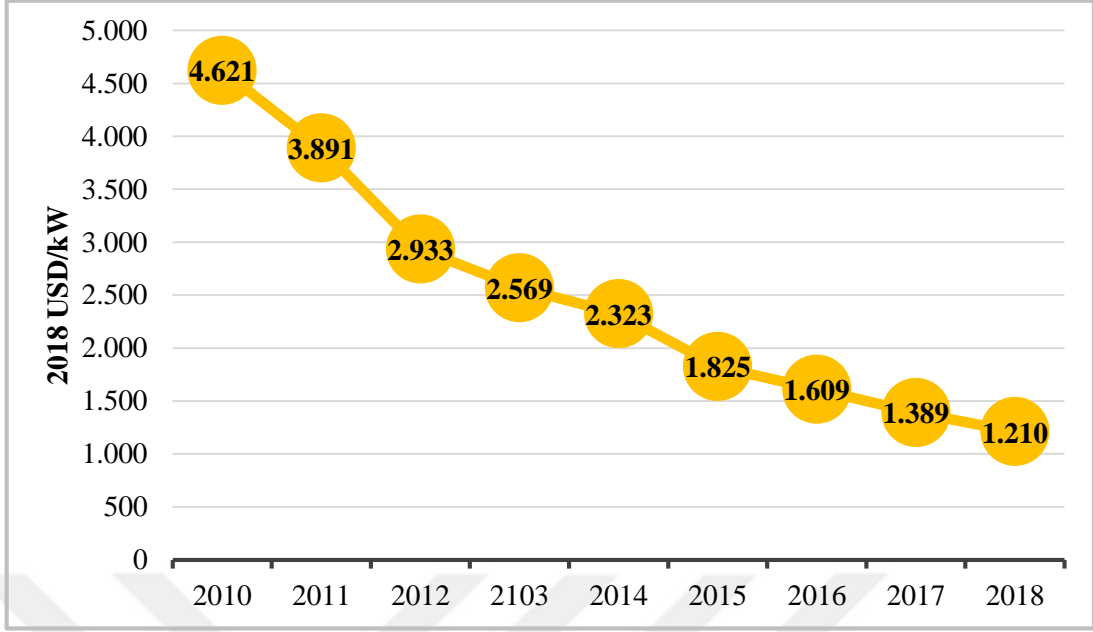
Fosil enerji santrallerinin artan maliyetlerinin yanı sıra, yenilenebilir enerji teknolojilerinin LCOE'sindeki istikrarlı düşüş, yenilenebilir enerji teknolojilerinin giderek daha iyi bir konumda olmasına neden olmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA), Yenilenebilir Enerji Üretimi Maliyetleri (2018) raporuna göre, piyasada bulunan tüm yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin küresel ağırlıklı ortalama indirgenmiş elektrik üretim maliyetleri 2010 yılından itibaren düşüş eğilimindedir. Yenilenebilir enerji teknolojileri içerisinde ise, 2010-2018 dönemi arasında %77'lik oran ile maliyeti en çok düşen fotovoltaik sistem olmuştur (Şekil 4.13).



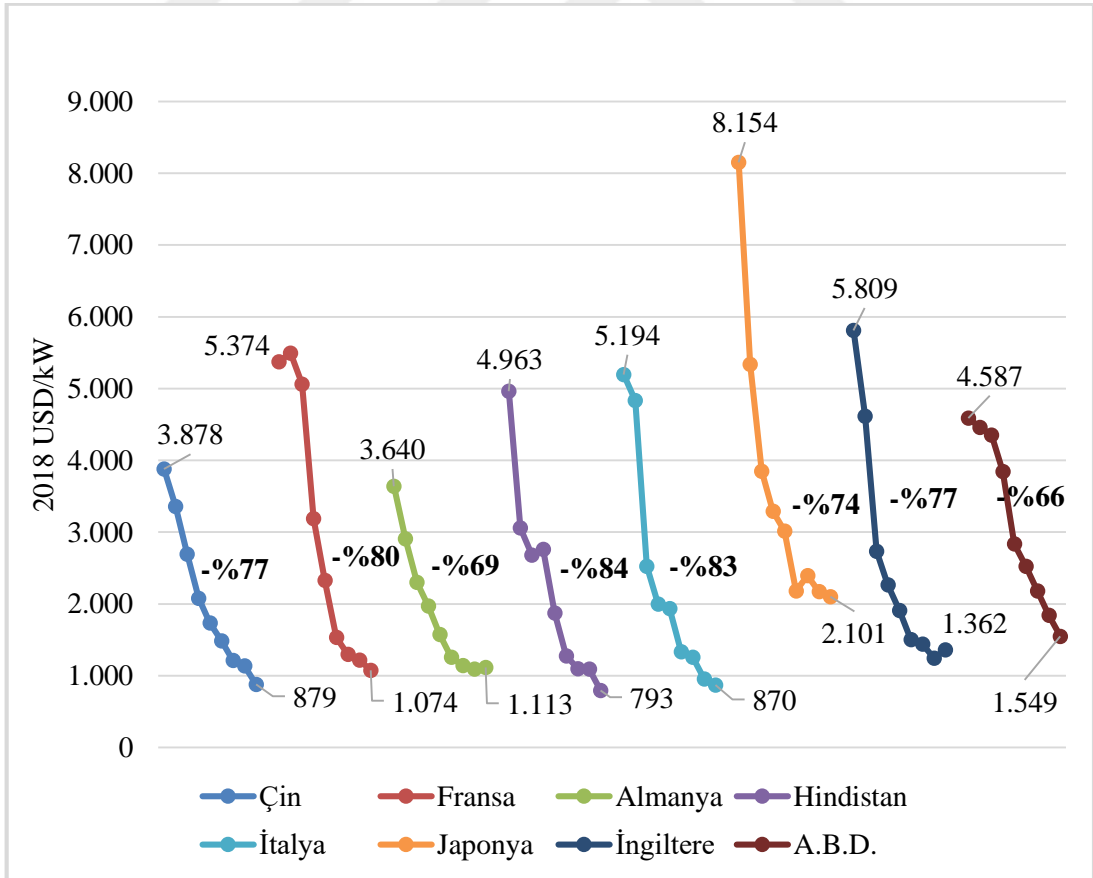
Şekil 4.13. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin LCOE karşılaştırması (2010-2018).

(IRENA, 2019a: 12)

2018 yılında faaliyete geçen hizmete uygun fotovoltaik projelerinin küresel çapta ağırlıklı ortalama toplam kurulum maliyeti ise, 2010 ve 2018 yılları arasında %74 oranında düşüşle 4.621 USD/kW'dan 1.210 USD/kW'a gerilemiştir. Bir önceki yıla göre ise %13 oranında düşüş meydana gelmiştir. (Şekil 4.14). Kurulum maliyetlerinin düşmesinde, öncelikle son yıllarda yaşanan modül fiyatlarındaki düşüşler (Bkz. Şekil 4.10) etkili olmuştur. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte fotovoltaik sistem kurulum maliyetlerinin dahada düşeceği değerlendirilmektedir. Toplam kurulum maliyetlerinde, en rekabetçi referans ülkeler olan Çin ve Almanya'ya doğru bir yakınsama olmasına rağmen, kurulum maliyetlerinde hala geniş bir yayılım devam etmektedir. Çin, ABD, Almanya, Hindistan gibi büyük fotovoltaik pazarlarda ortalama toplam kurulum maliyetleri 2010-2018 döneminde %66 ile %84 arasında değişen oranlarda düşmüştür (Şekil 4.15) (IRENA, 2019a: 44-45).

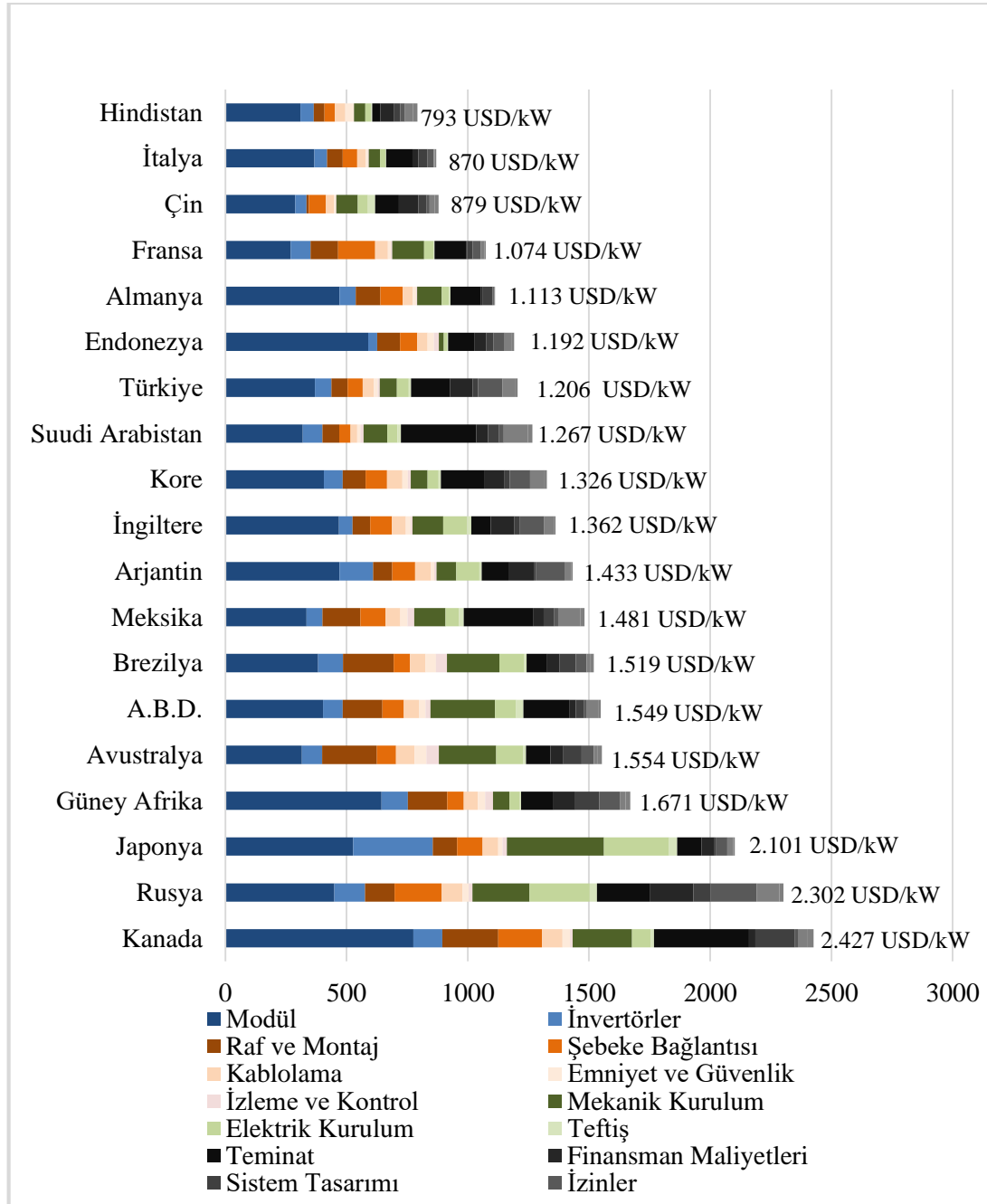


Şekil 4.14. FV sistemlerin kurulum maliyetinin yıllara göre değişimi (2010-2018).
(IRENA, 2019a: 44)



Şekil 4.15. Ülkelere göre fotovoltaik sistem kurulum maliyeti (2010-2018).
(IRENA, 2019a: 45)

Bir fotovoltaik sistem kurulum maliyeti, FV modül maliyetini ve BOS (Balance of System) adı verilen FV modüllerin haricindeki fotovoltaik sistemi oluşturan tüm bileşenlerin (inverter, altyapı, şalt ekipmanları v.s.) maliyetlerini kapsar. Şekil 4.16'da, G20 ülkeleri için, fotovoltaik sistemi oluşturan bileşenlerin maliyetlerine göre toplam kurulum maliyetleri gösterilmiştir (IRENA, 2019a: 46).

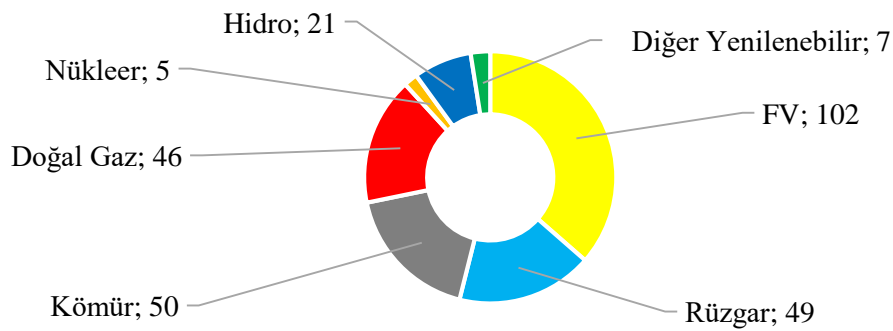


Şekil 4.16. 2018 Yılı G20 ülkeleri fotovoltaik sistem bileşen maliyetleri.
(IRENA, 2019a: 46)

Şekilde de görüleceği üzere yatırım maliyetinin önemli bir bölümünü FV modül fiyatları oluşturmaktadır. G20 ülkeleri arasında fotovoltaik sistem kurulum maliyetleri, ortalama olarak 792 USD/kW (Hindistan) ile 2.427 USD/kW (Kanada) arasında değişmektedir. Türkiye, 1.206 USD/kW kurulum maliyetiyle G20 ülkeleri arasında 7. sırada yer almaktadır. Büyük piyasalarda kurulum maliyetlerinin birbirine yakınsamasına rağmen, en yüksek maliyet ortalaması ile en düşük maliyet ortalaması arasında yaklaşık olarak üç kat kadar bir fark bulunmaktadır. FV modül fiyatlarında ve BOS maliyetlerinde devam eden düşüşler, ilerde hem fotovoltaik sistemlerden elde edilen elektriğin maliyetini daha da azaltacak hem de fotovoltaik sistem piyasasının gelişimini hızlandıracaktır.

4.6. Fotovoltaik Sistem Piyasasının Gelişimi

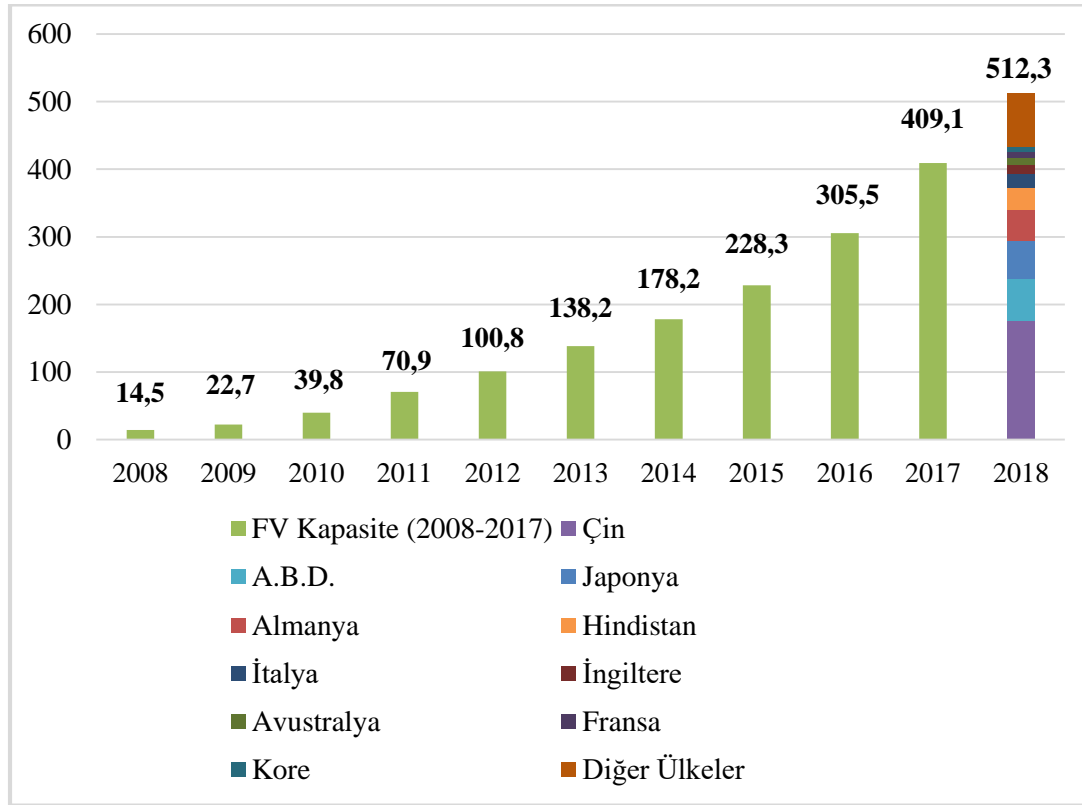
Kaynak bulunabilirliği, yenilenebilir politikalar, bölgesel yük artışı ve azalan teknoloji maliyeti ile fotovoltaik teknolojisi 2018 yılında diğer tüm teknolojiler arasında en çok tercih edilen teknoloji türü olmuştur. 2018 yılı içerisinde, tüm yeni ilave güç kapasitesinin yaklaşık %36'sına tekabül eden 102 GW (IEA verisine göre 103,2 GW) gücünde yeni fotovoltaik kapasite eklenmiştir (Şekil 4.17) (Solar Power Europe, 2019: 7). 2018'de on ülkenin FV kurulu güç kapasite miktarlarında, 1 GW üzerinde artışlar olmuştur. Yeni kapasite ilavelerinde, 45 GW kurulu güç ile Çin birinci sırada yer alırken, Çin'i sırasıyla Hindistan (10,8 GW), ABD (10,6 GW), Japonya (6,5 GW), Avustralya (3,8 GW), Almanya (3 GW), Meksika (2,7 GW), Kore (2 GW), Türkiye (1,6 GW) ve Hollanda (1,3 GW) izlemiştir (IEA, 2019c: 7).



Şekil 4.17. 2018 Yılı dünya genelinde kaynak bazında kurulu güç artışı (GW).

(Solar Power Europe, 2019: 7)

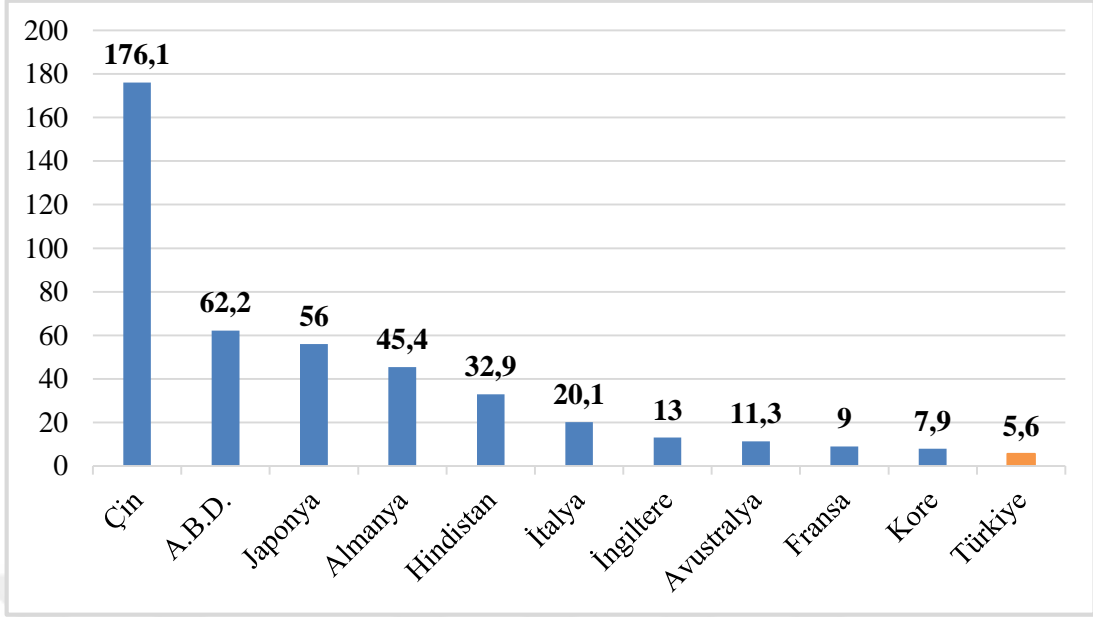
Dünya genelinde toplam fotovoltaik sistem kurulu güç kapasitesi, 2008 yılında 14,5 GW iken, 2018 yılı sonunda 512,3 GW ulaşmıştır (Şekil 4.18) (IEA, 2019e: 11). Sadece on yıl geriye bakıldığında fotovoltaik kapasitenin yaklaşık olarak 36 kat arttığı görülmektedir. Önümüzdeki beş yıl içinde ise küresel fotovoltaik kapasitenin iki kat artarak 2023 yılına kadar 1.297 GW'a ulaşması beklenmektedir (Solar Power Europe, 2019: 19).



Şekil 4.18. Küresel fotovoltaik sistem kurulu güç gelişimi (GW) (2008-2018).

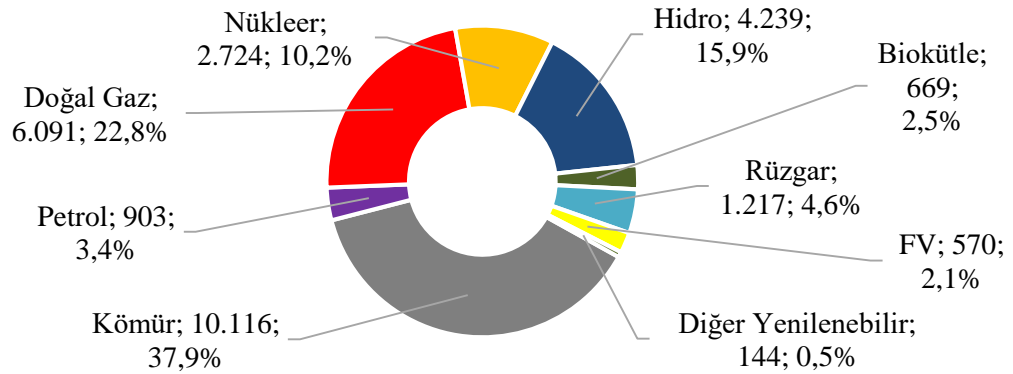
(IEA, 2019e: 11)

Tek tek ülkelere bakıldığında, Çin 176,1 GW kurulu kapasite ile küresel fotovoltaik kapasitenin üçte birine (%34,4) sahip olarak bu alanda lider konumundadır. 62,2 GW kapasitesiyle A.B.D ikinci sırada yer alırken bu ülkeleri sırasıyla; Japonya (56 GW), Almanya (45,4 GW), Hindistan (32,9 GW), İtalya (20,1 GW), İngiltere (13 GW), Avustralya (11,3 GW), Fransa (9 GW) ve Kore (7,9 GW) takip etmiştir (Şekil 4.19). Bu on ülke küresel fotovoltaik pazarın %87'sini temsil etmektedir (IEA, 2019c: 7).



Şekil 4.19. 2018 Yılı ülkelere göre fotovoltaik sistem kurulu gücü (GW).
(IEA, 2019c: 7; TEİAŞ, 2019)

Küresel elektrik enerjisi talebi 2018’de yaklaşık %4 oranında artarak toplam elektrik enerjisi üretim miktarı 26.672 TWh değerine ulaşmıştır. Bu aynı zamanda, küresel ekonominin finansal krizden kurtulduğu 2010 yılından bu yana en hızlı artış oranıdır. Bu üretim değerlerinden kömür (%37,9) ilk sıra yer alır iken, bunu sırasıyla doğal gaz (%22,8), hidro (%15,9), nükleer (%10,2), rüzgâr (%4,6), petrol (%3,4), biyoenerji (%2,5), FV (%2,1) ve diğer yenilenebilir enerji (%0,5) izlemektedir. (Şekil 4.20) (IEA, 2019d: 25).



Şekil 4.20. 2018 Yılı küresel elektrik enerjisi üretiminde FV payı (TWh,%).
(IEA, 2019d: 25)

Bugüne kadar yapılan değerlendirmeler ve sunulan raporlar doğrultusunda, fotovoltaik teknolojisinin, son yıllarda, ekonomik olarak daha uygun bir elektrik üretim şekli haline geldiği görülmektedir. Önümüzdeki yıllarda ise, FV teknolojisi, dünyanın birçok ülkesinde son derece hızlı bir büyüme oranı ile önemli bir elektrik kaynağı olma potansiyeline erişecektir. FV'nin maliyet düşüşü devam ederken, gelişmekte olan güneş enerjisi pazarlarının sayısı önümüzdeki birkaç yıl içinde daha da artacaktır. Tablo 4.1'de görüldüğü üzere, mevcut enerji politikalarının devam ettirilmesi ve açıklanan yeni politikaların uygulanması çerçevesinde, yapılan tahmini çalışmalarda, fotovoltaik teknolojisi ile elektrik enerjisi üretiminin payı artmaktadır. 2040 yılında fotovoltaik teknolojisinin üretim içerisindeki payının yaklaşık olarak %10 civarında olacağı değerlendirilmektedir (IEA, 2018: 528; IEA, 2019a).

	2000	2005	2010	2015	2017	2025	2030	2035	2040
Kömür	6.001	7.331	8.660	9.544	9.858	9.896	10.016	10.172	10.335
	%39,1	%40,5	%41,2	%39,5	%38,6	%32,7	%29,9	%27,6	%25,6
Doğal Gaz	2.747	3.701	4.805	5.548	5.855	6.829	7.517	8.266	9.071
	%17,9	%20,5	%22,9	%23,0	%22,9	%22,6	%22,4	%22,4	%22,4
Hidro	2.618	2.935	3.445	3.905	4.109	4.821	5.330	5.774	6.179
	%17,1	%16,2	%16,4	%16,2	%16,1	%15,9	%15,9	%15,6	%15,3
Rüzgâr	-	-	-	838	1.085	2.304	3.157	3.960	4.690
	-	-	-	%3,5	%4,3	%7,6	%9,4	%10,7	%11,6
Güneş FV	-	-	-	250	435	1.463	2.197	2.935	3.839
	-	-	-	%1,0	%1,7	%4,8	%6,6	%8,0	%9,5
Nükleer	2.591	2.768	2.756	2.570	2.637	3.089	3.253	3.520	3.726
	%16,9	%15,3	%13,1	%10,6	%10,3	%10,2	%9,7	%9,5	%9,2
Biyo kütle	164	226	360	517	623	890	1.057	1.238	1.427
	%1,1	%1,3	%1,7	%2,1	%2,4	%2,9	%3,2	%3,4	%3,5
Petrol	1.212	1.135	973	971	940	763	676	597	527
	%7,9	%6,3	%4,6	%4,0	%3,7	%2,5	%2,0	%1,6	%1,3
Diğer	1	1	2	10	11	198	307	454	649
	%0,0	%0,0	%0,0	%0,0	%0,0	%0,7	%0,9	%1,2	%1,6
Toplam	15.334	18.097	21.001	24.152	25.553	30.253	33.510	36.916	40.443

Tablo 4.1. Küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (TWh,%).

(IEA, 2018: 528; IEA, 2019a)

4.7. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları

Günümüzde fotovoltaik teknolojisi, en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojilerinden biridir. Gelecekte küresel elektrik üretimini karşılamada önemli bir rol oynaması beklenen fotovoltaik sistemlerin, bazı avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır.

4.7.1. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları

Stratejik ve jeopolitik olarak bağımsız, temiz ve sürdürülebilir olan tek enerji kaynağı güneş enerjisidir. Bu kapsamda fotovoltaik teknolojisi birçok önemli avantaj sunmaktadır. Fotovoltaik teknolojinin avantajlarını şu şekilde sıralanabilir (IRENA, 2012a: 4):

- Güneş enerjisi, dünyanın her yerinde mevcut olan yenilenebilir sonsuz bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle, petrol, doğalgaz ve kömüre olan bağımlılığı azaltabilir.
- FV sistemler, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine çevirebildikleri için sistemi bozmaya ya da yıpratmaya neden olabilecek hareketli parçaları yoktur.
- FV teknolojileri, küçük ve oldukça modülerdir ve diğer birçok elektrik üretim teknolojisinin aksine, hemen hemen her yerde kullanılabilir.
- Kömür, nükleer, petrol ve gaz kullanan geleneksel enerji santrallerinden farklı olarak FV sistemlerinin yakıt maliyeti yoktur. Bu nedenle değişkenlik gösteren fosil yakıt fiyatlarına karşı bir fiyat koruması sağlayabilir.
- FV sistemlerinin işletme ve tesis bakım maliyetleri geleneksel enerji santrallerine kıyasla çok daha düşüktür.
- FV sistemlerin işletme süresince; gürültüye sebep olmaması, zararlı emisyonları açığa çıkarmaması, sera gazı etkisinin bulunması, atık ürün oluşturmaması ve su kaynaklarını kirletmemesi çevre ile uyum konusunda geleneksel kaynaklara göre büyük avantaj sağlamaktadır.
- FV sistemler, ihtiyaç duyulan enerji miktarına bağlı olarak genişletilebilir veya küçültülebilir.

4.7.2. Fotovoltaik Sistemlerin Dezavantajları

Fotovoltaik sistemlerin birçok avantaj sağlayan yönlerinin olmasının yanı sıra kullanımlarından kaynaklanan bazı sınırlamalarda mevcuttur. Bu sistemlerin dezavantajları ise şu şekilde sıralayabiliriz (Alhouli, 2017: 11;33; Pardal vd., 2019: 114):

- Güneşten sağlanan enerji, mevcut güneş ışınım miktarına bağlı olarak değişmektedir.
- FV Sistemlerden elektrik üretimi iklim şartlarından ve günlük hava değişimlerinden etkilenmektedir. Bu nedenle, FV sistemeler, yaz aylarında ve güneşli günlerde iyi elektrik üretimi sağlarken, kış aylarında ve havanın bulutlu olduğu günlerde elektrik üretimi sınırlı olmaktadır. Ayrıca, geceleri de elektrik üretimi yapılamamaktadır. Bu nedenle, çoğu zaman enerji depolama araçlarına yatırım yapmak veya ikincil bir enerji kaynağını tercih etmek gerekir. Depolanma imkânları ise sınırlıdır.
- Diğer birçok büyük ölçekli elektrik üreten sistemlere kıyasla FV sistemler, nispeten daha yüksek bir başlangıç maliyetine sahiptir. Bu yüksek maliyet göreceliği, FV sistemlerinde kullanılan cihazların imalat maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, teknolojik gelişmeyle birlikte FV sistemler giderek yaygınlaşmakta ve maliyetleri düşmektedir.
- Birim alana gelen güneş ışınım miktarı az olduğundan büyük güçlerin üretilebilmesi için diğer sistemlere göre çok daha geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. 1 kWh elektrik enerjisi üretmek için yaklaşık 7-8 m²'lik fotovoltaik panel gerekmektedir.
- Fotovoltaik modüller, pratikte 25-30 yıl boyunca optimum fotovoltaik verim sağlar. Bunun ötesinde, performansları düşer ve modüllerin değiştirilmesi gerekebilir. Bu nedenle, FV sistemine yatırım yapılırken amortisman hesabı dikkate alınmalıdır.
- Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi, FV sistemlerinde enerjisinin kesintili olduğu durumlar vardır. Enerji üretiminde öngörülemezliğin olması FV sistemlerin daha az güvenilir enerji kaynağı haline getirir.

- FV hücrelerinin yapımında kullanılan materyaller doğada nadir bulunan elementlerdir.
- FV hücreler, doğru akım enerjisi üretmektedirler. Bu sebeple üretilen doğru akımın kullanımını daha uygun olan alternatif akıma dönüştürülmesi gereklidir.
- Yatırımcılar, FV sistemler hakkında yeterli düzeyde bilgiye sahip değiller.

Güneş enerjisinin sonsuz bir kaynak olması ve yakıt maliyetinin bulunmaması fotovoltaik sistemlere en büyük avantajı sağlarken, enerji sürekliliği açısından fotovoltaik sistemlerin kesintili bir enerji kaynağı olması ise dezavantajlı yönünü oluşturmaktadır. Her ülkenin belirli bir güneş ışınım ve günlük güneşlenme süresi içinde fotovoltaik sistemlerden yararlanabilmesi, hem ülke ekonomisine hemde enerji alanında bağımsızlığa katkı açısından pozitif etki yaratmaktadır. Bu sebeple ülkeler güneş enerjisinden yararlanma konusunda güneş enerjisi piyasasının gelişimine yönelik olarak bir takım politikalar geliştirmektedirler.

4.8. Dünya’da Fotovoltaik Piyasasının Gelişimine Yönelik Politikalar

Enerji sistemlerinin dönüşümü birçok ülkede sürdüğü için, politika yapıcılar yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonunu kolaylaştıracak teknolojilerin geliştirilmesine ve uygulanmasına odaklanmışlardır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yayılmasını geliştirmek için geleneksel mali ve düzenleyici mekanizmalar kullanılmış ve zamanla yeni mekanizmalar da ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, son zamanlarda tarife bazlı araçlardan rekabetçi açık artırmalara doğru küresel bir kayma yaşandığı görülmektedir. İçerisinde fotovoltaik teknolojinin de yer aldığı yenilenebilir enerjiyi destekleme politikaları ve hedefleri şu anda dünya çapında neredeyse tüm ülkelerde mevcuttur (REN21, 2019: 49,61). Küresel çapta sıklıkla kullanılan fotovoltaik sistem teşvik modelleri aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.8.1. Teşvik Politikaları

Fotovoltaik sistemlerden elektrik enerjisi üretimi uzun yıllardır kullanılmasına karşın henüz diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilecek ucuzlukta değildir. Bu nedenle fotovoltaik sistemlerin gelişimi önündeki mali engellerin aşılmasında; alım garantisi (Feed in Tariff- FIT), mahsuplaşma (Net metering), mali teşvikler, güneş enerjisi yenilenebilir enerji kredisi (Solar Renewable Energy Credit-SREC) ve yenilenebilir enerji ihaleleri gibi destekleme mekanizmaları önemli bir rol oynamaktadır.

4.8.1.1. Alım garantisi (Feed in Tariff- FIT)

Alım garantisi (Feed in Tariff- FIT), ulusal politikalar çerçevesinde birçok ülkede yatırımları desteklemede tercih edilen başlıca politika unsuru olmaktadır. Üretim genellikle ekonomik olarak mümkün olmadığı, gelişimlerinin erken aşamalarında yenilenebilir enerji kaynaklarını teşvik etmek için gerekli görülmektedir. Bu teşvik yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen ve elektrik şebekesine verilen her enerji birimi için piyasa fiyatının üzerinde sabit bir fiyattan alım garantisi verilmektedir. Alım garantileri genellikle uzun vadeli anlaşmaları ve söz konusu enerjinin üretim maliyetine bağlı fiyatları içermektedir. Uzun vadeli sözleşmeler ve garantili fiyatlar, üreticileri yenilenebilir enerji üretiminin doğasında bulunan bazı risklerden koruyarak aksi takdirde gerçekleşmeyecek yatırım ve kalkınmayı teşvik etmektedir. Genel olarak 15 ile 25 yıl aralığında uzun vadeli sözleşmeler sunulmaktadır. Almanya ve Çin son on yılda bu yöntemi başarılı bir şekilde uygulamaktadır. Küresel güneş enerjisinin yaklaşık dörtte üçünün garantili tarifelerle bağlantılı olduğu tahmin edilmektedir (Kenton, 2019).

4.8.1.2. Mahsuplaşma (Net metering)

Mahsuplaşma; konut, ticari işletmeler gibi şebeke müşterilerinin, elektrik kullanımlarının bir kısmını veya tamamını fotovoltaik sistemlerinden kendi ürettikleri elektrikle dengelemelerine ve üretmiş oldukları fazla elektriği de kendi elektrik kuruluşlarına satmalarına olanak tanıyan bir teşvik politikasıdır. Bu teşvik yönteminde amaç büyük sübvansiyonlar yaratmak değil, yeni yatırımlar için küçük yatırımcıları

motive etmektedir. Bu teşvik yöntemi ile, atıl duran kapasitenin değerlendirilmesi ve böylece verimliliğin artırılması amaçlanmaktadır. İhtiyaç duyulan elektriğin yakın kaynaktan karşılanmasını sağlayarak iletim kayıplarının azaltılmasına imkan vermektedir (Şençiçek, 2017: 13-16).

4.8.1.3. Yatırım teşvikleri

Yatırım teşvikleri; genellikle ekonomik ve sosyal politikayı geliştirmek amacıyla belirli bir sektöre verilen bir mali yardım veya destek biçimidir. Yatırım teşvikleri; destek kredileri, hibeler, vergi indirimleri, gümrük muafiyetleri şeklinde olabilmektedir. Bu teşvik yöntemi ile, daha fazla fotovoltaik sistem yatırımlarını çekebilmek için yatırımın belli bir oranı kadar hibe sağlanmakta veya cazip ödeme koşullarında krediler sunularak yatırımcı üzerindeki mali yükün azaltılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, vergi indirimi ve gümrük muafiyetleri uygulanarak yatırımcılara çeşitli avantajlar sunulmaktadır.

4.8.1.4. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kredisi

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji sertifikası pazarları, güneş enerjisi sistemlerinin benimsenmesini teşvik etmek için bazı ABD eyaletlerinde ortaya çıkmıştır. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kredisi (Solar Renewable Energy Credit-SREC), güneş enerjisi sistemi tarafından üretilen ve ticari elektrikten ayrı olarak alınıp satılabilen bir emtiadır. Güneş enerjisi sistemlerinden üretilen her megawatt-saat (MWh) elektrik için bir SREC oluşturulur (USPV, 2019: 1-4).

ABD eyaletlerinin yarısından fazlası, elektrik tedarikçilerinin ve elektrik dağıtım şirketlerinin yenilenebilir kaynaklardan sattıkları elektriğin belirli bir miktarını üretmesini gerektiren “*Yenilenebilir Portföy Standartları (Renewable Portfolio Standards-RPS)*” yasasını yürürlüğe koymuştur. Bu eyaletlerde elektrik tedarikçilerinin ve elektrik dağıtım şirketlerinin ürettikleri veya sattıkları elektriğin belirli bir yüzdesini, yenilenebilir portföy standartları dahilinde güneş enerjisinden temin etmeleri gerekmektedir. Bu temin karşılanamazsa “*Alternatif Uyumluluk Ödemeleri (Alternative Compliance Fee-ACP’ler)*” adı altında verilen para cezası ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Elektrik satan herhangi bir şirket ya kendi varlıklarından

gerekli miktarda güneş elektriği üretmeli, ya da güneş sistemlerinin inşasını desteklemek için kullanılacak bir fona Alternatif Uyum Ücreti (ACP) ödemeli ya da fotovoltaik sistem sahiplerinden SREC satın almalıdır. Güneş enerjisi üreticileri bu şirketlere ellerindeki SREC'leri satarak ek gelir elde etmekte ve böylece elektrik maliyetlerini düşürebilmektedirler (USPV, 2019: 1-4).

4.8.1.5. Yenilenebilir enerji ihaleleri

Yenilenebilir enerji ihalelerinin birincil amacı, yenilenebilir enerji hedeflerini en uygun maliyet ile karşılamaktır. Bu teşvik mekanizması, son zamanlarda yenilenebilir enerji üretimini teşvik etmek için kullanılan popüler bir yöntem haline gelmiştir. Bu teşvik mekanizmasında, ülkenin kendine özgü koşullarına ve genel politikalarına göre ihale kriterleri belirlenmektedir.

Politika yapıcılar öncelikle; yatırım bölgesi, kapasite veya üretim miktarı, ihaleye katılanların karşılaması gereken şartlar, sosyoekonomik teşvikler, cezalar, teknik ve mali nitelikler gibi bir takım ihale kriterlerini belirlemekte ve ardından en iyi fiyatı sunan tedarikçinin belirleneceği bir ihale süreci başlatmaktadırlar. Rekabetçi ihale süreci aracılığıyla, katılımcılar yenilenebilir üretim tesisleri inşa etmek için tekliflerini sunarlar. Bu teklifler ihale kriterlerine göre değerlendirildikten sonra ihaleyi kazanan taraf ile belirli bir süre için belirli bir fiyattan enerji satın alım anlaşması imzalanmaktadır. Bu teşvik yöntemini, alım garantisinden (Feed in Tariff-FIT) ayıran temel fark uygun projelerin ve fiyatın rekabetçi bir ihale süreciyle seçilmesidir. (Wiser vd., 2002: 5-6).

Küresel çapta uygulanmakta olan teşvik politikaları, fotovoltaik teknolojisinin ilerlemesinde, maliyetlerin düşmesinde ve fotovoltaik sistem piyasasının büyümesinde önemli bir rol oynamaktadır. İyi tasarlanmış destek mekanizmaları gelişmekte olan fotovoltaik sistem yatırımlarına hız kazandırmaktadır. Uygulanan teşvik politikaları, ülke şartlarına bağlı olarak ülkeden ülkeye değişim gösterebilmektedir.

4.8.2. Ülke Uygulamaları

Her ülke kendi fotovoltaik teknolojisini geliştirmek ve yaygınlaştırmak için, teşvik politikalarını ülke koşullarına göre belirlemekte ve uygulamaktadır. Aşağıda fotovoltaik sistem kurulu gücü en fazla olan ülkelerden Çin, ABD ve Almanya’da izlenen politikalar ve uygulanan destekler ele alınmıştır.

4.8.2.1. Çin’de uygulama

Çin, 2018 yılında, 45 GW yeni ilave güç kapasitesi ile şebekeye bağlı toplam fotovoltaik kapasitesini 176,1 GW’a yükselterek, yıllık 228,8 TWh fotovoltaik enerji üretimi ile toplam elektrik enerjisi üretiminin %3,6’sını fotovoltaik sistemlerinden sağlamıştır (IEA, 2019c: 7; IEA, 2019e: 86). Böylelikle, 2018’de dünya genelindeki yeni tesislerin neredeyse %45’i Çin tarafından tesis edilmiştir (REN21, 2019: 94).

2016 yılı sonunda Çin’in Ulusal Enerji İdaresi Başkanlığı (NEA) tarafından yayınlanan “*Güneş Enerjisi Gelişimi İçin 13. Beş Yıllık Planı*” na göre, fotovoltaik enerji üretimi kurulu gücünün 2020 yılına kadar 105 GW’a ulaşması planlanmıştır. Çin 2017 yılı sonu itibarıyla fotovoltaik kurulu güç kapasitesini 130 GW’ın üzerine çıkartarak bu hedefini çoktan aşmıştır. Bunun üzerine, Ulusal Enerji İdaresi (NEA), 2017 yılında “*Yenilenebilir Enerjinin Geliştirilmesi İçin 13. Beş Yıllık Planın Uygulanmasına Yönelik Kılavuz*” yayınlamış ve 2020 yılına kadar kümülatif şebekeye bağlı elektrik santrali tesislerin kapasite hedefine ilişkin 130 GW hedef belirlemiştir. Gelişme hızını kontrol etmek, yerel FV pazarının aşırı büyümesini önlemek, kapasite fazlası oluşmasını engellemek, güneş enerjisi sübvansiyonlarının maliyetini kontrol etmek amacıyla, 2018 haziran ayında “*2018 Güneş Enerjisi Üretimi Bildirimi*” yayınlanarak sübvansiyon politikalarında değişikliğe gidilmiştir. Böylelikle, hem daha büyük ölçekli projelerin kurulumu durdurulmuş hem de bu tesisler için sağlanan teşvik fiyatları azaltılmıştır. Yeni politika rehberliği altında, Çin’in fotovoltaik pazarı geniş bir büyüme aşamasından, yüksek kalitede ve ayrıntılı bir pazar tasarımına doğru giderek değişmiş oldu. Bu politika değişikliği nedeniyle Çin’de yıllık güneş enerjisi talebi 2014’ten bu yana ilk kez azalmış olsa da, 2018’de güneş dünyasına hakim olmaya devam ettiği görülmektedir. Dünya güneş enerjisi üretim kapasitesinin yaklaşık üçte birini işleterek dünyanın en büyük güneş enerjisi pazarına sahip olan Çin,

ortaya koyduğu yeni politika çerçevesinde fotovoltaik endüstrisi teknolojik inovasyonunu daha da güçlendirecek, iyileştirme hızını artıracak, maliyetleri azaltacak ve verimliliği artıracaktır (Solar Power Europe, 2019: 54-56).

4.8.2.2. ABD’de uygulama

Fotovoltaik sistem kurulumu son birkaç yıl içerisinde Amerika Birleşik Devletleri’nde de hızla artmıştır. ABD, 2018 yılı içerisinde 10,6 GW gücünde yeni kapasite ilave etmesiyle toplamda 62,2 GW’lık fotovoltaik kapasiteye ulaşmıştır (IEA, 2019c: 7). Dünyanın ikinci en büyük fotovoltaik pazarı olan ABD, yıllık 89,8 TWh fotovoltaik enerji üretimi ile toplam elektrik enerjisi üretiminin %2,3’ünü fotovoltaik sistemlerinden sağlamıştır (IEA, 2019e: 86).

2018’de ABD yenilenebilir enerji sektörü, federal vergi reformu mevzuatının etkileri ve yeni ithalat tarifelerinin bir sonucu olarak belirsizliğe rağmen istikrarını korumuştur. Bununla birlikte, güneş enerjisi üretim maliyetlerinin düşmesi, pil depolama teknolojisindeki gelişmeler ve şebeke operatörlerinin artan uzmanlığı sayesinde güneş enerjisi sektörü büyümeye devam etmiştir. Güneş Enerjisi Endüstrileri Birliği’ne (SEIA) göre, 2018 yılının 3. çeyreğinde ABD 11.3 milyon konutun enerji talebini karşılayacak olan toplam 60 GW kurulu kapasite değerine ulaşmak için 1,7 GW yeni FV kapasitesi kurmuştur. Önümüzdeki beş yıl içerisinde de toplam kurulu FV kapasitenin iki katından fazla olacağı ve 2023 yılına kadar yılda 14 GW’tan fazla yeni FV kapasitenin kurulacağı öngörülmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri, yenilenebilir enerjiyi geniş ölçüde desteklemektedir. Uygulamış olduğu Yenilenebilir Enerji Üretimi Vergi Kredisi (Renewable Energy Production Tax Credit-PTC), Yenilenebilir Enerji Yatırımı Vergi Kredisi (Renewable Energy Investment Tax Credit-ITC) ve Konutlarda Yenilenebilir Enerji Vergi Kredisi (Residential Renewable Energy Tax Credit-RTC) ile yenilenebilir enerji sistemlerin yaygınlaşmasına finansal destek sağlamaktadır. Ayrıca, Amerika Enerji Bakanlığı (US Department of Energy-DOE), Güneş Enerjisi Teknolojileri (The Solar Energy Technologies Office-SETO) biriminin 2011 yılında başlattığı ulusal girişim olan Sunshot Programı ile, güneş enerjisi santrallerinin diğer geleneksel santraller ile rekabet edebilmesi için verimliliğin artırılması ve maliyetlerin

düşürülmesi amaçlanmaktadır (IEA, 2014b: 114-120). Bu kapsamda finanse edilen güneş enerjisi tesislerinde üretilen elektriğin indirgenmiş maliyetinin 2020 yılına kadar 0,06 USD/kWh değerine düşmesi ve güneş enerjisinin mümkün olan en ucuz enerji formları arasında yer alması hedeflenmektedir (DOE, 2019).

4.8.2.3. Almanya’da uygulama

Avrupanın en büyük pazarı olan Almanya, 2018 yılı içerisinde 3 GW gücünde yeni kapasite ilave etmesiyle toplam fotovoltaik kapasite miktarını 45,4 GW seviyesine çıkarmıştır (IEA, 2019c: 7). Ülke 44,4 TWh enerji üretimi ile yıllık elektrik enerjisi üretiminin %8,4’ünü fotovoltaik sistemlerinden karşılamıştır (IEA, 2019e: 86).

2000 yılında Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yasası’nın (Erneuerbare Energien Gesetz EEG) yürürlüğe girmesi, Almanya’da yenilenebilir enerji pazarının hızla gelişmesinde en önemli politika unsuru olmuştur. Bu yasa, 20 yıl boyunca FV sistemlerinden üretilen elektrik için alım garantisi (Feed in Tariff-FIT) getirmiştir (Jäger-Waldau, 2018: 15-16). FIT programında belirtilen ücretlendirme sistemi, ülkenin yıllık kurulum hedefine ulaşmasına bağlı olarak düşürülmekte veya artırılmaktadır. Ayrıca mevcut operasyonel teşviklere ek olarak Alman Kalkınma Bankası tarafından, enerji depolama sistemleri için hibeler ve düşük faizli krediler şeklinde bir dizi yatırım desteği seçeneği sunulmaktadır (Solar Power Europe, 2019: 66). Bununla birlikte, Almanya, Avrupa Birliği’nin yenilenebilir hedefi olan %40 sera gazı emisyonu azaltma hedefine, 2020 süresinin bitimine kadar ulaşamayacaktır. Bu hedefi telafi etmek amacıyla mart 2018’de hükümet koalisyonu tarafından, 2030 yılına kadar brüt elektrik enerjisi tüketiminin %65’inin yenilenebilir kaynaklardan temin edilmesine yönelik bir hedef belirlenmiştir. Bunun için yıllık ortalama 8 GW FV kapasitesinin ve 4 GW rüzgâr kapasitesinin eklenmesi gerekecektir. Ayrıca 2023 yılına kadar ülkedeki tüm nükleer santralleri kapatma kararının alınması da, kısa vadede fotovoltaik teknolojisi için önemli bir pazar fırsatı sunuyor olacaktır (Solar Power Europe, 2019: 65-66).

Yukarıda anlatıldığı üzere, enerji politikaları çerçevesinde yüksek gelir seviyesindeki ülkelerde başlayan fotovoltaik sistemlerden elektrik enerjisi üretimi,

günümüzde orta ve alt gelir seviyesindeki ülkeler için de ilgi odağı olmuştur. Hemen hemen tüm ülkeler güneş enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretimi için, özel teşvik politikaları uygulamaktadırlar (Solangi vd., 2011: 2161). Yatırımcıların, geleneksel enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üreten sistemlere olan ilgilerini, fotovoltaik sistemler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı sistemlere kaydırabilmek için çeşitli teşvik modelleri geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Burada önemli olan teşvik politikalarının var oluşu değil bu mekanizmaların amaçlar doğrultusunda başarılı bir şekilde uygulanabiliyor olmasıdır. Çin, ABD ve Almanya fotovoltaik sistemlerin kullanımını açısından başarılı hikayeleri olan ülkelerdir. Bu ülkeler izlemiş oldukları güneş enerjisi politikaları sayesinde fotovoltaik sistemlerden elektrik enerjisi üretimlerini bir ölçüde artırmayı başarmışlardır. Ayrıca bu ülkeler kendi fotovoltaik teknolojisini üreten ve dünya fotovoltaik piyasasına ürün ihraç eden ülkeler arasında da lider konumundadır.

Çalışmanın buraya kadar olan kısımda, fotovoltaik teknoloji ve piyasasının tarihsel gelişiminden bahsedilmiştir. Türkiye özelinde fotovoltaik sistem piyasasının gelişimi bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

5. TÜRKİYE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde, Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin mevcut durumu ve fotovoltaik sistem piyasasının gelişimi için izlenen ulusal politikalar ele alınmıştır. Bu kapsamda, Türkiye enerji ve elektrik sektörünün genel durumu araştırılmış olup “*Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişimi için önemlidir?*” sorusu tartışılmıştır.

5.1. Türkiye Enerji Sektörünün Genel Durumu

Türkiye, dünyanın en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biridir. Türkiye'nin toplam enerji talebi kalkınmakta olan, yaşam standardı yükselen ve nüfusu artan bir ülke olması sebebiyle hızla artmaktadır. Tablo 5.1’de görüleceği üzere, 1990 yılından 2018 yılına kadar geçen 29 yıllık süreçte Türkiye nüfusu yaklaşık olarak 1,5 kat artarak 53,9 milyondan 82,3 milyona çıkarken, bu yıllar arasında GSYİH’si yaklaşık 5,1 kat artarak 150,7 milyar ABD dolarından, 771,4 milyar ABD dolarına yükselmiştir (World Bank, 2019b). Bu süre zarfında, birincil enerji üretim/tüketim miktarlarına bakıldığında 1990 yılında 51,4 Mtep olan birincil enerji tüketimi 2,8 kat artarak 2018 yılında 145,9 Mtep’e ulaşmıştır. Buna karşın 1990 yılında 24,8 Mtep olan birincil enerji üretimi ise 1,6 kat artış göstermiş olup 2018 yılında 41,3 Mtep’e yükselmiştir (IEA, 2019a).

	<i>Toplam Nüfus (milyon)</i>	<i>Nüfus Artış Oranı</i>	<i>GSYİH (cari) (milyar \$)</i>	<i>GSYİH Büyüme Oranı</i>	<i>Birincil Enerji Tüketim (Mtep)</i>	<i>Birincil Enerji Tüketim Artışı</i>	<i>Birincil Enerji Üretim (Mtep)</i>	<i>Birincil Enerji Üretim Artışı</i>
1990	53,9		150,7		51,4		24,8	
1995	58,5		169,5		61,0		26,1	
2000	63,2		273,0		76,0		26,4	
2005	67,9	%52,7	501,4	%411,9	84,1	%183,6	23,7	%66,5
2010	72,3		771,9		105,8		31,6	
2015	78,5		859,8		128,5		31,7	
2018	82,3		771,4		145,9		41,3	

Tablo 5.1. Türkiye'nin nüfusu, GSYİH'si, birincil enerji talep ve üretimi (1990-2018).

(IEA, 2019a; World Bank, 2019b)

Tablo 5.2’de, Türkiye birincil enerji üretim/tüketiminin kaynaklara göre dağılımı gösterilmiştir. Yıllar itibarıyla Türkiye birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımında önemli değişiklikler meydana gelmiştir. Kalkınma hedefleri sonucunda ticari olmayan yakıtların birincil enerji tüketimindeki payı azalmış, doğal gaz ile diğer yenilenebilir (güneş, rüzgâr vb.) enerji kaynakların payı artmıştır. Türkiye birincil enerji tüketiminde hakim kaynaklar olan fosil yakıtların payı, 1990 yılında %81,1 iken 2018 yılında bu oran %86,6 olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakların katkısı ise 1990 yılında %18,9 iken, biyoyakıt tüketimindeki düşüş ve enerji tüketimindeki artışın etkisiyle 2018 yılında bu oran %13,4 seviyesine gelmiştir (IEA, 2019a). Biyoyakıt odun, bitkisel ve hayvansal artıklar gibi ticari olmayan yakıtları içermektedir.

Tablo 5.2’de izleneceği üzere, birincil enerji tüketiminde petrol tüketimi 1990 yılında %45,1’lik pay ile ağırlıklı iken 2018 yılında bu pay %28,8’e inmiştir. Bu düşüşler kömür ve biyoyakıt tüketiminde de görülmektedir. Kömür tüketimi payı %30,4’den %29,7’ye gerilerken, biyoyakıt tüketim payı %14,0’dan %2,1’e düşmüştür. Son yıllarda ise, doğal gaza olan talebin hızla artması nedeniyle doğal gazın payı %5,6’dan %28,2’ye çıkarak önemli bir kaynak haline dönüşmüştür. Hidrolik enerjinin tüketim payı ise %3,9’dan %3,5’e gerileyerek hemen hemen sabit kalmıştır. Güneş, rüzgâr ve jeotermal gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakların toplam tüketim payı ise %1,0’dan %7,8’e çıkmıştır (IEA, 2019a).

Çeşitli enerji kaynakları bulunmasına rağmen enerji üretiminde yeterli düzeyde olamayan Türkiye’nin, 1990-2018 yılları arası birincil enerji üretim değerleri Tablo 5.2’den incelendiğinde en büyük enerji kaynaklarının kömür ve hidro olduğu görülmektedir. Türkiye birincil enerji üretiminde fosil yakıtların payı 1990 yılında %61,3 iken 2018 yılında bu oran %52,8’e düşmüştür. Yenilenebilir enerji kaynakların katkısı ise %38,7’den %47,2’ye yükselmiştir. Birincil enerji üretiminde, petrol üretimi 1990 yılında %14,5’lik paya sahip iken, 2018 yılında bu oran %7,3’e inmiştir. Tüketimi hızla yükselen doğal gazın üretim payı 1990 yılında %0,8 iken, 2018 yılında bu oran çok artış göstermeyerek %1,0 olarak devam etmiştir. Kömür üretiminin payı %46,0’dan %44,6’ya gerilemiştir. Biyoyakıt üretim payı %29,0’dan %7,3’e düşmüştür. Birincil enerji üretiminde petrol ve doğal gazın sınırlı katkısına karşın, güneş, rüzgâr, jeotermal gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretim

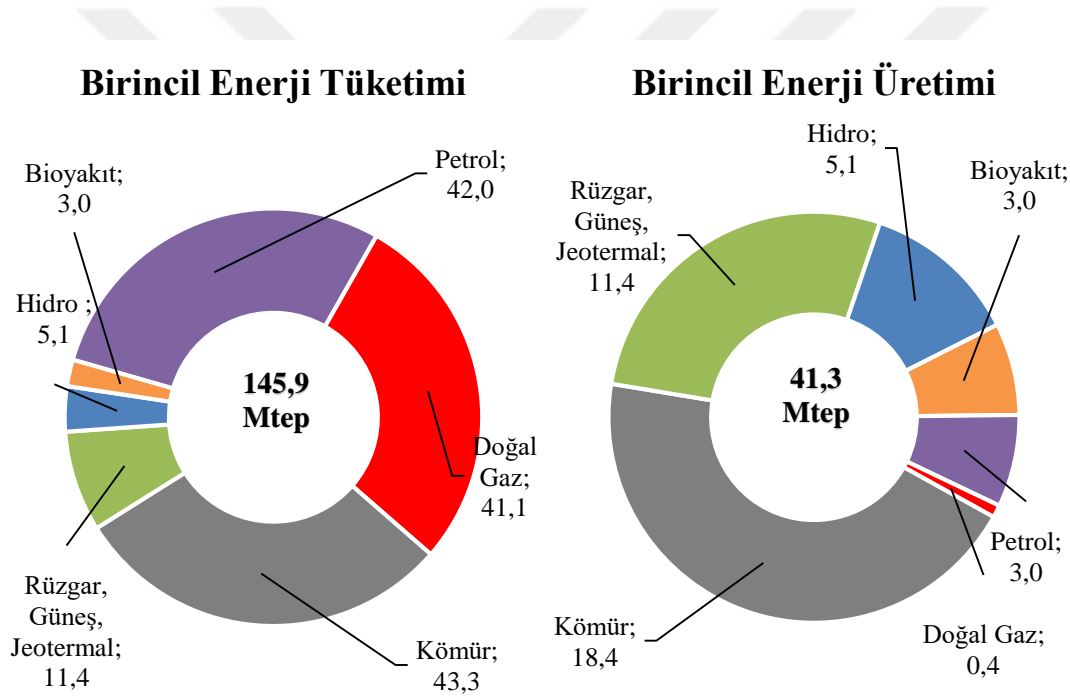
payı zaman içerisinde %2,0'dan %27,6'ya çıkmıştır. Hidrolik enerjinin payı ise %7,7'den %12,3'e yükselmiştir (IEA, 2019a).

			1990	2005	2000	2005	2010	2015	2018	
TÜKETİM	Petrol	<i>Mtep</i>	23,2	28,4	30,4	28,7	31,5	38,7	42,0	
		<i>Pay</i>	%45,1	%46,6	%40,0	%34,1	%29,8	%30,1	%28,8	
	Doğal Gaz	<i>Mtep</i>	2,9	5,8	12,6	22,8	31,4	39,4	41,1	
		<i>Pay</i>	%5,6	%9,5	%16,6	%27,1	%29,7	%30,7	%28,2	
	Kömür	<i>Mtep</i>	15,6	16	22,8	22,4	31,2	34,5	43,3	
		<i>Pay</i>	%30,4	%26,2	%30,0	%26,6	%29,5	%26,8	%29,7	
	Biyoyakıt ve Atık	<i>Mtep</i>	7,2	7,1	6,5	5,3	4,5	3,2	3,0	
		<i>Pay</i>	%14,0	%11,6	%8,6	%6,3	%4,3	%2,5	%2,1	
	Hidro	<i>Mtep</i>	2,0	3,1	2,7	3,4	4,5	5,8	5,1	
		<i>Pay</i>	%3,9	%5,1	%3,6	%4,0	%4,3	%4,5	%3,5	
	Diğer Yenilenebilir (Güneş, Rüzgâr vb.)	<i>Mtep</i>	0,5	0,7	1,0	1,4	2,7	6,9	11,4	
		<i>Pay</i>	%1,0	%1,1	%1,3	%1,7	%2,6	%5,4	%7,8	
	Toplam		<i>Mtep</i>	51,4	61,0	76,0	84,1	105,8	128,5	145,9
	ÜRETİM	Petrol	<i>Mtep</i>	3,6	3,5	2,7	2,2	2,7	2,7	3,0
<i>Pay</i>			%14,5	%13,4	%10,2	%9,3	%8,5	%8,5	%7,3	
Doğal Gaz		<i>Mtep</i>	0,2	0,2	0,5	0,7	0,6	0,3	0,4	
		<i>Pay</i>	%0,8	%0,8	%1,9	%3	%1,9	%0,9	%1,0	
Kömür		<i>Mtep</i>	11,4	11,7	13	10,6	16,7	12,8	18,4	
		<i>Pay</i>	%46,0	%44,8	%49,2	%44,7	%52,8	%40,4	%44,6	
Biyoyakıt ve Atık		<i>Mtep</i>	7,2	7,1	6,5	5,3	4,5	3,2	3,0	
		<i>Pay</i>	%29,0	%27,2	%24,6	%22,4	%14,2	%10,1	%7,3	
Hidro		<i>Mtep</i>	2,0	3,1	2,7	3,4	4,5	5,8	5,1	
		<i>Pay</i>	%7,7	%11,9	%10,2	%14,3	%14,2	%18,3	%12,3	
Diğer Yenilenebilir (Güneş, Rüzgâr vb.)		<i>Mtep</i>	0,5	0,7	1,0	1,4	2,7	6,9	11,4	
		<i>Pay</i>	%2,0	%2,7	%3,8	%5,9	%8,5	%21,8	%27,6	
Toplam		<i>Mtep</i>	24,8	26,1	26,4	23,7	31,6	31,7	41,3	

Tablo 5.2. Türkiye birincil enerji üretim/tüketim değerlerinin kaynaklara göre dağılımı.
(IEA, 2019a)

Tablo 5.2'de görüldüğü üzere, enerji tüketimindeki artış devam ederken yerli kaynakların katkısı aynı oranda olamamıştır. 2018 yılında 145,9 milyon TEP olarak gerçekleşen birincil enerji tüketimine karşın 41,3 milyon TEP yerli üretim olmuştur (Şekil 5.1). Bu durumun ortaya çıkmasında en önemli etken son yıllarda doğal gaz tüketim miktarındaki hızlı artıştır. 1990-2018 yılları arasında, doğal gaz

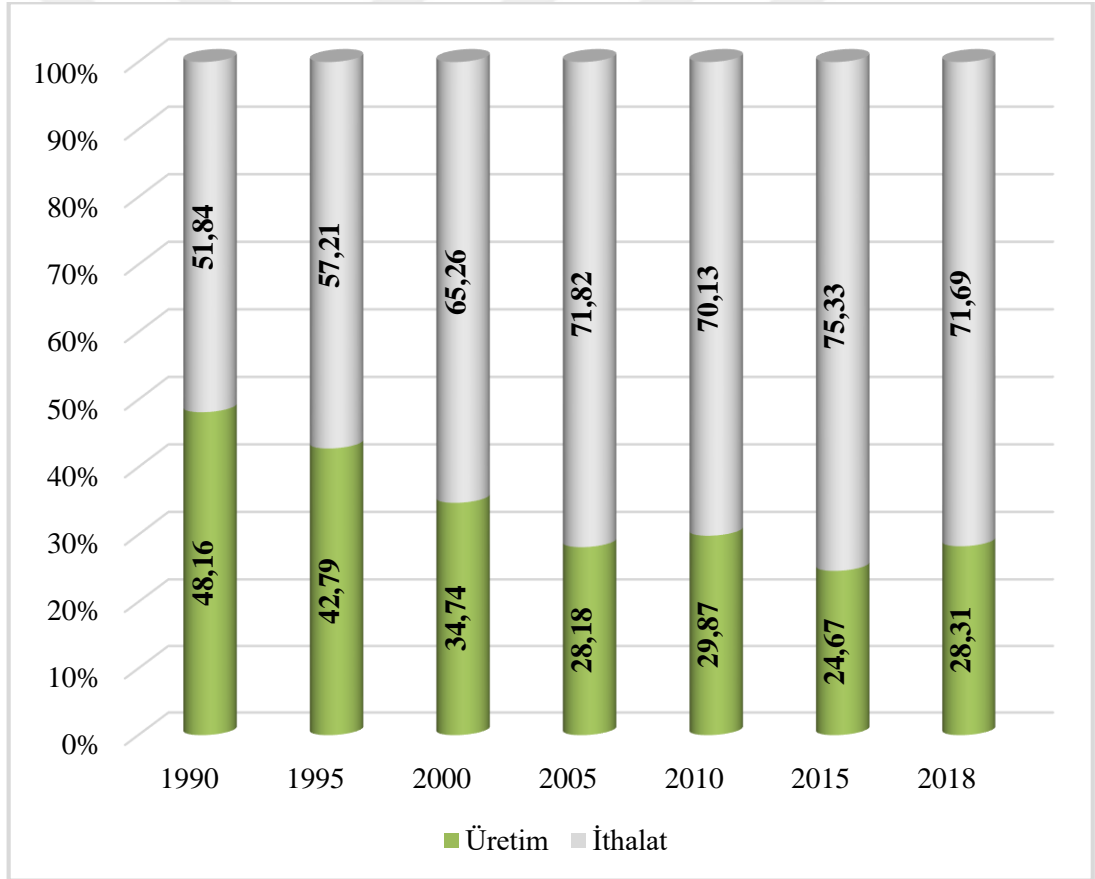
tüketim miktarı 2,9 Mtep'ten 41,1 Mtep'e çıkarak yaklaşık 14 kat artış göstermiştir. Buna karşın yıllık 0,2 ile 0,8 Mtep arasında değişkenlik göstermekle birlikte doğal gaz üretim miktarının oldukça sınırlı düzeylerde gerçekleşmesi doğal gazın ithal edilmesini zorunlu kılmıştır. 2018 yılı içerisinde tüketilen doğal gazın %0,97'si yerli üretim ile sağlanırken %99,03'lük kısmı ise ithalat ile karşılanmıştır. Benzer bir durum petrol ve kömürde de söz konusu olup; 42,0 Mtep petrol tüketiminin %92,9'luk kısmı, 43,3 Mtep kömür tüketiminin ise %57,5'lik kısmı ithal edilmiştir. Türkiye'de tespit edilmiş olan petrol, doğal gaz ve kömür rezerv durumları göz önüne alındığında ülkenin artan enerji talebinin bu kaynaklardan karşılanması mevcut şartlar altında olası değildir.



Şekil 5.1. 2018 Yılı Türkiye birincil enerji talep ve üretiminin kaynak dağılımı (Mtep).
(IEA, 2019a)

1990-2018 yılları arası Türkiye'nin enerji tüketimi 2,83 kat artarken, enerji üretimi sadece 1,66 kat artmıştır (Tablo 5.2). Birincil enerji üretim/tüketim miktarlarına bakıldığında zaman, Türkiye'nin mevcut enerji talebini karşılamada yerli üretimin yeterli seviyede olmadığı görülmektedir. Enerji tüketiminin karşılanabilmesi için geçmiş yıllarda olduğu gibi, 2018 yılında da petrol başta olmak üzere doğal gaz ve kömür ithalatı yapılmıştır. 2018 Türkiye enerji tüketiminin

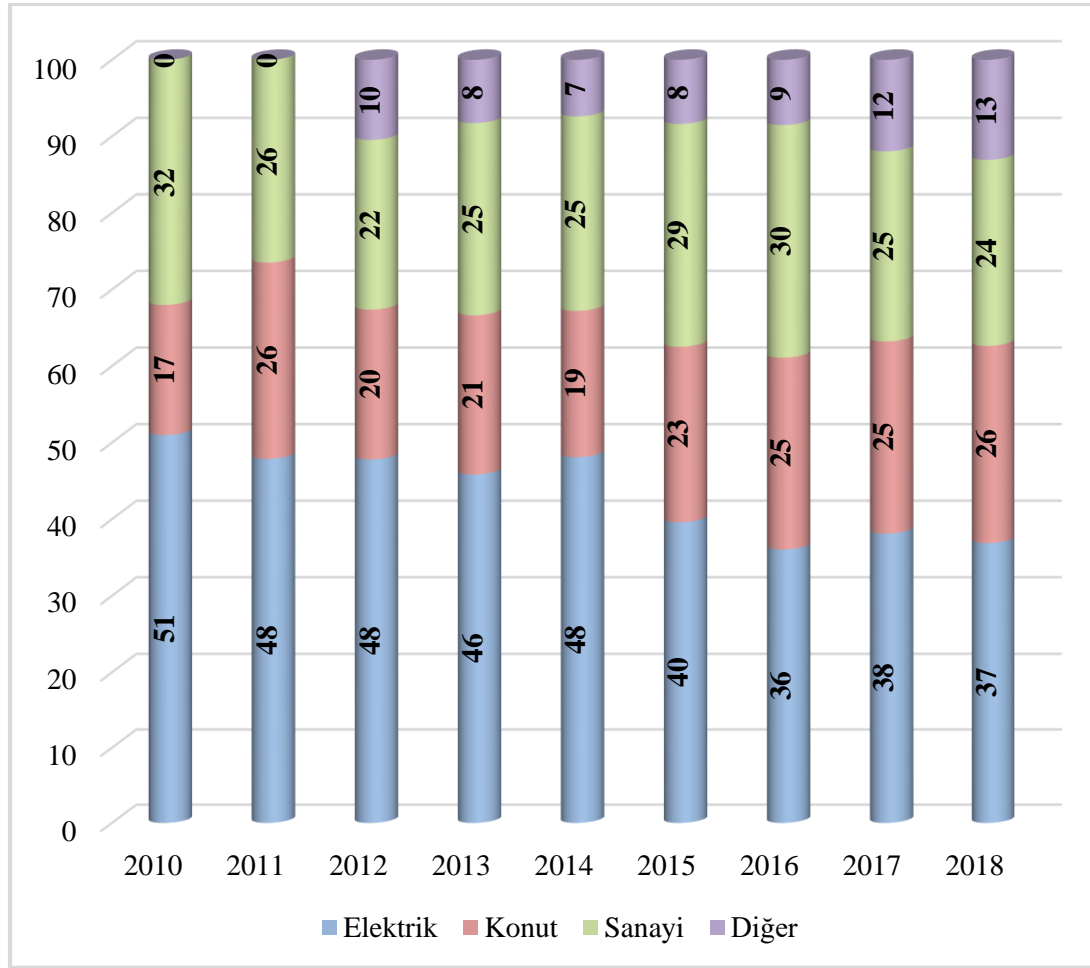
%28,31'i yerli üretimle karşılanırken %71,69'u ithalat ile karşılanabilmiştir. Diğer bir ifadeyle, enerji tüketiminin neredeyse dörtte üçü ithal edilen ve fosil kaynaklar olan petrol, doğal gaz ve kömürden sağlanmıştır. Enerji tüketiminde yüksek oranda fosil kaynakların kullanılması enerjide dışa bağımlılık sorununda beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, Türkiye, enerjisini dışarıdan satın alan ve enerjide dışa bağımlılık oranı yüksek olan enerji ithalatçısı ülke konumundadır. Şekil 5.2'den görüleceği üzere, Türkiye genel enerji açısından %71-72 oranında dışa bağımlı bir ülkedir (IEA, 2019a). Enerjide dışa bağımlılığın %70'in üstünde olması ve bu oranın ilerki zamanlarda artabileceği varsayımı ile yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi kaçınılmaz bir hal almıştır.



Şekil 5.2. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığı (%).
(IEA, 2019a)

Enerjide dışa bağımlılık oranının yıllar itibarıyla artmasında en önemli etken doğal gaz tüketimindeki artış olmuştur. İthal edilen doğal gazın büyük bir kısmı

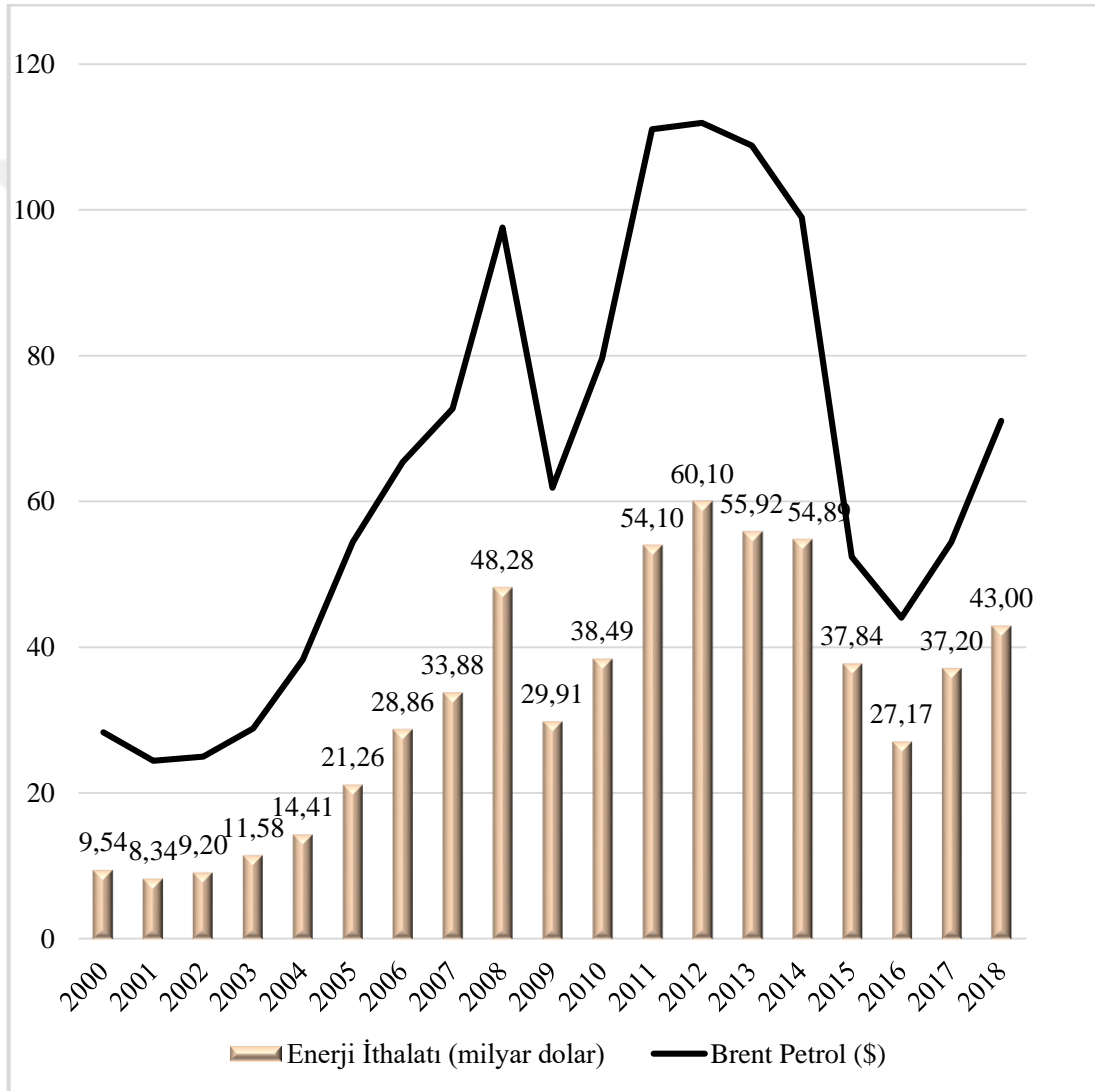
elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. 2018 yılı ulusal doğal gaz tüketiminin sektörel dağılımına bakıldığında; %36,89'unun elektrik enerjisi üretiminde, %25,75'inin konutlarda, %24,30'unun ise sanayi sektöründe tüketildiği görülmektedir (Şekil 5.3) (EPDK, 2010-2018).



Şekil 5.3. Doğal gaz kullanımının sektörel dağılımı (%) (2010-2018).
(EPDK, 2010-2018)

Enerji talebinin çoğunlukla fosil kaynaklardan temin edilmesi, Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığını artırmakta, dolayısıyla her yıl milyarlarca dolar harcanarak enerjinin ithal edilmesini zorunlu kılmaktadır. Türkiye'nin enerji ithalatı faturası genel olarak artış eğilimindedir. Enerji ithalat faturası, 2009 yılında yaşanan küresel krizin etkisiyle bir miktar düşüş göstermiş olsa da 2011 yılında, 2008 yılı seviyesinin üzerine tekrar çıkmıştır. 2015 ve 2016 yıllarında petrol fiyatlarında yaşanan düşüşün etkisiyle

enerji ithalat faturası tekrar gerilemiş olup, sonraki yıllarda petrol fiyatlarındaki yükselmeye bağlı olarak yeniden artış eğilimine girmiştir. Bu da bize petrol fiyatlarının enerji ithalatı faturasındaki değişimde etkili olduğunu göstermektedir. 2018 yılında 43 milyar dolarlık enerji ithalatı gerçekleşmiş olup, son 19 yılda enerji ithalatına ödenen toplam tutar ise 623,9 milyar dolardır. (Şekil 5.4) (IMF, 2019b; TÜİK, 2019a)



Şekil 5.4. Yıllar itibarıyla toplam enerji ithalat maliyeti (2000-2018).
(IMF, 2019b; TÜİK, 2019a)

Türkiye hızla büyüyen bir ekonomi iken, enerji kaynaklarında dışa bağımlılığının yüksek olması, yüksek miktarda dış ticaret açığı ve cari işlemler açığı

vermesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, küresel enerji fiyatlarında ve döviz kurlarında yaşanan herbir gelişme ülkenin enerji faturasına ve dış finansman ihtiyacına doğrudan yansırken, Türk finansal varlıkları üzerinde de ilave bir baskı oluşturmaktadır. Bundan dolayı, Türkiye enerjide bağımlılığını azaltmak için milli kaynaklara yönelirken aynı zamanda da yerli teknolojiye dönük yatırımların önünü açmaya çalışmaktadır. Kalkınma hedefleri doğrultusunda enerji ihtiyacını karşılamak üzere son 30 yılda sadece Kamu-Özel Sektör İşbirliği kapsamında yapılan sözleşme tutarı 28,8 milyar dolar olup, gerçekleşen yatırım bedeli ise 9,4 milyar dolardır. Yapılan yatırımlar, ülkenin kurulu enerji kapasitesini artırsa da dışa bağımlılığın azaltılması konusunda henüz sınırlı pozitif etkisi olmuştur (KPMG, 2019: 8-10).

Enerji talep tahminlerinin doğru bir şekilde yapılması ülke enerji politikalarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Nüfus artış hızı, büyüme oranı, teknolojik gelişmeler, enerji fiyatları, tüketici davranışları, enerji verimliliğine yönelik politikalar, ülke ve dünya gündemindeki gelişmeler ileriye dönük enerji tahminlerinin yapılmasında göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerdir. On Birinci Kalkınma Planı'na (2019-2023) göre, 2023 yılında Türkiye nüfusunun 86,5 milyona, cari GSYH'nin 1.080 milyar dolara, birincil enerji tüketiminin ise 174.279 Btep'e yükselmesi beklenmektedir. Gelişmekte olan ekonomisiyle enerji talebinde dünyada üst sıralarda yer alan Türkiye, enerjisini yüksek oranda ithalat yoluyla karşılıyor olması ise, enerji arz güvenliği açısından ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Ayrıca ithalat yoluyla enerji talebinin sağlanıyor olması sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmesi gereken bir konudur. Türkiye'nin petrol ve doğal gaz rezervleri oldukça yetersizdir. Kömür rezervi bu kaynaklara göre kısmen fazla olsa da düşük kaliteli, yüksek üretim maliyetli ve çevre sorunlu olması gibi dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Enerji arz güvenliği için, doğal gaz gibi tek bir kaynağa bağımlı kalınmaması, mevcut kaynakların daha da çeşitlendirilmesi ve yerli üretim payının daha da artırılması gerekmektedir. Enerji arz güvenliğinin sağlanması, dış ticaret açığının düşürülmesi ve enerji kaynaklı emisyonların azaltılması açısından, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelini daha etkin bir biçimde kullanmasının önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'nin artan enerji ihtiyacını karşılamada yenilenebilir kaynaklar içerisinde yüksek bir potansiyel sunan güneş enerjisinin değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bir sonraki başlıkta,

Türkiye'nin güneş enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretimini ortaya koymak için elektrik sektörünün mevcut durumu incelenmiştir.

5.2. Türkiye Elektrik Sektörünün Genel Durumu

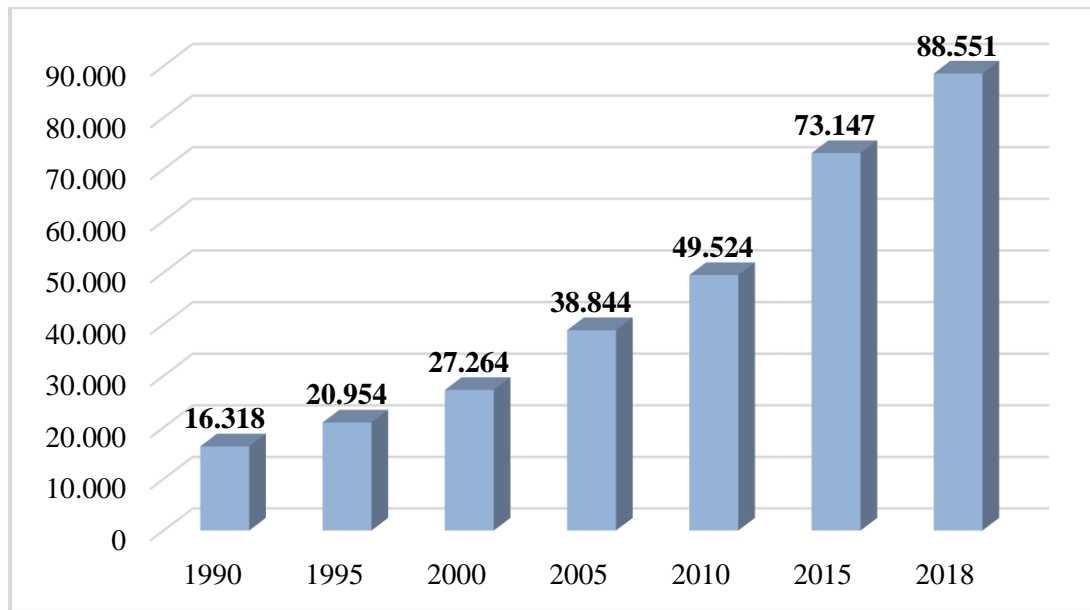
Endüstriyel gelişmeler, artan nüfus oranı ve bu etkenlere bağlı ekonomik gelişmeler Türkiye'de elektrik enerjisine olan talebin zamanla giderek artmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, ülke kalkınmasında önemli bir rolü bulunan elektrik enerjisinin yıllar itibarıyla hem kurulu gücünde hem de üretim miktarında kayda değer bir artış görülmektedir. 1990 yılından bu yana Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketim miktarı yıllık ortalama %6,28 oranında artmış ve 1990 yılında 56,8 milyar kWh olan tüketim miktarı, 2018 yılında yaklaşık 5,4 katına çıkarak 304,2 milyar kWh'e ulaşmıştır. Son yıllarda, elektrik enerjisinde görülen talep artışları kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketim miktarını da yükseltmiştir. Tablo 5.3'de görüldüğü üzere, kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketim miktarı 3,8 kat artarak 829 kWh'dan, 3.108 kWh'te yükselmiştir (TEİAŞ, 2019). 2018 yılı içerisinde üretilen elektrik enerjisi miktarı yaklaşık 26,2 Mtep'dir. Bu değer, Türkiye birincil enerji tüketiminin yaklaşık %18'ine tekabül etmektedir.

<i>Yıl</i>	<i>Üretim (GWh)</i>	<i>İthalat (GWh)</i>	<i>İhracat (GWh)</i>	<i>Tüketim (GWh)</i>	<i>Kişi Başına Net Tüketim (kWh)</i>	<i>Üretim (Mtep)</i>	<i>Birincil Enerji Tüketimindeki Pay</i>
1990	57.543	176	907	56.812	829	4,9	%9,6
1995	86.247	0	696	85.552	1.227	7,4	%12,2
2000	124.922	3.791	437	128.276	1.449	10,7	%14,1
2005	161.956	636	1.798	160.794	2.014	13,9	%16,6
2010	211.208	1.144	1.918	210.434	2.334	18,2	%17,2
2015	261.783	7.136	3.194	265.724	2.760	22,5	%17,5
2018	304.802	2.477	3.112	304.167	3.108	26,2	%18,0

Tablo 5.3. Türkiye elektrik enerjisi görünümü (1990-2018).

(TEİAŞ, 2019) [Üretim (Mtep) ve Birincil Enerji Tüketimindeki Pay değerleri araştırmacı tarafından hesaplanmıştır.]

Şekil 5.5’den görüleceği üzere, artan elektrik enerjisi talebini karşılayabilmek amacıyla elektrik enerjisi üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının toplam kurulu gücü 1990 yılında 16.318 MW iken, bu rakam yaklaşık 5,4 katına çıkarak, 72.233 MW artışla, 2018 yılı sonu itibarıyla 88.551 MW’a ulaşmıştır (TEİAŞ, 2019). Özellikle, 2001 yılında çıkarılan “4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu” ile serbestleşme yolunda önemli bir adımın atılmış olması ve elektrik enerjisine olan talep artışının yüksek olması sebebiyle özel sektör tarafından yapılan yatırımlarda ciddi atılımlar olmuştur.



Şekil 5.5. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü gelişimi (MW) (1990-2018).
(TEİAŞ, 2019)

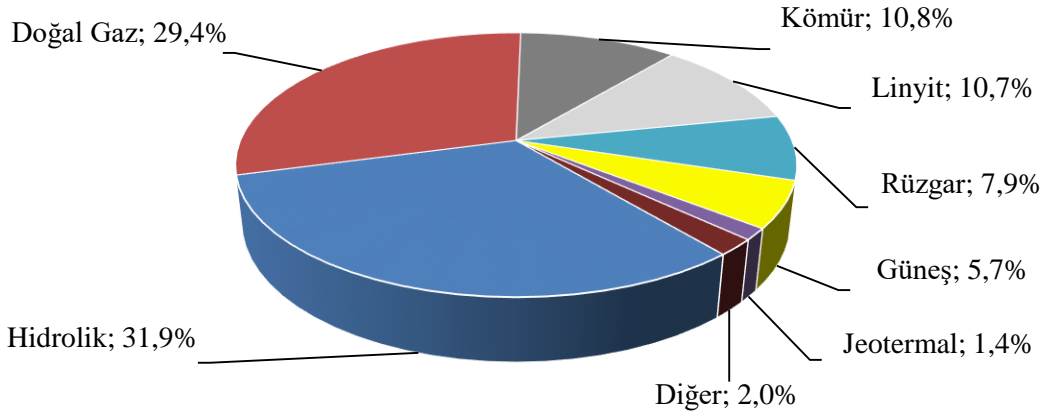
Türkiye elektrik enerjisi toplam kurulu gücünün kaynaklara göre gelişimi incelendiğinde, tüm kaynaklarda miktar bakımından artış olduğu ancak toplam kurulu güç içerisinde kaynak paylarının zamanla değişiklik gösterdiği görülmektedir. 1990 yılından 2018 yılına kadar olan dönemde doğal gaz dayalı kurulu güç kapasitesi diğer kaynaklara kıyasla daha fazla artış göstermiş olsa da enerji planlamasında izlenen politikalar çerçevesinde, arz güvenliğinin sağlanması, dışa bağımlılığın azaltılması, kaynak portföyünün çeşitlendirilmesi amacıyla elektrik enerjisi üretiminde yerli kaynak kullanımının artırılması hedefi doğrultusunda, doğal gaz payı son zamanlarda azalmaktadır. Hidroelektrik santrallerin kurulumunda büyük bir aşama kaydedilmesi

ve de yenilenebilir enerji teşvikleri sayesinde, güneş ve rüzgâr santrallerin kurulu güç miktarlarının artması sonucunda yenilenebilir enerjinin toplam kurulu güç içerisindeki payı her geçen gün artarken, termik kaynakların payı ise azalmaktadır. Tablo 5.4’de de görüldüğü gibi, 2015-2018 yılları arasında Güneş Enerji Santralleri (GES) ve Rüzgâr Enerji Santralleri’nin (RES) kurulu güç kapasitelerinde büyük değişimlerin yaşandığı ancak diğer üretim kaynaklarının kurulu güç kapasitelerinde büyük oranda bir artış olmadığı görülmektedir (TEİAŞ, 2019).

<i>Kaynak</i>	<i>MW, %</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2018</i>
<i>Kömür</i>	<i>K.Güç</i>	332	326	480	1.986	3.751	6.825	9.576
	<i>Pay</i>	%2,0	%1,6	%1,8	%5,1	%7,6	%9,3	%10,8
<i>Linyit</i>	<i>K.Güç</i>	4.874	6.048	6.509	7.131	8.199	8.696	9.456
	<i>Pay</i>	%29,9	%28,9	%23,9	%18,4	%16,6	%11,9	%10,7
<i>Doğal Gaz</i>	<i>K.Güç</i>	2.210	2.925	7.044	13.790	18.175	24.906	26.070
	<i>Pay</i>	%13,5	%14,0	%25,8	%35,5	%36,7	%34,0	%29,4
<i>Hidrolik</i>	<i>K.Güç</i>	6.764	9.863	11.175	12.906	15.831	25.868	28.291
	<i>Pay</i>	%41,5	%47,1	%41,0	%33,2	%32,0	%35,4	%31,9
<i>Jeotermal</i>	<i>K.Güç</i>	18	18	18	15	94	624	1.283
	<i>Pay</i>	%0,1	%0,1	%0,1	%0,0	%0,2	%0,9	%1,4
<i>Rüzgâr</i>	<i>K.Güç</i>	-	-	19	20	1.320	4.503	7.005
	<i>Pay</i>	-	-	%0,1	%0,1	%2,7	%6,2	%7,9
<i>Güneş</i>	<i>K.Güç</i>	-	-	-	-	-	249	5.063
	<i>Pay</i>	-	-	-	-	-	%0,3	%5,7
<i>Diğer</i>	<i>K.Güç</i>	2.120	1.774	2.019	2.996	2.154	1.476	1.807
	<i>Pay</i>	%13,0	%8,5	%7,4	%7,7	%4,3	%2,0	%2,0
<i>Termik</i>	<i>K.Güç</i>	9.536	11.059	16.028	25.868	32.172	41.533	46.090
	<i>Pay</i>	%58,4	%52,8	%58,8	%66,6	%65,0	%56,8	%52,0
<i>Yenilenebilir</i>	<i>K.Güç</i>	6.782	9.895	11.236	12.976	17.352	31.614	42.461
	<i>Pay</i>	%41,6	%47,2	%41,2	%33,4	%35,0	%43,2	%48,0
<i>Toplam Kurulu Güç</i>		16.318	20.954	27.264	38.844	49.524	73.147	88.551

Tablo 5.4. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (1990-2018).
(TEİAŞ, 2019)

2018 yılı sonu itibarıyla elektrik enerjisi kurulu gücü içerisinde %31,9’luk pay ile hidrolik kaynaklar ilk sırada yer alırken bunu sırasıyla doğal gaz (%29,4), kömür (%10,8), linyit (%10,7), rüzgâr (%7,9), güneş (%5,7), jeotermal (%1,4) ve %2’lik pay ile diğer kaynaklar (biyoyakıt, LPG, nafta, fuel-oil v.s.) izlemektedir (Şekil 5.6) (TEİAŞ, 2019).



Şekil 5.6. 2018 Yılı Türkiye elektrik enerjisi kurulu güç dağılımı (%).
(TEİAŞ, 2019)

1990-2018 yılları arasında elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla birlikte elektrik enerjisi üretimi de artmıştır. 29 Yıllık zaman dilimi içerisinde elektrik enerjisi kurulu güç kapasitesi 88.551 MW ulaşırken, elektrik enerjisi üretiminde 57,5 milyar kWh'den 304,8 milyar kWh'a yükselerek 5,3 kat artmıştır. Türkiye elektrik enerjisinin büyük bir bölümünü fosil yakıtlardan üretmektedir. Toplam elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımına bakıldığında fosil yakıtlar olan doğal gaz ve kömür kaynaklarının üstünlüğü öne çıkmaktadır. Bu kaynakların ardından ise, hidrolik kaynaklar gelmektedir. Yenilenebilir enerji teşvikleri sayesinde güneş, rüzgâr ve jeotermal kaynaklarının elektrik üretimine olan katkıları ise gün geçtikçe artmaktadır.

Artan elektrik enerjisi talebini karşılayabilmek için doğal gaz santrallerine ağırlık verilmiş olması toplam elektrik enerjisi üretimi içerisinde doğal gaz payının yıllar itibarıyla artmasına neden olmuştur. Ayrıca, kurulum maliyetinin düşük olması, hizmete girme süresinin kısalığı ve hazine tarafından üretilen elektriğe alım garantisinin verilmesi de doğal gaz payının sürekli olarak artmasında etkili olmuştur. Nitekim tüm bu faktörler sonucunda doğal gazın üretimdeki payı %49,7'ye (2008 yılı) kadar yükselmiştir. Elektrik üretiminde doğal gazın yüksek olması ve doğal gazın tamamına yakın kısmının ithalat yoluyla tedarik ediliyor olması arz güvenliği açısından en büyük risk unsurunu oluşturmaktadır. Bu bağlamda birkaç kaynağa bağımlı kalınmaması için geliştirilen politikalar çerçevesinde yenilenebilir ve yerli kaynakların üretim içerisindeki paylarının artırılarak doğal gazın üretimdeki payının azaltılması hedeflenmiştir. Son zamanlarda, elektrik enerjisi üretiminde yerli ve milli

kaynaklara öncelik verilmesi neticesinde doğal gazın üretimdeki payı % 30'lara gerilemiş olsa da elektrik arzında doğal gaza olan bağımlılık hâlâ devam etmektedir.

Hidrolik santraller, kurulu gücün yaklaşık olarak üçte birini oluşturuyor olmasına karşın elektrik enerjisi üretim miktarı istikrarsız bir seyir izlemektedir. Barajlardaki su seviyelerine ve mevsimsel yağışlara bağlı olarak hidrolik santrallerin elektrik enerjisi üretimine olan katkıları değişmektedir. Mevsimsel yağışların çok olduğu zamanlarda hidrolik santrallerin katkısı artarken yağışların az olduğu kurak zamanlarda ise hidrolik santrallerin katkısı düşmektedir.

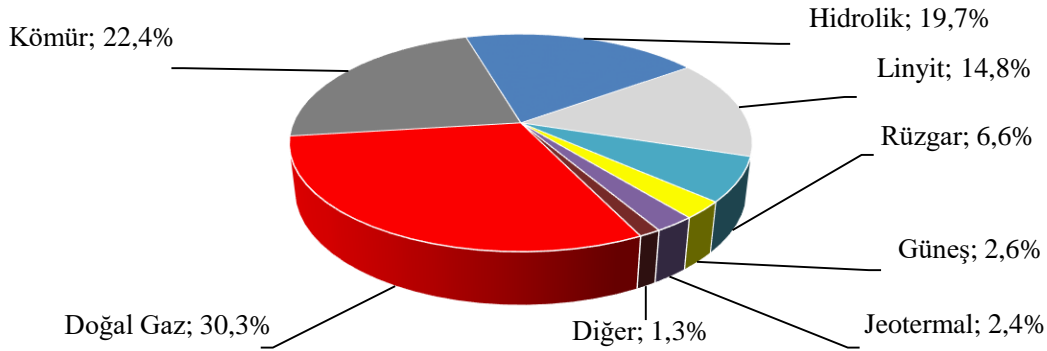
Rüzgâr ve güneş enerjisindeki gelişmelere bağlı olarak hidro hariç yenilenebilir enerji miktarında da ciddi artış olmuştur. 2005 yılında rüzgâr ve jeotermal santrallerinden üretilen elektrik enerjisi miktarı 0,2 TWh iken 2015 yılı itibarıyla güneş enerjisi santrallerinde dahil olmasıyla bu değer 35,2 TWh düzeyine ulaşmıştır. Tablo 5.5'de, 1990-2018 yılları arası Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre üretim miktarları ile sağladıkları katkı payları gösterilmiştir (TEİAŞ, 2019).

<i>Kaynak</i>	<i>TWh, %</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010</i>	<i>2015</i>	<i>2018</i>
<i>Kömür</i>	<i>Üretim</i>	0,6	2,2	3,8	13,2	19,1	44,8	68,2
	<i>Pay</i>	%1,1	%2,6	%3,1	%8,1	%9,1	%17,1	%22,4
<i>Linyit</i>	<i>Üretim</i>	19,6	25,8	34,4	29,9	35,9	31,3	45,1
	<i>Pay</i>	%34,0	%29,9	%27,5	%18,5	%17,0	%12,0	%14,8
<i>Doğal Gaz</i>	<i>Üretim</i>	10,2	16,6	46,2	73,4	98,1	99,2	92,5
	<i>Pay</i>	%17,7	%19,2	%37,0	%45,3	%46,5	%37,9	%30,3
<i>Hidrolik</i>	<i>Üretim</i>	23,1	35,5	30,9	39,6	51,8	67,1	59,9
	<i>Pay</i>	%40,2	%41,2	%24,7	%24,4	%24,5	%25,6	%19,7
<i>Jeotermal</i>	<i>Üretim</i>	0,1	0,1	0,07	0,1	0,7	3,4	7,4
	<i>Pay</i>	%0,2	%0,1	%0,1	%0,1	%0,3	%1,3	%2,4
<i>Rüzgâr</i>	<i>Üretim</i>	-	-	0,03	0,1	2,9	11,7	20,0
	<i>Pay</i>	-	-	%0,0	%0,1	%1,4	%4,5	%6,6
<i>Güneş</i>	<i>Üretim</i>	-	-	-	-	-	0,2	7,8
	<i>Pay</i>	-	-	-	-	-	%0,1	%2,6
<i>Diğer</i>	<i>Üretim</i>	3,9	6,0	9,5	5,7	2,7	4,1	3,9
	<i>Pay</i>	%6,8	%7,0	%7,6	%3,5	%1,2	%1,5	%1,2
<i>Termik</i>	<i>Üretim</i>	34,3	50,6	93,7	122,2	155,5	178,0	207,0
	<i>Pay</i>	%59,6	%58,7	%75,2	%75,4	%73,8	%68,5	%68,8
<i>Yenilenebilir</i>	<i>Üretim</i>	23,2	35,6	31,2	39,8	55,7	83,8	97,8
	<i>Pay</i>	%40,4	%41,3	%24,8	%24,6	%26,2	%31,4	%31,2
<i>Toplam Üretim</i>		57,5	86,2	124,9	162,0	211,2	261,8	304,8

Tablo 5.5. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (1990-2018).

(TEİAŞ, 2019)

2018 yılı sonu itibarıyla 304,8 milyar kWh elektrik enerjisi üretiminin, %30,3'ü doğal gaz santrallerinden, %22,4'ü kömür santrallerinden, %19,7'si hidrolik santrallerinden, %14,8'i linyit santrallerinden, %6,6'sı rüzgâr santrallerinden, %2,6'sı güneş santrallerinden, %2,4'ü jeotermal santrallerinden ve %1,2'si diğer santrallerden (biyoyakıt, LPG, nafta, fuel-oil v.s.) sağlanmıştır (Şekil 5.7) (TEİAŞ, 2019).



Şekil 5.7. 2018 Yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (%). (TEİAŞ, 2019)

Tablo 5.6'da elektrik enerjisi tüketiminin sektörel dağılımı verilmiştir. Tüketici grupları arasında en çok elektrik enerjisi tüketimi sanayi sektöründe olmaktadır. 2017 yılı net elektrik enerjisi tüketiminin %46,8'i sanayi sektöründe tüketilirken %21,8' konutlarda, %19,8'i ise ticarethanelerde tüketilmiştir (TÜİK, 2019c).

Yıl	Mesken	Ticarethane	Resmi Daire	Sanayi	Aydınlatma	Diğer
1990	19,6	5,5	3,1	62,4	2,6	6,8
1995	21,5	6,2	4,5	56,4	4,6	6,8
2000	24,3	9,5	4,2	49,7	4,6	7,7
2005	23,7	14,2	3,6	47,8	3,2	7,5
2010	24,1	16,1	4,1	46,1	2,2	7,4
2015	22,0	19,1	3,7	47,6	1,9	5,7
2017	21,8	19,8	4,1	46,8	1,8	5,7

Tablo 5.6. Türkiye elektrik enerjisi tüketiminin sektörel dağılımı (%) (1990-2017). (TÜİK, 2019c)

Elektrik enerjisinin, tüketileceği anda üretilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ne kadar elektrik enerjisi üretileceğini belirleyen temel unsur talep miktarıdır. Kurulu güç kapasitesinin ancak talep kadar olan miktarı enerjiye dönüşeceği için kapasitenin bir kısmı da üretime hazır ama üretim yapılmadan yedek olarak bekleyecektir. Talebi karşılamak için santraller emre amade durumlarına göre üretim yapmaktadırlar. Planlı bakımlar, arıza olasılıkları, güneş ve rüzgâr santralleri için günlük hava durumları, hidrolik santraller için hidrolik koşullar, termik santraller için yakıt temini ve kalitesi gibi santrallerin çalışma durumlarını etkileyen unsurlar emre amadeliğin değişkenlik göstermesine neden olmaktadır. Kurulu güç ile yıllık üretim miktarı mevcut kapasitenin kullanımı hakkında bir fikir vermektedir. Santralin bir yıl içinde gerçekleştirdiği toplam elektrik enerjisi üretiminin, tam kapasitede çalıştığı varsayılarak hesaplanan teorik enerji değerine oranı ile bulunan yüzdelik orana “*kapasite faktörü*” denilmektedir (TEİAŞ, 2012: 15). Tablo 5.7’de TEİAŞ tarafından sağlanan veriler ile Türkiye elektrik enerjisi üretiminde kaynakların kapasite faktörü hesaplanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin 2018 yılı küresel kapasite faktörü minimum %12, maksimum %27 olmak üzere ağırlıklı ortalaması %18 düzeyinde seyretmiştir (IRENA, 2019a: 22). Türkiye’nin 2018 yılı fotovoltaik sistemler kapasite faktörü ise %18 olup küresel ortalama seviyesindedir.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Kömür	21	77	90	76	58	75	81
Linyit	46	49	60	48	50	41	54
Doğal Gaz	53	65	75	61	62	45	41
Hidrolik	39	41	32	35	37	30	24
Jeotermal	63	63	44	76	85	62	66
Rüzgâr	-	-	18	57	25	30	33
Güneş	-	-	-	-	-	9	18

Tablo 5.7. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde kaynakların kapasite faktörü değişimi (%).

[Kapasite faktörü (TEİAŞ, 2019) verilerinden yararlanılarak araştırmacı tarafından hesaplanmıştır.]

Nüfus, hane halkı sayısı, ulaştırma sektörünün elektrik tüketimine katkısı, iç tüketim ve şebeke kayıpları, verimlilik ve ekonomik gelişmeler göz önüne alınarak yapılan projeksiyon çalışmalarına göre önümüzdeki yıllarda elektrik enerjisine olan

talebin artmaya devam edeceği tahmin edilmektedir. ETKB'nin 2019-2028 dönemini kapsayan elektrik enerjisi talep projeksiyonu raporuna göre elektrik talebinin 2039 yılında; Düşük Talep Senaryosunda yıllık ortalama %2,90 artış oranıyla 556,3 TWh'e, Referans Talep Senaryosunda yıllık ortalama %3,36 artış oranıyla 613,4 TWh'e, Yüksek Talep Senaryosunda ise yıllık ortalama %3,84 artış oranıyla 679,9 TWh'e çıkacağı hesap edilmiştir (Tablo 5.8) (ETKB, 2019a: 2).

<i>Yıllar</i>	<i>Düşük Talep Senaryosu (TWh)</i>	<i>Referans Talep Senaryosu (TWh)</i>	<i>Yüksek Talep Senaryosu (TWh)</i>	<i>Düşük Talep Senaryosu Değişim</i>	<i>Referans Talep Senaryosu Değişim</i>	<i>Yüksek Talep Senaryosu Değişim</i>
2019	313,8	315,2	316,5	-	-	-
2020	327,3	329,6	332,1	%4,3	%4,6	%4,9
2021	340,5	344,4	348,7	%4,0	%4,5	%5,0
2022	353,2	359,6	366,4	%3,7	%4,4	%5,1
2023	366,8	375,8	385,2	%3,8	%4,5	%5,1
2024	380,4	392,1	404,3	%3,7	%4,3	%5,0
2025	392,6	406,9	422,3	%3,2	%3,8	%4,5
2026	404,6	421,8	440,7	%3,1	%3,6	%4,3
2027	416,6	436,6	458,9	%3,0	%3,5	%4,1
2028	428,8	451,7	477,6	%2,9	%3,5	%4,1
2029	441,0	466,8	496,6	%2,9	%3,3	%4,0
2030	453,0	481,7	515,4	%2,7	%3,2	%3,8
2031	464,6	496,7	534,0	%2,6	%3,1	%3,6
2032	476,3	511,6	552,9	%2,5	%3,0	%3,5
2033	487,8	526,4	571,6	%2,4	%2,9	%3,4
2034	499,3	541,0	590,2	%2,3	%2,8	%3,3
2035	510,8	555,7	608,5	%2,3	%2,7	%3,1
2036	522,7	570,8	627,0	%2,3	%2,7	%3,1
2037	534,0	585,3	644,9	%2,2	%2,5	%2,9
2038	545,1	599,4	662,5	%2,1	%2,4	%2,7
2039	556,3	613,4	679,9	%2,1	%2,3	%2,6

Tablo 5.8. Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu (2019-2039).

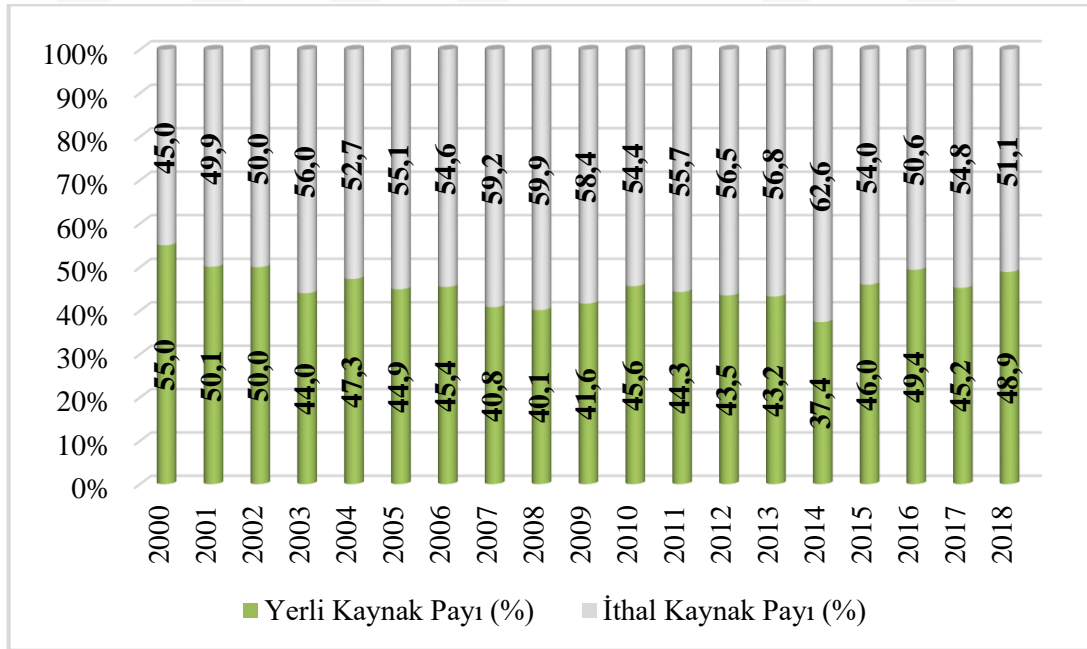
(ETKB, 2019a: 2)

2019-2023 dönemini kapsayan *On Birinci Kalkınma Planı*'na göre, elektrik enerjisi talebinin 2023 yılında 375,8 TWh'te ulaşması öngörülmektedir. Buna göre 2023 enerji sektörü hedefleri doğrultusunda toplam kurulu güç kapasitesinin 109.474 MW'a çıkarılması, doğal gazın elektrik enerjisi üretimindeki payının %20,7'ye düşürülmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimindeki payının %38,8 seviyesine çıkarılması ve yerli kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi

miktarının 219,5 TWh'te yükseltilerek sürekli, kaliteli, sürdürülebilir ve güvenli enerji arzının sağlanması hedeflenmiştir.

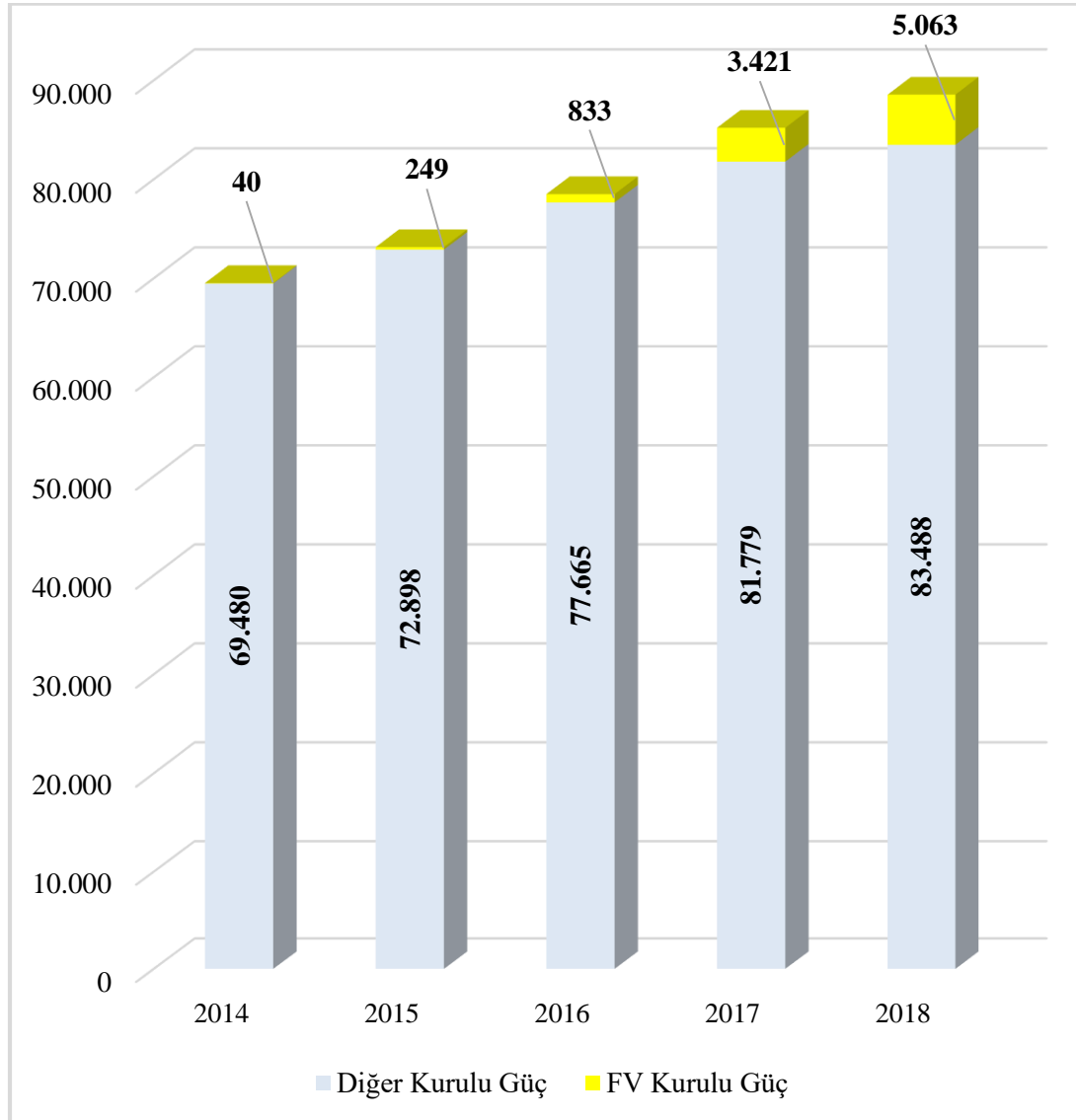
5.3. Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminde Fotovoltaik Sistemlerin Yeri

2018 yılı toplam elektrik enerjisi üretiminin %48,9'u yerli kaynaklardan, %51,1'lik kısmı ise ithal kaynaklardan üretilmiştir (Şekil 5.8) (TEİAŞ, 2019). Şekil 5.9'da da görüldüğü üzere, Türkiye elektrik enerjisi üretiminde %50 civarında dışa bağımlıdır. Elektrik enerjisine olan talep artışı ile birlikte ilerleyen dönemlerde bu oranın daha da artabileceği varsayımıyla elektrik enerjisi üretiminde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Türkiye'de en az 500 GW potansiyeli olan ve henüz yeterli düzeyde kullanılmayan güneş enerjisi ise en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır (Solar Power Europe, 2019: 71). Bu doğrultuda, yenilenebilir ve çevre dostu olan güneş enerjisinin, elektrik enerjisi üretimindeki payının artırılması Türkiye'nin artan enerji ihtiyacının karşılanması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 5.8. Türkiye elektrik enerjisi üretiminde yerli ve ithal kaynakların payı (%) (2000-2018). (TEİAŞ, 2019)

Güneş enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretim teknolojileri içerisinde en çok tercih edilen yöntem olan fotovoltaik teknoloji, Türkiye’de ilk kez 2014 yılında kurulu güç pastası içerisinde yer almıştır (Kılıç, 2015: 29). 2014 yılında 40 MW kurulu güç kapasitesi bulunan fotovoltaik sistemlerin, 2018 yılı sonu itibarıyla kapasite miktarı 5.063 MW düzeyine ulaşarak toplam kurulu güç kapasitesinin %5,7’sini oluşturmuştur (Şekil 5.9) (TEİAŞ, 2019).



Şekil 5.9. Türkiye fotovoltaik kurulu güç kapasitesinin gelişimi (MW) (2014-2018).
(TEİAŞ, 2019)

Özellikle, son yıllarda sahip olduğumuz bu potansiyeli hayata geçirmek için önemli adımlar atılmıştır. 2017 yılında yaklaşık olarak 2.588 MW, 2018 yılında ise yaklaşık olarak 1.642 MW'lık yeni FV güç kapasitesi elektrik şebekesine dahil olmuştur. 2018 yılı içerisinde tüm elektrik enerjisi üretim teknolojileri arasında en fazla kapasite artışı FV sistemlerinde görülmüştür. Böylece, güneş, 2018'de en hızlı büyüyen elektrik enerjisi üretim kaynağı olmuştur (Tablo 5.9) (TEİAŞ, 2019).

	<i>Kurulu Kapasite (2017)</i>	<i>Kurulu Kapasite (2018)</i>	<i>Eklenen Kapasite (2017-2018)</i>	<i>Kapasite Artış Oranı</i>
<i>Termik Santraller</i>	46.926	46.909	-17	-%0,4
<i>Hidrolik Santraller</i>	27.273	28.291	1.018	%3,7
<i>Rüzgâr Santralleri</i>	6.516	7.005	489	%7,5
<i>FV Santraller</i>	3.421	5.063	1.642	%48,0
<i>Jeotermal Santraller</i>	1.064	1.283	219	%20,6
<i>Toplam</i>	85.200	88.551	3.351	%3,9

Tablo 5.9. 2018 Yılı kaynak bazında kurulu güç değişimi (MW).
(TEİAŞ, 2019)

5.3.1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli

Güneş enerjisi santrallerinin üretim performansı; tesisin bulunduğu sahadaki ışınım miktarı, sıcaklık, rüzgâr, güneşlenme süresi gibi verilerle doğrudan bağlantılı olup GES yatırım kararları için bu verilerin sağlıklı bir şekilde analiz edilmesi oldukça önemlidir. Türkiye bulunduğu coğrafi konum itibarıyla, yüksek ışıma oranına ve yüksek güneşlenme süresine sahip olup güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye nazaran daha şanslı durumdadır. Bu nedenle, Türkiye'nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Ülkenin güneş enerjisi potansiyelini araştırmak için ilk olarak mülga olan Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE), 1966 ile 1982 yılları arasında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından derlenen ışınım şiddeti ve güneşlenme süresi verilerini kullanarak bir çalışma yapmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, Türkiye'deki yıllık toplam güneşlenme süresinin 2.640 saat (günlük ortalama 7,2 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisinin ise 1.311 kWh/m².yıl (günlük ortalama 3,6

kWh/m².gün) olduğu rapor edilmiştir. Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini yansıtması açısından yeterli olmadığı görülerek DMİ ile işbirliği içinde güneş enerjisi potansiyelini belirlemek amacıyla yeni bir çalışma başlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında çeşitli illere gözlem istasyonları yerleştirilmiştir. Bu gözlem istasyonlarından alınan ölçümlerle beraber DMİ'nin 1971 ile 2000 yılları arasındaki verilerinin de kullanılmasıyla bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model ile 58 il için güneş ışınım şiddeti ve güneşlenme süreleri hesaplanarak 2001 yılında "*Türkiye'nin Güneş Işınımı ve Güneşlenme Süreleri*" adlı bir rapor yayımlanmıştır (EİGM, 2019b). Yapılan bu çalışmayla yıllık toplam güneşlenme süresinin 2.573 saat (günlük ortalama 7 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisinin ise 1.474 kWh/m².yıl (günlük ortalama 4 kWh/m².gün) olduğu tespit edilmiştir (Bavbek, 2015: 3-4).

Son olarak, 2010 yılında mülga olan EİE tarafından, 1986 ile 2005 yılları arasındaki veriler kullanılarak Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) yayımlanmıştır. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat (günlük ortalama 7,5 saat), ortalama yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1.527 kWh/m².yıl (günlük ortalama 4,18 kWh/m².gün) olduğu tespit edilmiştir (ETKB, 2019b).

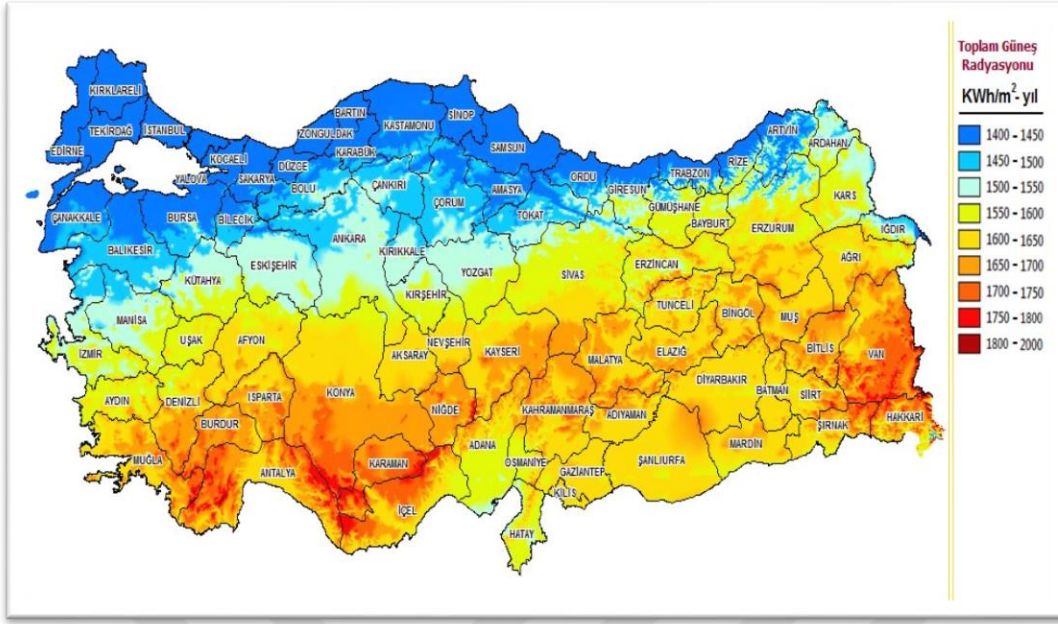
Tablo 5.10'da, Uluslararası Enerji Ajansı'nın Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı'na dahil olan ülkelerdeki ortalama güneş ışınım değerleri ile 2018 yılı FV elektrik üretim değerleri gösterilmiştir (IEA, 2019c: 7; IEA, 2019e: 86; TEİAŞ, 2019). Burada kWh/kWp birimi, 1 kWp gücündeki fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektrik enerjisini ifade etmektedir. Tabloda en dikkat çekici nokta, Almanya'nın ortalama güneş ışınım değerinin (978 kWh/kWp) dünya ortalamasının (1.300 kWh/kWp) çok altında olmasına rağmen izlemiş olduğu politikalar neticesinde elektrik enerjisi üretiminin %8,4'ünü fotovoltaik sistemlerden karşılayarak bu alanda öncü ülkelerden biri olmayı başarmış olmasıdır. Türkiye'nin ise elektrik enerjisi üretiminde sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelini henüz yeterli seviyede değerlendiremediği görülmektedir.

<i>Ülke</i>	<i>Ortalama Güneş Işınımı (kWh/kWp)</i>	<i>2018 Yılı FV Toplam Kapasite (MW)</i>	<i>2018 Yılı FV Elektrik Üretim (TWh)</i>	<i>2018 Yılı FV Elektrik Üretim Payı (%)</i>
<i>İsrail</i>	1.797	1.358	2,4	4,4
<i>Güney Afrika</i>	1.733	2.409	4,2	2,2
<i>Meksika</i>	1.708	4.103	7,0	2,6
<i>Şili</i>	1.699	2.371	4,0	5,5
<i>Avustralya</i>	1.531	10.953	16,8	6,5
<i>Tayland</i>	1.522	3.459	5,3	2,7
<i>Portekiz</i>	1.513	673	1,0	2,1
<i>İspanya</i>	1.508	5.659	8,5	3,5
<i>Türkiye</i>	1.471	5.063	7,8	2,6
<i>A.B.D</i>	1.437	62.200	89,8	2,3
<i>Kore</i>	1.416	8.099	11,5	2,0
<i>Malezya</i>	1.413	860	1,2	0,8
<i>İtalya</i>	1.376	20.107	27,7	9,2
<i>Çin</i>	1.305	176.100	228,8	3,6
<i>Japonya</i>	1.262	56.162	70,9	7,8
<i>Kanada</i>	1.243	3.095	3,8	0,8
<i>İsviçre</i>	1.173	2.177	2,6	4,3
<i>Fransa</i>	1.153	8.961	10,3	2,3
<i>Avusturya</i>	1.111	1.440	1,6	2,5
<i>Danimarka</i>	1.030	991	1,0	3,2
<i>Hollanda</i>	994	4.414	4,4	3,9
<i>Almanya</i>	978	45.452	44,4	8,4
<i>İsveç</i>	974	426	0,4	0,3
<i>Belçika</i>	962	4.338	4,2	5,0
<i>Finlandiya</i>	944	134	0,1	0,2
<i>Norveç</i>	882	67	0,1	0,0
<i>Dünya</i>	1.300	512.294	666,0	2,9

Tablo 5.10. Ülkelerin ortalama güneş ışınım değeri ve 2018 yılı FV elektrik üretimi.

(IEA, 2019c: 7; IEA, 2019e: 86; TEİAŞ, 2019)

Türkiye genelinde tüm il ve ilçelere ait ortalama güneş ışınım ve günlük güneşlenme süresi değerlerine Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) GEPA portalı üzerinden online olarak erişmek mümkündür (Şekil 5.10) (EİGM, 2019c).



Şekil 5.10. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA).
(EİGM, 2019c)

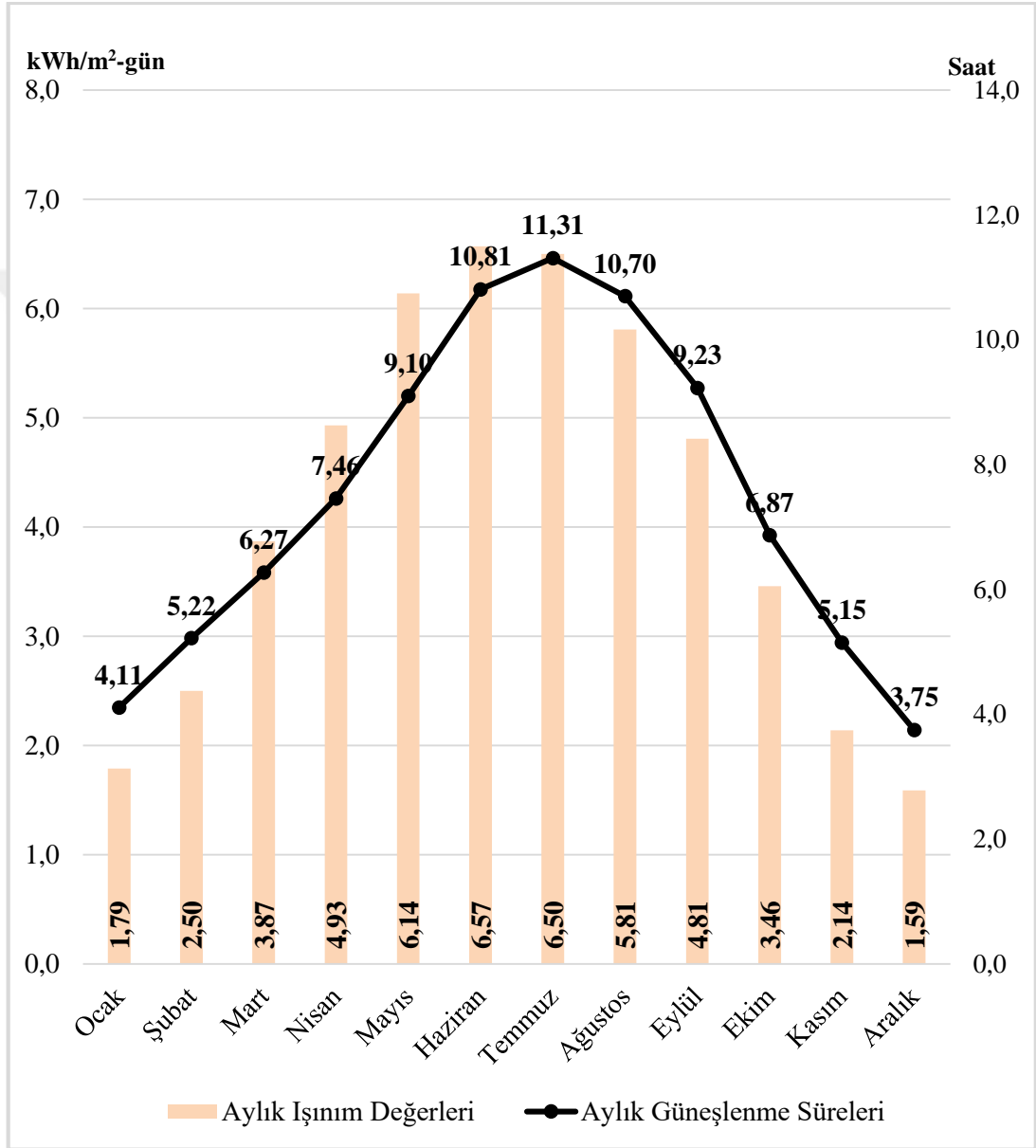
Şekilde görüleceği üzere, güneyden kuzeye doğru gidildikçe güneş ışınım miktarı azalmaktadır. Buna göre, en düşük güneş enerjisi potansiyelini 1.120 kWh/m²-yıl ile Karadeniz bölgesi gösterirken en yüksek güneş enerjisi potansiyelini 1.460 kWh/m²-yıl ile Güneydoğu Anadolu bölgesi göstermektedir. Akdeniz bölgesi 1.390 kWh/m²-yıl güneş enerjisi potansiyeli ile ikinci sırada yer almaktadır. Tablo 5.11’de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri gösterilmektedir (TÜBA, 2018: 17-18). Fotovoltaik sistem yatırımları için en ideal bölgelerin Güneydoğu Anadolu bölgesi ile Akdeniz Bölgesi olduğu görülmektedir.

	<i>Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m²-yıl)</i>	<i>Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)</i>
<i>Güneydoğu Anadolu Bölgesi</i>	1.460	2.993
<i>Akdeniz Bölgesi</i>	1.390	2.956
<i>Doğu Anadolu Bölgesi</i>	1.365	2.664
<i>İç Anadolu Bölgesi</i>	1.314	2.628
<i>Ege Bölgesi</i>	1.304	2.738
<i>Marmara Bölgesi</i>	1.168	2.409
<i>Karadeniz Bölgesi</i>	1.120	1.971

Tablo 5.11. Bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri.

(TÜBA, 2018: 17-18)

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri bölgelere göre değişiklik gösterdiği gibi aylara göre de değişiklik göstermektedir. Haziran ve Temmuz ayları güneş ışınımının en yüksek olduğu aylar iken, Ocak ve Aralık ayları güneş ışınımının en düşük olduğu aylardır (Şekil 5.11) (EİGM, 2019c).



Şekil 5.11. Türkiye'nin aylık güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi.
(EİGM, 2019c)

Türkiye'nin güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim düzeyi, sahip olduğu potansiyeline oranla oldukça düşük seviyelerdedir. Yapılan tahminlere göre

Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu güç potansiyeli 56.000 MW, elektrik enerjisi üretim potansiyeli ise 380 TWh-yıl'dır (İLBANK, 2019). Bu veriler doğrultusunda, 2018 yılı sonunda işletmede olan güneş enerjisi santralleri ile kurulu güç potansiyelinin %9 oranında, potansiyel elektrik üretiminin ise yüzde %2 oranında değerlendirildiği görülmektedir. Tablo 5.12'de ETKB ve EİGM verilerine göre, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş (İLBANK, 2019), hidroelektrik (EİGM, 2019d) ve rüzgâr (ETKB, 2019c) enerjisinin hesaplanmış olan potansiyelleri ve 2018 yılı sonu itibarıyla kurulu güç miktarları gösterilmektedir.

<i>Enerji Kaynakları</i>	<i>Hesaplanan Toplam Kurulu Güç Potansiyeli (MW)</i>	<i>2018 Yılı Sonu Kurulu Güç Miktarı (MW)</i>	<i>Kurulu Gücün Potansiyel Güce Oranı</i>
<i>Güneş</i>	56.000	5.063	%9,04
<i>Hidroelektrik</i>	36.000	28.291	%78,59
<i>Rüzgâr</i>	48.000	4.503	%9,38

Tablo 5.12. Türkiye güneş, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi potansiyeli.
(ETKB, 2019c; EİGM, 2019d; İLBANK, 2019)

Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneş ışınım miktarının 1.527 kWh/m².yıl olduğu varsayımı ile kaba bir hesap yapıldığında, 2018 yılı 304.167 GWh olan elektrik enerjisi üretiminin tamamının toplamda 1.328 km²'lik bir alana yayılacak %15 verimli güneş enerjisi panelleriyle üretilmesi teorik olarak mümkün olabilmektedir. Bu alan, 783.562 km² olan Türkiye yüz ölçümünün yaklaşık olarak %0,17'sine denk gelmektedir (Sabah, 2015: 94).

$$1.527 \text{ (kWh/m}^2\text{.yıl)} \times \text{Panel Alanı} \times 0,15 = 304.167 \text{ (GWh/yıl)} \times 10^6 \text{ (kWh/GWh)}$$

$$\begin{aligned} \text{Panel Alanı} &= \sim 1.328 \times 10^6 \text{ m}^2 \\ &= \sim 1.328 \text{ km}^2 \end{aligned}$$

2.400 MW kurulu güç kapasitesiyle yıllık 8,9 TWh elektrik enerjisi üretim kapasitesine sahip olan Atatürk barajının göl alanı 817 km²'dir (DSİ, 2019). Yaklaşık

iki Atatürk Barajı büyüklüğünde bir alanı güneş panelleriyle kaplayak yıllık 304 TWh'lik elektrik enerjisini teorik olarak FV sistemlerden üretmek mümkündür.

5.3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisine Yönelik Politikalar

Ülkemizde güneş enerjisi, 2014 yılına kadar sanayide ve konutlarda sıcak su elde etmek ve park bahçe aydınlatması gibi küçük elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktaydı. Bu yıldan itibaren önemli fırsatlar sunan güneş enerjisinden daha fazla yararlanabilmek için önemli adımlar atılmaya başlanmıştır. Türkiye’nin sahip olduğu potansiyele karşı güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi noktasında hala yolun başında olduğu söylenebilir.

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının hikayesi ilk olarak, 2005 yılında YEK Kanunu olarak bilinen “5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunun” yürürlüğe girmesiyle başlamıştır. Bu Kanunun amacı; “yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir” şeklinde tanımlanmıştır. Bu yasada ücret muafiyetleri ve indirimler gibi küçük sübvansiyonların yanı sıra, bütün yenilenebilir enerji kaynakları için ana destek mekanizması olarak 5,5 Euro Cent/kWh fiyatıyla ilk kez alım garantisi (FIT) teşvik politikasının uygulanması olmuştur. FIT teşvik uygulaması kapsamında 2011 yılının sonuna kadar devreye girecek tesislerden üretilecek olan elektrik enerjisi için 7 yıl boyunca alım garantisi verilmiştir.

2007 tarihinde yayımlanan “5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu” ile yenilenebilir enerji kaynakları destek mekanizmasında (YEKDEM) değişiklikler yapılmıştır. Yapılan değişiklik ile satın alınacak elektrik enerjisi için uygulanacak olan fiyatın, 5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından az, 5,5 Euro Cent/kWh karşılığı Türk Lirasından ise fazla olamayacağı hususu getirilmiştir. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisans sahibi tüzel kişilere, serbest piyasada 5,5 Euro Cent/kWh sınırının üzerinde satış imkânı bulabilmeleri halinde bundan faydalanmalarına izin

verilmiştir. Ayrıca destekleme mekanizmasından yararlanma süresi 7 yıldan 10 yıla çıkarılmıştır (TBMM, 2019).

Bu teşvik mekanizması uygulandığı yıllarda alım garantili fiyatlar, hidrolik ve rüzgâr kaynaklarının kullanımı teşvik etmiş olsa da, üretim maliyetleri yüksek olan güneş enerjisi, jeotermal enerji ve biyokütleyle dayalı üretim tesisleri için yeterli değildi. Dolayısıyla, güneş enerjisi pazarında beklenen gelişme gerçekleşmemiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından istenen seviyede faydalanamaması ve kurulacak olan tesislerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması yeni bir YEKDEM mekanizmasının oluşturulması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, 2010 yılında, “6094 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun” ile YEK Kanununda önemli değişiklikler yapılarak yeni bir teşvik mekanizması uygulanmaya başlanmıştır. Söz konusu mekanizmada, kaynak türüne dayalı teşvik ile üretim tesislerinde kullanılacak yerli aksam için ilave teşvik olmak üzere iki çeşit destek sunulmaktadır.

1. Kaynak türüne dayalı teşvik (1 sayılı Cetvel)

Güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri için garantili satın alma fiyatı 13,3 cent/kWh olarak yürürlüğe girmiştir. 31.12.2020 tarihine kadar hizmete girmiş veya girecek olan YEKDEM’e tabi üretim tesisleri 10 yıl süre ile teşvik mekanizmasından yararlanacaktır. Tablo 5.13’de kaynak türüne dayalı üretimde tesis tipine göre teşvik fiyatları gösterilmiştir (EPDK, 2019).

<i>Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi</i>	<i>Uygulanacak Fiyatlar (ABD Doları cent/kWh)</i>
Hidroelektrik üretim tesisi	7,3
Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi	7,3
Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi	10,5
Biyokütleyle dayalı üretim tesisi (çöp gazı dahil)	13,3
Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	13,3

Tablo 5.13. Kaynak türüne dayalı üretimde tesis tipine göre teşvik fiyatları.

(EPDK, 2019)

2. Üretim tesislerinde kullanılacak yerli aksam için teşvik (II sayılı Cetvel)

Kaynak türüne göre sağlanan teşvik mekanizmasıyla birlikte üretim tesislerinde kullanılacak olan yerli aksamlar için de ilâve bir teşvik mekanizması oluşturulmuştur. Böylece, 31.12.2015 tarihine kadar hizmete girecek olan yenilenebilir enerji üretim tesislerinde yurt içinde imal edilmiş olan mekanik ve/veya elektro-mekanik aksamların kullanılması halinde bu tesislerden üretilerek dağıtım veya iletim sistemine verilecek olan elektrik enerjisi için kanuna ekli I sayılı Cetvelde belirtilen fiyatlara, üretim tesisinin işletmeye alındığı tarihten itibaren 5 yıllık bir süre için Kanuna ekli II sayılı Cetvelde belirtilen fiyatlar ilâve edilmektedir. Tablo 5.14’de FV enerji tesislerinde yerli aksamların kullanılması halinde verilen ek teşvikler listelenmektedir. FV tesisleri için tüm bileşenlerin yerli olması durumunda mümkün olan maksimum fiyat desteği 20 cent/kWh’e yükselebilmektedir (EPDK, 2019).

<i>Yurt İçinde Gerçekleşen İmalat</i>	<i>Yerli Katkı İlavesi (ABD Doları cent/kWh)</i>
FV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
FV modülleri	1,3
FV modülünü oluşturan hücreler	3,5
İnvertör	0,6
FV modülü üzerine güneş ışınımı odaklayan malzeme	0,5

Tablo 5.14. Yerli aksam kullanılması durumunda ilave teşvik fiyatları.
(EPDK, 2019)

II Sayılı cetvelde yer alan ilave fiyat miktarının belirlenmesi, belgelendirilmesi ve denetlenmesi ile ilgili usul ve esasları belirlemek amacıyla 2016 yılında “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Enerjisi Üreten Tesislerde Kullanılan Aksamın Yurt İçinde İmalatı Hakkında Yönetmelik” yayımlanmıştır. Yönetmeliğe göre yerli bileşen kullanım desteğini alabilmek için yönetmeliğin Ek-2’indeki “Yerli Bileşen Sertifikası” belgesinin hazırlanması gerekmektedir. Yurt içinde imal edilen bütünleştirici parçaların, elektrik enerjisi üretim tesisi aksamı içinde en az %55 oranını sağlaması durumunda ilave yerli aksam teşviği 5 yıl boyunca verilmektedir.

6094 sayılı Kanunda belirtilen bir diğer husus ise, lisanlı güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin bağlanabileceği trafo istasyonları listesinin Enerji ve Tabii

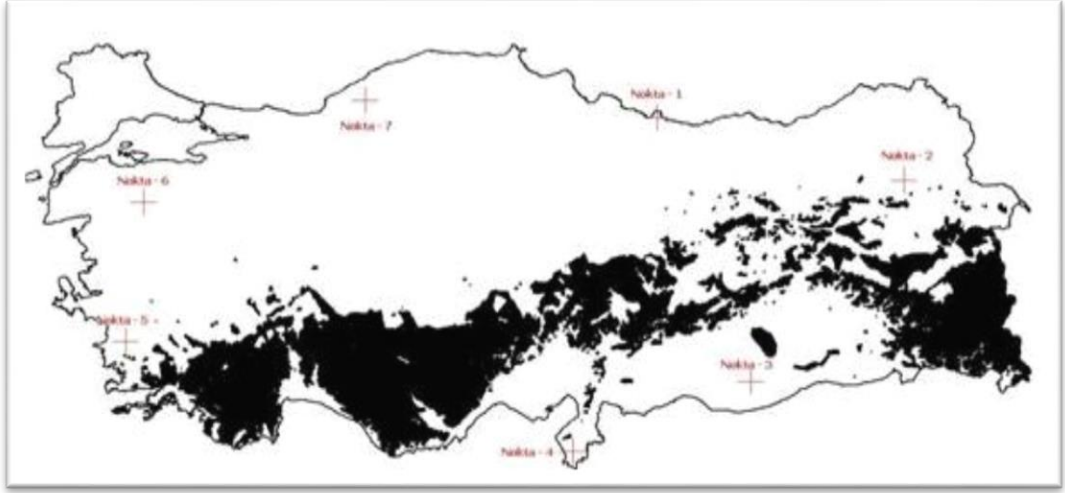
Kaynaklar Bakanlığı tarafından 31 Aralık 2013 tarihine kadar ilan edilecek olması ve toplam kurulu güç miktarının üst limitinin 600 MW olarak sınırlandırılmasıdır. Ayrıca, kanunda her yıl ek bağlantı kapasitelerinin açıklanacağı belirtilmiştir. Bu kapsamda, ilgili kanunun gereği olarak güneşlenme süreleri ile yıllık ortalama ışınım miktarları göz önüne alınarak toplam 27 bölgede 38 şehre güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin bağlanabileceği trafo merkezleri için izin çıkmıştır (Tablo 5.15) (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında, 2011). İller arasında en çok kapasite Konya'ya (Konya I ve Konya II toplamı 92 MW) tahsis edilmiş olup, Konya'yı sırasıyla Van (77 MW) ve Karaman (38 MW) illeri takip etmiştir.

<i>Bölge</i>	<i>Kapasite (MW)</i>	<i>Bölge</i>	<i>Kapasite (MW)</i>
Konya-1	46	Isparta-Afyon	18
Konya-2	46	Denizli	18
Van-Ağrı	77	Bitlis	16
Antalya-1	29	Tunceli-Bingöl	11
Antalya-2	29	Şırnak	11
Karaman	38	Adana-Osmaniye	9
Mersin	35	Muş	9
K. Maraş-Adıyaman	27	Siirt-Batman-Mardin	9
Burdur	26	Sivas	9
Niğde-Nevşehir-Aksaray	26	Elazığ	8
Kayseri	25	Şanlıurfa-Diyarbakır	7
Malatya-Adıyaman	22	Erzurum	5
Hakkari	21	Erzincan	3
Muğla-Aydın	20		

Tablo 5.15. Güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin şehirlere göre dağılımı.

(Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında, 2011)

Güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri Şekil 5.12'de siyah renk koduyla gösterilmiş olan alan içerisine tesis edilmesi planlanmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında, 2011).



Şekil 5.12. Güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin saha alanları.
(Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında, 2011)

2014 ve 2015 yıllarında, TEİAŞ tarafından güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin kurulması için 6 paket halinde bir yarışma düzenlenmiştir. Söz konusu güneş enerjisine dayalı lisanslı üretim tesisi yatırımı için toplam 7.873 MW'lık 496 adet lisans başvurusu yapılmıştır (Yılmaz, 2014). Yapılan bu yarışmalarda 600 MW'lık kapasite yarışmayı kazanan firmalara dağıtılmıştır.

2011 yılında YEK Kanuna dayanılarak, *“tüketicilerin elektrik ihtiyaçlarını tüketim noktasına en yakın kendi üretim tesisinden karşılaması, arz güvenliğinin sağlanmasında küçük ölçekli üretim tesislerinin ülke ekonomisine kazandırılması ve küçük ölçekli üretim kaynaklarının etkin kullanımının sağlanması ile elektrik şebekesinde meydana gelen kayıp miktarlarının düşürülmesi”* amacıyla *“Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik”* yayımlanmıştır. Lisanssız elektrik üretimi, gerçek veya tüzel kişilere lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaf tutularak, elektrik enerjisi üretebilme faaliyettir. Yönetmeliğin ilk halinde yatırımcılara 500 kW kurulu gücüne kadar lisanssız elektrik enerjisi üretim faaliyeti gösterme hakkı tanınmıştır. 2013 yılında yayımlanan 6446 sayılı yeni Elektrik Piyasası Kanunu'nda lisanssız yapılabilecek faaliyetlerin kapsamı genişletilerek üst sınır 500 kW'tan 1 MW'a yükselmiştir. 2019 yılında ise, 1044 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisanssız üretim tesislerinin kurulu güç üst sınırı 1 MW'dan 5 MW'a çıkartılmıştır. Lisanssız elektrik

üretimi kurulu güç kapasitesi üst sınır limitinin zamanla artırılması ve yatırım maliyetlerinin her geçen gün düşmesi GES yatırımlarının hızla artmasına neden olmuştur. Tablo 5.16’da, EPDK tarafından hazırlanan elektrik piyasası yıllık sektör raporlarına göre lisanssız FV üretim tesislerin kurulu güç kapasite gelişimi gösterilmiştir (EPDK, 2015-2018).

	2015	2016	2017	2018
Lisanssız FV Kurulu Güç Toplamı	292,91	939,19	2.978,84	5.016,99
Bir Önceki Yıla Göre Artış Oranı		%220	%217	%68

Tablo 5.16. Lisanssız FV üretim tesislerin kurulu güç kapasite gelişimi (MW).

(EPDK, 2015-2018)

2013 yılında, kamuya ait arazilerde büyük ölçekli elektrik enerjisi üretimine uygun yenilenebilir enerji kaynak alanlarının belirlenmesi ve bu üretim tesislerinde kullanılan ileri teknoloji içeren aksamın yurt içinde üretilmesi amacıyla YEKA yönetmeliği olarak bilinen “*Elektrik Enerjisi Üretimine Yönelik Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanlarının Belirlenmesi, Derecelendirilmesi, Korunması ve Kullanılmasına İlişkin Usul Ve Esaslara Dair Yönetmelik*” yayımlanmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından 2014 yılında Türkiye’nin AB’ye katılım hedefine ve yenilenebilir enerji hedeflerine bağlılığını göstermek amacıyla “*2013-2023 Dönemi İçin Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı*” hazırlanmıştır. Eylem planında hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizde mevcut potansiyellerinin yüksek olması sebebiyle 2023 yılına kadar toplam elektrik enerjisi talebinin en az % 30’unun yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılandığı bir üretim portföyünün oluşturulması hedeflenmiştir. Eylem planında güneş enerjisi için 2023 yılı sonuna kadar ulaşılması hedeflenen kurulu güç kapasite miktarı 5.000 MW olarak belirlenmiştir (YEGM, 2014: 8,31).

2016 yılında, yatırımlarda yerli panel kullanımını teşvik etmek amacıyla “*Devlet Yardımları Hakkında Kararın Uygulanmasına İlişkin Tebliğ*” yayımlanarak, ithal güneş panelleri teşvik kapsamından çıkarılmış olup, ithalatta gözetim uygulaması başlamıştır. Bu düzenleme ile yerli güneş paneli üreticilerin korunması amaçlanmıştır.

2017 yılında, 1 GW kurulu güce sahip güneş enerjisi santrali ve yıllık 500 MW kapasiteli bir fotovoltaik güneş modülü üretim fabrikası kurulumu için “*Karapınar Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA GES-1)*” yarışması düzenlenmiştir. İhaleyi Kalyon ile Güney Koreli ortağı Hanwha Q Cells’in oluşturduğu ortak girişim grubu 6,99 dolar cent/kWh fiyat desteği teklifi ile kazanmıştır (TSKB, 2018: 51). Ancak, 2019 yılı başında Güney Koreli firmanın ortaklıktan çekilmesine bağlı olarak YEKA GES-1 projelerinde işletmeye alma süresi 36 ay uzatılmış olup, bugüne kadar proje ile ilgili somut bir adım atılamamıştır.

2017 yılı sonunda, azami 10 kW kurulu güce sahip çatı üstü FV kurulumları için “*Elektrik Piyasasında Tüketim Tesisi ile Aynı Ölçüm Noktasından Bağlı ve Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisleri İçin Lisanssız Üretim Başvurularına ve İhtiyaç Fazlası Enerjinin Değerlendirilmesine İlişkin Usul ve Esaslar*” başlığı altında yasal bir düzenleme yapılmıştır. Daha sonra, 2019 yılında yayımlanan, “*Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği*” ile kendi tüketim ihtiyaçlarını karşılamak, tüketim fazlası miktarı da satabilmek amacıyla meskenlerde 10 kW’a kadar, tüm işletmeler ve kamu kurumlarında ise 5 MW’a kadar çatı, cephe vb. alanlarda elektrik enerjisi üretimi yapabilmelerinin önü açılmıştır.

31 Ocak 2019 tarihinde Şanlıurfa-Viranşehir’de 500 MW, Niğde-Bor’da 300 MW ve Hatay-Erzin’de 200 MW kapasite için gerçekleştirilmesi planlanan “*YEKA GES-2 İhalesi*” ise, ülkemizin içinde bulunduğu finansal koşulların projenin hayata geçirilmesini zorlaştırmasından ötürü iptal edilmiştir (GÜYAD, 2019).

Türkiye, 2018 yılı sonu itibarıyla fotovoltaik kurulu güç kapasitesini 5.063 MW’a çıkartarak Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı’nda belirtilmiş olan 5.000 MW güneş kurulu güç hedefine 2023 yılından önce ulaşmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2019-2023 yılı stratejik planında, sürdürülebilir enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücünün 2023 yılında 10.000 MW seviyesine çıkarılması hedeflenmiştir.

TEİAŞ tarafından, EPDK’dan lisans almış olup öngörülen tarihlerde devreye girmesi beklenen projeler doğrultusunda yapılan Üretim Kapasite Projeksiyonu çalışmasında 2022 yılında güneş enerjisi toplam kurulu güç kapasitesinin 8.920,7 MW ulaşması beklenmektedir (Tablo 5.17) (TEİAŞ, 2018: 85).

	2020	2021	2022
<i>Linyit</i>	10.562,9	11.062,9	11.062,9
<i>T.Kömür + Asfaltit</i>	782,5	782,5	782,5
<i>İthal Kömür</i>	8.793,9	10.839,4	10.839,4
<i>Doğal Gaz</i>	27.946,4	27.946,4	27.946,4
<i>Jeotermal</i>	1.236,0	1.236,0	1.236,0
<i>Fuel Oil</i>	316,9	316,9	316,9
<i>Motorin</i>	1,0	1,0	1,0
<i>Diğer</i>	446,7	546,7	646,7
<i>Biyokütle</i>	735,0	755,0	775,0
<i>Hidrolik</i>	31.787,5	32.318,5	32.323,8
<i>Rüzgâr</i>	9.883,2	10.418,2	10.448,2
<i>Güneş</i>	7.920,7	8.420,7	8.920,7
Toplam	100.412,8	104.644,4	105.299,6

Tablo 5.17. Toplam kurulu gücün kaynaklara göre gelişim projeksiyonu (MW).

(TEİAŞ, 2018: 85)

Fosil yakıt bakımından fakir bir ülke olan Türkiye, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması, enerjide arz güvenliğinin sağlanması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması amaçları doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarının maksimum seviyede değerlendirilmesini hedef edinmiştir. Elektrik enerjisi üretim maliyetinin geleneksel santrallere göre yüksek olması fotovoltaik sistem yatırımlarının gerçekleşmesinde en büyük engel olmuştur. Zaman içerisinde fotovoltaik sistemlerin, verimlerin artması ve maliyetlerin düşmesine paralel olarak Türkiye'nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelinin elektrik enerjisi üretimi içerisinde azami ölçüde değerlendirilmesini sağlamaya yönelik teşvik uygulamaların başlatılması fotovoltaik yatırımlarına olan ilgiyi artırmıştır.

5.4. Türkiye Elektrik Üretiminde Fotovoltaik Sistemlerin Gelişiminin Önemi

Doğal enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisinin elektrik enerjisi üretiminde kullanımı, Türkiye'nin artan enerji ihtiyacının karşılanması ve ülke refahına katkı sağlanması noktasında kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişimi; enerji arz güvenliğinin sağlanması, ulusal elektrik şebekesine olan katkısı, ülke ekonomisine katkısı ve çevre açısından önem arz etmektedir.

5.4.1. Enerji Arz Güvenliğini Sağlama Açısından Önemi

Kavram olarak enerji arz güvenliği; “enerjinin üretimi, iletimi ve tüketimi faaliyetleri kapsamında, enerji arzı, nakli ve talebinin, yeterli miktarda ve kaliteli olarak, makul maliyet/fiyatlarla, kesintisiz ve çevreye duyarlı biçimde gerçekleştirilmesi” olarak tanımlanmaktadır (Erdal, 2011: 15).

Enerji arz güvenliğini sağlamada ise başarılı bir strateji şunları hedeflemelidir (UN ESCAP, 2008: 205);

- Enerji arzı ve talebi arasındaki farkı en aza indirmek,
- Enerji verimliliği ve tasarrufunu artırarak enerji yoğunluğunu azaltmak,
- En uygun enerji portföyünü oluşturmak,
- Enerji arz kaynaklarını çeşitlendirmek,
- Yatırım yaparak enerji altyapısını iyileştirmek ve geliştirmek,
- Alternatif enerji kaynaklarına yönelmek,
- Araştırma ve geliştirme yoluyla yenilik ve rekabeti teşvik etmek,
- Enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı kırılganlığı azaltmak,
- Enerji sektöründe iyi yönetimi sağlamak.

Bu çerçevede, ülkeler enerjide arz güvenliğini sağlamak için sahip oldukları güneş, rüzgâr, su ve jeotermal gibi doğal enerji kaynaklarını etkin ve verimli bir biçimde kullanılması yönünde enerji yatırımları yapmaktadırlar. Böylece, artan enerji taleplerinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması hedeflenmektedir.

Ülkemizin büyüme ve kalkınmasında ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin tüm tüketicilere; zamanında, yeterli, sürekli, güvenli, düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevreyle uyumlu bir şekilde temin edilmesi amacıyla hazırlanan “*Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi*” 2009 yılında Yüksek Planlama Kurulu tarafından onaylanmıştır. Strateji Belgesinde, Türkiye’nin enerji arzı konusunda dışa olan bağımlılığını azaltmak ve kaynak çeşitliliğini sağlamak için yerli ve yenilenebilir kaynakların azami ölçüde kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimindeki payının en az %30 düzeyinde olması temel ilkelerden birisi olmuştur. Bu hedefi destekleme noktasında en önemli enerji kaynaklarından birisi de güneş enerjisidir. Bu bağlamda, teknolojik gelişmeler yakından takip edilerek elektrik

enerjisi üretiminde ülkenin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli azami ölçüde değerlendirilmelidir.

Türkiye birincil enerji arzı bakımından %71-72 oranında dışa bağımlı bir ülke konumundadır. Benzer biçimde ikincil enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin %50'sinden fazlası ithal yollarla temin edilen fosil yakıtlı kaynaklardan üretilmektedir. 2018 yılı içerisinde mevcut elektrik enerjisi talebinin yaklaşık %30'u doğal gazdan sağlanmıştır. 2039 yılında, düşük talep senaryosuna göre yıllık ortalama %2,9 artış oranıyla elektrik enerjisine olan talebin 556,3 TWh'e çıkacağı hesap edilmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında alternatif enerji kaynakları geliştirilmediği sürece gelecek dönemlerde elektrik enerjisi talep artışına bağlı olarak doğal gaz talebinin de artacağı aşıkardır. Olası bir doğal gaz sıkıntısında ise elektrik üretiminde sorun yaşanacaktır. Böyle bir durum enerji arz güvenliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, fotovoltaik sistemler vasıtasıyla Türkiye'nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelinin elektrik enerjisi üretiminde değerlendirilmesi hem kaynak çeşitliliği bakımından hem de enerji arz güvenliği açısından önem arz etmektedir.

Türkiye'nin mevcut çatı alanlarının en az üçte biri (467 milyon m²), güneş enerjisi sistemleri için uygun olduğu görülmektedir. Mesken çatılarında 23.000 MW, endüstriyel ve ticari çatılarda 21.000 MW ve kamu kurumlarının çatılarında 2.000 MW olamak üzere toplamda 46.000 MW'lık kurulu güç kapasitesinin elde edilmesi mümkün olabilmektedir (Solar Power Europe, 2019: 74). Bu alanların enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi enerji arz güvenliğini sağlamada katkı sağlayacağı gibi sanayi gelişimi ve istihdam açısından da olumlu etkileri olacaktır (Telemcioğlu, 2018: 18).

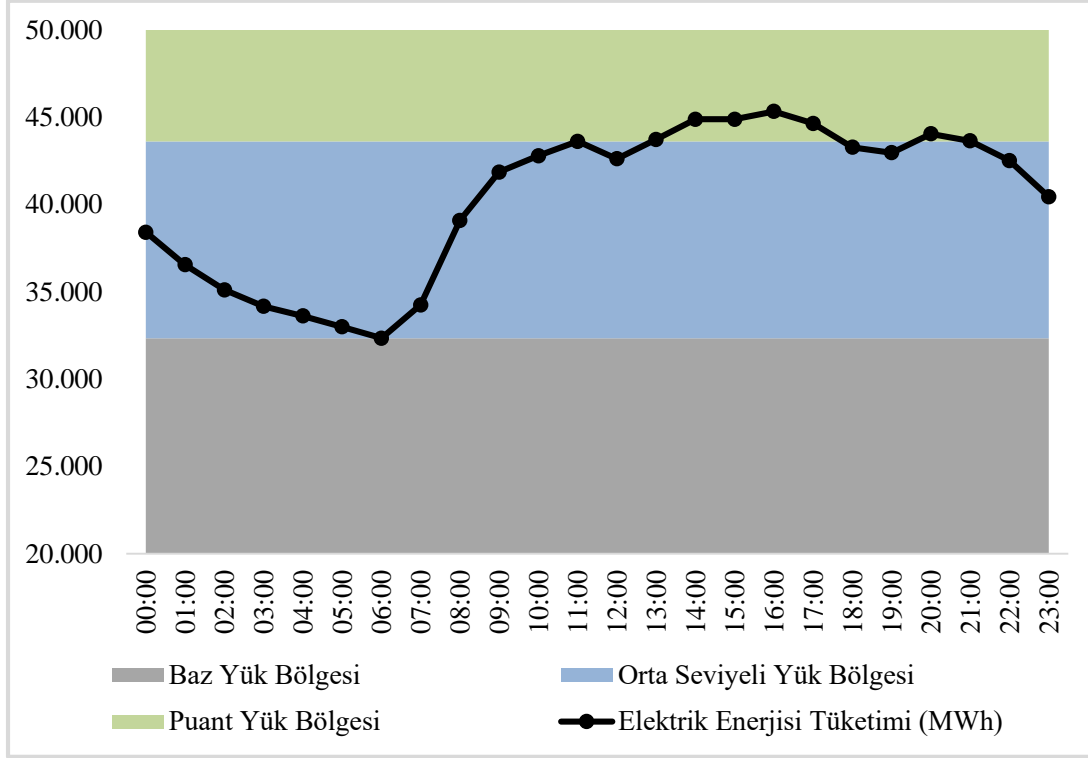
5.4.2. Ulusal Elektrik Şebekesine Olan Katkı Açısından Önemi

2018 yılında mevcut güneş enerjisi santralleri ile yıllık yaklaşık 7,8 TWh elektrik enerjisi üretilerek Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi talebinin yüzde %2,6'sı güneş enerjisinden karşılanmıştır (TEİAŞ, 2019). Ortalama güneş ışınım değerleri Türkiye'nin (1.471 kWh/kWp) çok altında olan ülkelerden Almanya (978 kWh/kWp) elektrik enerjisi üretiminin %8,4'ünü, Belçika (962 kWh/kWp) %5'ini, Hollanda (994

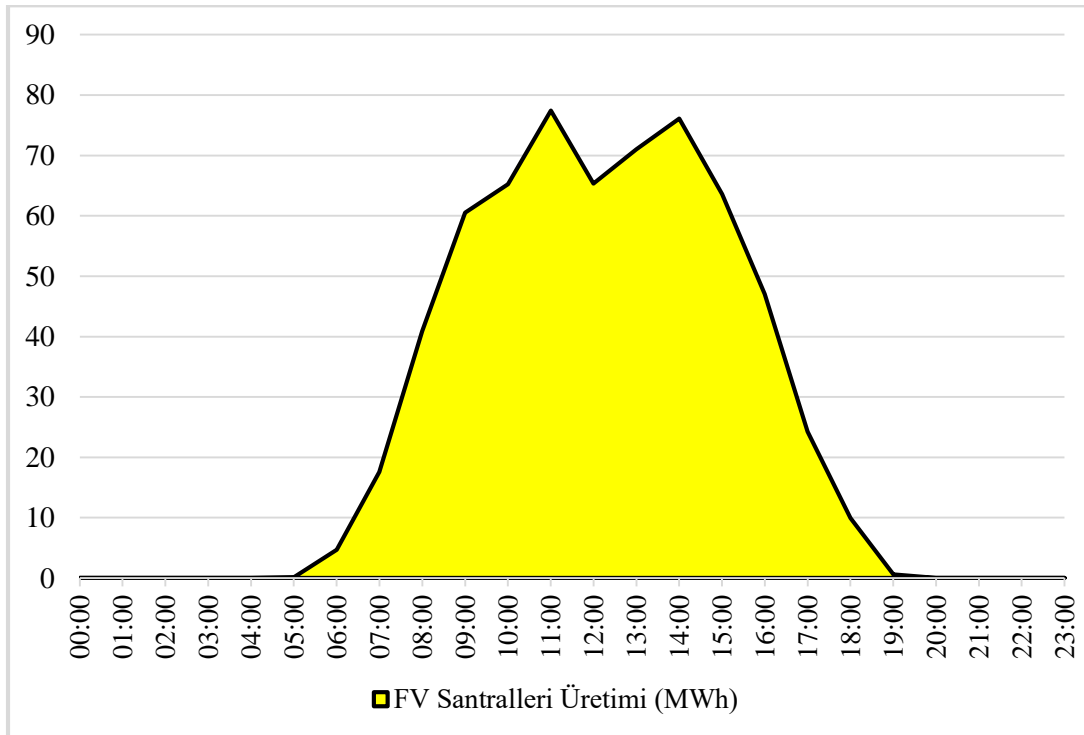
kWh/kWp) ise %3,9'unu fotovoltaik sistemlerden sağlamıştır (Diğer ülke kıyaslamaları için bkz. Tablo 5.10)

Elektrik enerjisi tüketimi; mevsimsel, haftalık ve günlük olarak değişebilen bir yapıya sahiptir. Elektrik enerjisi tüketim miktarı, uzun dönemde sanayi gelişimi, ekonomik büyüme, nüfus artışı vb. etkenlere bağlı olarak değişirken kısa dönemde ise mesai saatleri, tatil günleri, sosyal etkenler gibi durumlara ve sıcaklık, nem, güneşlenme süresi gibi mevsimsel/hava şartlarına bağlı olarak değişebilmektedir. Sektörel bazlı elektrik enerjisi tüketim yapısına baktığımız zaman ise, sanayi kesiminde elektrik enerjisi tüketim miktarında mevsimsel bir değişimin çok az olduğu, tüketimin genellikle ekonomik etkenlere bağlı olarak değişme gösterdiği görülmektedir. Ticarethanelerde ise çok büyük bir fark olmasada yaz aylarında gerçekleşen elektrik enerjisi tüketim miktarı kış aylarına göre fazla olmaktadır. Meskenlerde ise elektrik enerjisi tüketiminin mevsimsel değişimi oldukça fazladır. Meskenlerde, yaz aylarında soğutma amacıyla kullanılan klimalar ve kış aylarında ısınma amacıyla kullanılan klima, elektrikli ısıtıcılar vb. cihazlar elektrik enerjisi tüketimini artırmaktadır. Tarımsal sulamada ise sulama ihtiyacına bağlı olarak elektrik enerjisi tüketiminde mevsimsel değişim fazla olmaktadır (Bilmez, 2015: 4-15).

Elektrik enerjisi tüketiminin gün içerisindeki saatlik değişimi ise oldukça fazladır. Şekil 5.13'de, 2019 yılı için, günlük maksimum tüketim değerinin (968.048 MWh) görüldüğü 01 Ağustos 2019 tarihine ait gün içerisindeki saatlik elektrik enerjisi talebi gösterilmiştir (EPIAŞ, 2019a). Günlük elektrik enerjisi tüketimini şekildeki gibi puant yük, orta seviye yük ve baz yük olarak 3 farklı gruba ayıracak olursak elektrik enerjisi tüketiminin en yüksek olduğu puant bölgesinde Ulusal Elektrik Sistemi'nin yönetimi oldukça zor olmaktadır. Elektrik enerjisi tüketiminin en yüksek seviyelere çıktığı gündüz saatleri aynı zamanda fotovoltaik sistemlerin en verimli çalıştığı zaman dilimi bölgesiyle örtüşmektedir. İlgili günün 05:00-20:00 saatleri arasında toplam 619.455 MWh elektrik enerjisi tüketimi gerçekleşmiş olup bu tüketimin sadece %0,1'i (624 MWh) güneş enerjisinden karşılanmıştır (Şekil 5.14) (EPIAŞ, 2019b). Türkiye'nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, elektrik enerjisi üretimi içerisindeki bu oranın sembolik bir seviyede kaldığı görülür. Bu bağlamda, güneşe dayalı elektrik enerjisi üretim payının yükseltilmesinde, fotovoltaik sistem kapasite ve verimlilik artışları önemli bir etken olacaktır.



Şekil 5.13. Saatlik elektrik enerjisi tüketimi ve yük bölgeleri (01.08.2019).
(EPIAŞ, 2019a)



Şekil 5.14. FV santrallerin saatlik elektrik enerjisi üretimi (01.08.2019).
(EPIAŞ, 2019b)

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi'nin "*Türkiye'nin Enerji Sisteminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı:İletimde Genişleme ve Esneklik Seçenekleri*" adlı yapmış olduğu çalışmada, 2026 yılında rüzgâr ve güneş enerjisi toplam kurulu gücünün 20 GW olması durumunda hesaplanan iletim sistemi yatırım ihtiyacına, herhangi bir ilave yatırım yapmaksızın bu kapasite miktarının 40 GW'a çıkarılmasının mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, uygun şebeke planlama ve işletme stratejileri sayesinde bu kapasitenin 60 GW'a (güneş 30 GW+rüzgâr 30 GW) ulaşmasının da mümkün olduğu gösterilmiştir. 2026 yılında, güneş ve rüzgâr toplam kurulu gücünün 60 GW'a ulaştırılması, bu kaynakların %31'lik üretimle en büyük kaynaklardan biri olacağı belirtilmiştir (SHURA, 2018: 11,51,86). Türkiye güneş enerjisi bakımından zengin bir coğrafyada yer almasına ve günde ortalama 7,5 saat güneşlenme süresine sahip olmasına karşın, henüz güneş enerjisinden yeteri kadar faydalanamamaktadır. Sahip olunan mevcut potansiyelin maksimum seviyede kullanılabilmesi halinde gündüz saatlerindeki elektrik enerjisi talebinin karşılanması noktasında Ulusal Elektrik Sistemi'ne önemli bir katkı sağlanacağı ortadadır.

Bir diğer önemli nokta ise, Türkiye'nin yakın zamanda yerli elektrikli araç üretimine başlaması ve bu gelişmeye bağlı olarak ulaştırma sektöründe bir dönüşümün yaşanması beklenmektedir. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından yapılan yüksek büyüme adlı seneryayo göre, 2030 yılı sonu itibarıyla Türkiye'de kullanılacak olan toplam elektrikli araç sayısının 2,5 milyon seviyesine çıkacağı öngörülmektedir. Bu araçların şarj edilmeleri ise ulusal şebeke üzerinde ek bir yük yaratacaktır. Bu nedenle, güneş enerjisi bu talebi karşılamada alternatif bir kaynak olacaktır. Mevcut durumda Türkiye genelinde 1.000 kadar elektrikli araç olup bu araçların yıllık toplam 1.500 MWh elektrik enerjisi talebi olduğu tahmin edilmektedir. 1 MW kapasiteli güneş enerjisi santrali bu talebi karşılamak için yeterli olmaktadır (SHURA, 2019: 9-13).

Fotovoltaik sistemlerin Ulusal Elektrik Sistemi'ne sağlayacağı bir diğer katkı ise, elektrik iletimi sırasında oluşan sistem kayıplarının azaltılması noktasında olacaktır. Fotovoltaik sistemlerin dağıtık üretim sürecine dâhil edilmesi ile tüketime en yakın noktada üretim yapılabilecek ve böylece dağıtım ve iletim sistemlerindeki kayıp oranlarını azaltmak mümkün olabilecektir.

5.4.3. Ülke Ekonomisine Katkı Açısından Önemi

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin 380 TWh/yıl olmasına rağmen bu potansiyel henüz ekonomik değere yeterince dönüştürülememiştir. Enerji taleplerinin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisinin alternatif bir seçenek olarak etkili ve sürdürülebilir bir şekilde hayata geçirilmesi ekonomiye katma bir değer kazandıracaktır.

Türkiye'nin çözmesi gereken en önemli ekonomik sorunlarının başında cari açık meselesi gelmektedir. Enerji tüketiminde giderek artan dışa bağımlılık nedeniyle Türkiye'de enerji sektörü, cari açık sorununu besleyen başlıca sektörlerden biri haline gelmiştir. Türkiye, fosil kaynaklar bakımından fakir bir ülke olması sebebiyle tükettiği enerjinin yaklaşık dörtte üçünü ithal etmekte bunun için de her yıl milyarlarca dolar enerji faturası ödemektedir. Bu kapsamda enerjide ithalata olan bağımlılığın düşürülmesi, yerli ve yenilenebilir kaynaklara yönelmesi cari açığın azaltılması açısından önemlidir. Nitekim, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanının YEKA GES-2 projesine ilişkin yapmış olduğu bir açıklamada, proje kapsamında 1 milyar doların üzerinde bir yatırımla yüksek verimli güneş modüllerinin kullanılacak olduğu 1.000 MW'lık güneş enerjisi santralinden, yıllık 1,9 milyar kWh elektrik enerjisi üretileceği ve böylece 110 milyon dolarlık doğalgaz ithalatının önüne geçilerek cari açığın kapanması yönünde önemli bir katkı sunulacağı değerlendirilmesinde bulunmuştur (TRT, 2020).

Tablo 5.18'de enerji ithalatının toplam ithalat içerisindeki payı gösterilmiştir (TÜİK, 2019a). 2018 yılı toplam ithalat içerisinde enerji ithalatının payı %19 seviyesinde olmuştur. Yapılan 223 milyar dolarlık ithalatın 43 milyar doları enerji ithalatına aittir. Elektrik enerjisi üretiminde alternatif bir kaynak olarak güneş enerjisinden daha fazla yararlanılması, enerji ithalat payının düşürülmesi bakımından önemli bir rol oynayacaktır. Enerji ithalatından yapılacak olan her tasarruf sağlık, eğitim, ulaştırma, haberleşme, ARGE gibi alanlara daha fazla kaynağın aktarılmasını sağlayacaktır.

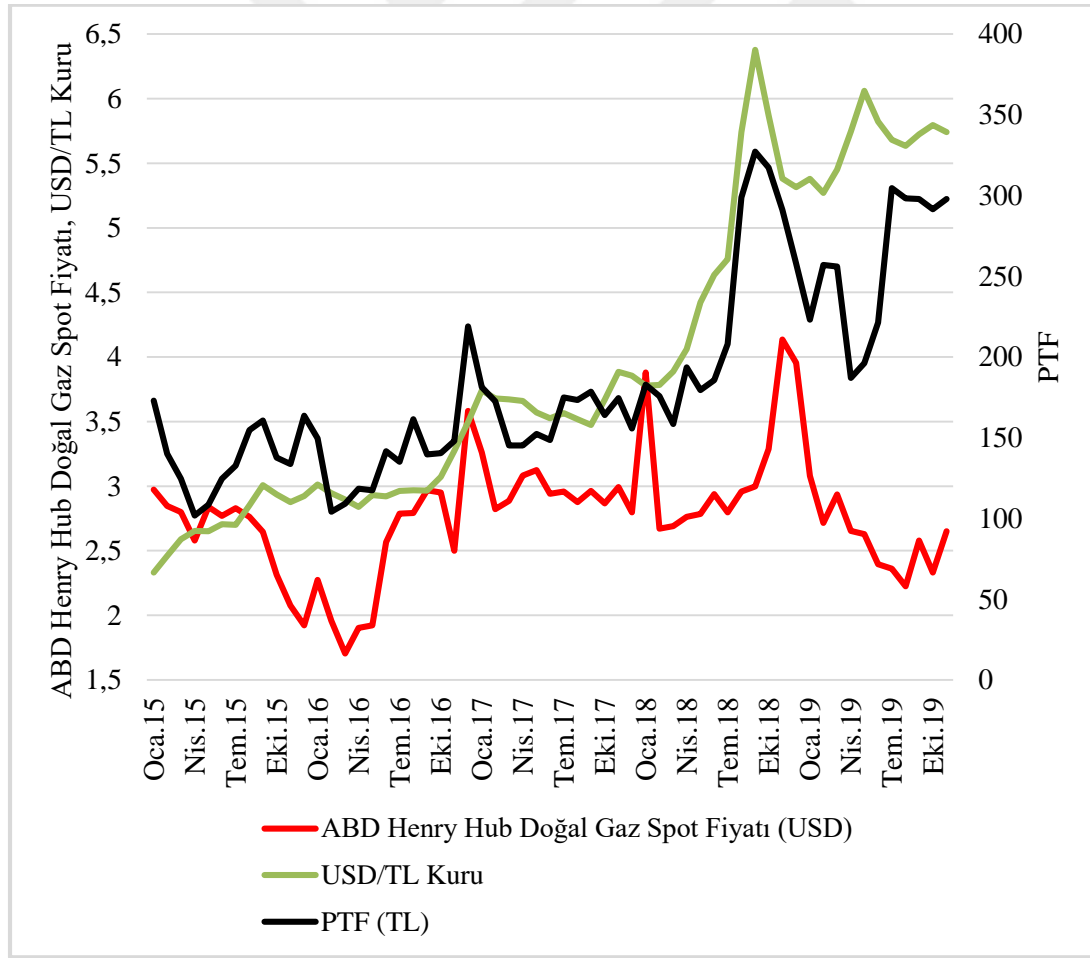
	<i>Toplam İhracat</i>	<i>Toplam İthalat</i>	<i>Dış Ticaret Dengesi</i>	<i>Enerji İthalatı</i>	<i>Toplam İthalat İçerisindeki Enerji İthalat Payı</i>
2000	28	55	-27	9,54	%17,35
2001	31	41	-10	8,34	%20,34
2002	36	52	-15	9,20	%17,69
2003	47	69	-22	11,58	%16,78
2004	63	98	-34	14,41	%14,70
2005	73	117	-43	21,26	%18,17
2006	86	140	-54	28,86	%20,61
2007	107	170	-63	33,88	%19,93
2008	132	202	-70	48,28	%23,90
2009	102	141	-39	29,91	%21,21
2010	114	186	-72	38,49	%20,69
2011	135	241	-106	54,10	%22,45
2012	152	237	-84	60,10	%25,36
2013	152	252	-100	55,92	%22,19
2014	158	242	-85	54,89	%22,68
2015	144	207	-63	37,84	%18,28
2016	143	199	-56	27,17	%13,65
2017	157	234	-77	37,20	%15,90
2018	168	223	-55	43,00	%19,28

Tablo 5.18. Türkiye'nin enerji ithalatı ve dış ticaret dengesi verileri (Milyar Dolar).

(TÜİK, 2019a)

Fotovoltaik sistemlerinin sağlayacağı bir diğer fayda ise ucuza elektrik enerjisi üretebilme olanağı olacaktır. Alman Güneş Endüstri Derneği BSW-Solar yöneticilerinden Jörg Mayer, 2014 yılında İzmir'de düzenlenen "Solartr 2014" adlı konferanstaki konuşmasında, Almanya'da elektrik fiyatlarındaki düşüşe; fosil yakıtların ucuzlamasına bağlı olarak üretim maliyetinin düşmesi ve en üst düzeyde bulunan fotovoltaik sistem kurulumlarının neden olduğunu ifade etmiştir (Mayer, 2015: 48). Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminde doğal gaz ve kömür ithalatının önemli bir yere sahip olması sebebiyle hem küresel enerji fiyatlarındaki hem de döviz kurundaki dalgalanmalar elektrik fiyatlarının belirlenmesinde etkili olmaktadır. Küresel enerji fiyatlarında ve döviz kurunda meydana gelen artışlar (özellikle ani artışlar) dış ticaret dengesini olumsuz yönde etkilediği gibi elektrik enerjisi üretim maliyetinin de artmasına neden olmaktadır. Sanayi sektörünün en önemli girdilerinden birisi olarak elektrik enerjisinin birim fiyatının artması bu kaynağı girdi olarak kullanan tüm sektörlerde üretim maliyetlerinin de artmasına neden olacaktır. İmalat sanayinde üretim maliyetlerindeki artış ise üretilen ürüne fiyat artışı olarak

yansıyacaktır. Bu durum, sektörlerin rekabet edebilme olanağını azalttığı gibi ülke ihracatını da olumsuz yönde etkileyecektir. Böylece, elektrik enerjisi birim fiyatındaki artışlar doğrudan ya da dolaylı olarak ülke üzerinde enflasyonist bir etki oluşturacak, ekonomik büyümeyi yavaşlatacaktır. En büyük maliyet kalemi yakıt giderleri olan kömür ve doğalgaz santrallerinin yerine yakıt gideri olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payının artırılması elektrik fiyatlarında gerilemeye neden olacaktır. Böylece, tüm tüketici grupları elektriği daha ucuza kullanma imkanına erişecektir (TCMB, 2019: 1-3). Şekil 5.15’de, Gün Öncesi Piyasasında (GÖP) oluşan elektrik fiyatlarının (Piyasa Takas Fiyatı-PTF) (EPİAŞ, 2020) dolar kurundaki (TCMB, 2020) ve doğal gaz fiyatlarındaki (IMF, 2020a) dalgalanmalara bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Son dönemde, emtia fiyatlarında görülen artışların etkisi ile PTF fiyatları da artma eğilimi göstermektedir.



Şekil 5.15. PTF oluşumuna doğal gaz fiyatının ve döviz kurunun etkisi.

(EPİAŞ, 2020; IMF, 2020a; TCMB, 2020)

Fotovoltaik sistemler sadece Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayacak aynı zamanda bu teknolojinin ülkemizde üretilip dünyaya ihracatı yapıldığı takdirde Türkiye'nin gelişen ekonomisine de katkı sağlayacaktır. Türkiye'nin hedeflemiş olduğu güneş enerjisi kapasitesi doğrultusunda fotovoltaik sistemlerin kurulumu artarken yerli fotovoltaik sanayisinin de gelişmesi gerekmektedir. Aksi takdirde enerjide dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenirken yerli sanayi oluşturulmadığı için teknoloji açısından dışa bağımlılık söz konusu olacaktır.

Ayrıca, araştırma/geliştirme, üretim, bakım, eğitim gibi çeşitli faaliyet alanlarında da ilave olarak istihdam olanağı yaratılacaktır. Bugün dünyanın hemen her köşesinde fotovoltaik teknolojilerin daha da geliştirilmesi ve üretim maliyetlerinin daha da düşürülmesi yönünde yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

5.4.4. Çevre Açısından Önemi

Üretim sürecinin en önemli girdilerinden birisi olan enerji, aynı zamanda karbon emisyonlarının da en temel belirleyicisi konumundadır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması noktasında üzerinde en çok durulması gereken konu ise enerjidir. Paris Anlaşması ile belirlenen küresel iklim hedeflerine ulaşacak ve karbon emisyonlarını azaltacak politikalar arasında yenilenebilir enerji son derece önemli bir rol oynamaktadır.

Ülke olarak karbon emisyonlarını sürekli arttıran enerji kaynaklarını ağırlıklı olarak tüketmekteyiz. Tablo 5.19'da görüleceği üzere, Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 219,2 milyon ton CO₂ eşdeğerinde iken 2017 yılında 2,4 kat artışla 526,3 milyon ton CO₂ eşdeğerine yükselmiştir. Sektörel bazlı emisyonlarda ise, enerji sektörü başı çekmektedir. 1990 yılında enerji kaynaklı sera gazı emisyonunun payı %63,7 (139,6 milyon ton CO₂ eşdeğeri) iken 2017 yılının bu pay %72,2'ye (379,9 milyon ton CO₂ eşdeğeri) yükselmiştir (TÜİK, 2019b).

<i>Yıl</i>	<i>Enerji</i>	<i>Endüstriyel İşlemler ve Ürün Kullanımı</i>	<i>Tarımsal Faaliyetler</i>	<i>Atık</i>	<i>Toplam</i>	<i>Enerji Payı (%)</i>
1990	139,6	22,8	45,7	11,1	219,2	63,7
1991	144,0	24,7	46,5	11,3	226,6	63,5
1992	150,3	24,3	46,6	11,5	232,8	64,6
1993	156,8	24,5	47,0	11,8	240,1	65,3
1994	153,3	24,2	44,6	12,0	234,1	65,5
1995	166,3	25,2	43,7	12,4	247,6	67,2
1996	184,0	26,2	44,4	12,7	267,2	68,9
1997	196,2	27,0	42,2	13,2	278,6	70,4
1998	195,9	27,4	43,6	13,5	280,3	69,9
1999	193,8	25,8	44,2	13,9	277,8	69,8
2000	216,1	26,2	42,3	14,3	298,9	72,3
2001	199,2	25,9	39,8	15,5	280,4	71,1
2002	205,8	26,9	37,4	15,9	286,1	72,0
2003	220,3	28,2	40,9	16,2	305,6	72,1
2004	226,1	30,8	41,4	16,6	315,0	71,8
2005	244,0	33,6	42,3	17,3	337,2	72,3
2006	260,0	36,7	43,5	18,0	358,2	72,6
2007	290,8	39,2	43,2	18,3	391,4	74,3
2008	287,3	40,9	41,0	18,3	387,6	74,1
2009	292,5	42,5	41,7	18,8	395,5	74,0
2010	287,0	48,1	44,0	19,5	398,7	72,0
2011	308,7	52,7	46,4	19,8	427,6	72,2
2012	320,5	55,0	52,1	19,4	446,9	71,7
2013	307,5	58,1	55,2	18,2	439,0	70,1
2014	325,8	58,5	55,5	18,2	458,0	71,1
2015	340,9	57,0	55,4	18,8	472,2	72,2
2016	359,7	62,2	58,2	18,4	498,5	72,2
2017	379,9	66,5	62,5	17,4	526,3	72,2

Tablo 5.19. Türkiye’de sektörlere göre toplam sera gazı emisyonları (Milyon Ton CO₂e).
(TÜİK, 2019b)

Türkiye gelişmekte olan bir ülke olması sebebiyle, gelecek yıllarda artan enerji talebi ile karşı karşıya kalacaktır. Elektrik enerjisi üretiminde fosil kaynakların yüksek payı göz önünde bulundurulduğunda bu durum daha fazla sera gazı emisyonu anlamına gelmektedir. Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir potansiyeli bulunmakta olup, bu kaynakların elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payı artırılmalıdır. Türkiye 2023 yılına kadar, doğal gazdan elektrik enerjisi üretiminin yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi ile ikame edilmesine bağlı olarak 18 milyon ton CO₂ emisyonunu azaltmayı hedef edinmiştir (Cumhurbaşkanlığı, 2019: 185). Bu bağlamda enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılmasında fotovoltaik sistemler önemli bir araç olacaktır.

6. SONUÇ

Yıllar itibarıyla, küresel enerji tüketimi artış eğilimi içerisinde olup, 2017 yılı sonu itibarıyla; enerji tüketimi 13.511 Mtep'e, elektrik enerjisi üretimi ise 25.553 TWh'a ulaşmıştır. Hızlı nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak bu trendin gelecek yıllarda da devam etmesi öngörülmektedir. 2040 yılına kadar, küresel enerji talebinin 17.866 Mtep'e, elektrik enerjisi üretiminin ise 40.443 TWh'a ulaşması beklenmektedir.

Günümüzde, küresel enerji tüketiminde sırasıyla; petrol, kömür ve doğal gaz kaynakları en büyük paya sahip iken, elektrik enerjisi üretiminde; kömür, doğal gaz ve hidro kaynakları en büyük paya sahiptir. 2017 yılı sonu itibarıyla, küresel enerji talebinin yaklaşık %90'ı fosil (kömür, petrol, doğal gaz) kaynaklardan sağlanmıştır. Fosil kaynak tüketimi bu hızla devam ettiği takdirde, petrol rezervinin 48 yıl, doğal gaz rezervinin 53 yıl ve kömür rezervinin 192 yıl ömrü kalacağı hesap edilmiştir. Fosil kaynak rezervlerinin sınırlı ve birgün bitecek olması, gelecekte enerji talebinin bu kaynaklardan karşılanamayacağı anlamına gelmektedir. Ayrıca, bu kaynakların ağırlıklı olarak tüketilmesi insan sağlığı, biyolojik çeşitlik ve çevre açısından hissedilir düzeyde bir takım olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bugün, fosil kaynakların oluşturduğu tehditler neticesinde, bu kaynakların tüketiminin sınırlandırılması konusunda, küresel çapta bir takım adımlar atılmaktadır. Ancak, kısa vadede fosil kaynakların yerini ikâme edebilecek etkin çözümlerin henüz var olmaması sebebiyle, enerji tüketiminde fosil yakıtlar temel kaynak olarak tüketilmeye devam edecektir.

Enerji, özellikle son zamanlarda, ekonomik büyüme ve küresel güç olma konusunda en önemli politik ve stratejik unsurlardan biri haline gelmiştir. Bu nedenle, ülkelerin geleceğe yönelik olarak enerji politikalarını iyi belirlemeleri ve çevreyle uyumlu, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir alternatif enerji kaynaklarını araştırıp geliştirmeleri önem arz etmektedir. Bu bağlamda, sahip olduğu potansiyel açısından alternatif enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi ön plana çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, dünya yüzey alanı üzerindeki güneş enerjisinin teorik potansiyeli yaklaşık 89.300 TW olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 2018 yılı içerisinde dünya genelinde üretilen elektrik gücünün (3TW) 28.000 katından daha fazladır. Elbette günümüz şartlarında, bu potansiyelin tamamının kullanılması olası değildir.

Ancak, güneş enerjisinin, elektrik enerjisi üretiminde önemli bir role sahip olabilecek potansiyeli bulundurduğu aşikârdır.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, dolaylı dönüşüm ve doğrudan dönüşüm olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüşümü fotovoltaik teknoloji ile mümkündür. Güneşe dayalı elektrik enerjisi üretim teknolojileri arasında fotovoltaik teknolojinin elektrik üretim maliyetinin daha ucuz olması bu teknolojinin elektrik enerjisi üretiminde yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Diğer elektrik enerjisi üretim sistemleri ile kıyaslandığında, güneş enerjisinin sonsuz bir kaynak olması ve yakıt maliyetinin bulunmaması fotovoltaik sistemlere en büyük avantajı sağlarken, güneş enerjisinin mevsimsel ve hava koşullarına bağlı olarak kesintili bir enerji kaynağı olması enerji sürekliliği açısından dezavantajlı yönünü oluşturmaktadır. Ancak, enerji sürekliliğinin sağlanabilmesi için bilim dünyasında enerji depolama sistemleri üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarının yoğun bir şekilde yapıldığı da bilinmektedir.

1800'lü yıllarda başlayan ve uzun yıllar süre gelen Ar-Ge çalışmaları sonucunda 2018 yılı içerisinde laboratuvar koşullarında, fotovoltaik hücrede %47,1, fotovoltaik modülde ise %40,6 verime ulaşılmıştır. Teknolojideki gelişmelere paralel olarak 2018 yılı fotovoltaik sistemlerinin indirgenmiş elektrik üretim maliyetinin ağırlıklı ortalaması 0,085 USD/kWh'a, sistem kurulum maliyetinin ağırlıklı ortalaması ise, 1.210 USD/kW'a gerilemiştir. Böylece fotovoltaik sistemler fosil yakıtlarla doğrudan rekabet edebilir duruma gelmiştir.

Fotovoltaik teknolojinin gelişimi önündeki mali engellerin aşılmasında teşvik politikaları önemli bir rol oynamaktadır. Fotovoltaik teknolojisini teşvik politikaları arasında alım garantisi (FIT) birçok ülkede tercih edilen başlıca politika unsurudur. Ancak son zamanlarda fotovoltaik sistem maliyetlerinin düşmüş olmasından dolayı yenilenebilir enerji ihaleleri politikasına doğru küresel bir kayma yaşandığı görülmektedir.

Fotovoltaik sistem kurulumuna yönelik olarak teşvik politikalarının uygulanmasının yanı sıra maliyetlerin de düşmüş olması, bu teknoloji türüne yapılan yatırımlara hız kazandırmıştır. Nitekim 2018 yılında, fotovoltaik sistemler dünya genelinde en çok tercih edilen yenilenebilir enerji teknolojisi olmuştur. Bu dönemde

sisteme 102 GW gücünde yeni fotovoltaik kapasite eklenmiştir. Böylece dünya genelinde fotovoltaik sistem kurulu güç kapasitesi 512,3 GW'a ulaşmış olup küresel elektrik enerjisi üretiminin %2,1'i (570 TWh) FV sistemlerinden üretilmiştir. 2040 yılında FV sistemlerin küresel elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payının yaklaşık olarak %10 civarında olacağı öngörülmektedir. Dönüşüm verimliliklerinin daha da artması, maliyetlerinin daha da düşmesi ve enerji depolama sistemlerindeki teknolojik ve mali zorlukların aşılması durumunda, bu teknoloji türü gelecekte oldukça cazip hale gelecektir.

Güneş enerjisi uygulamaları konusunda akla gelen ilk ülke, Almanya'dır. Ülkemiz ve dünya ortalaması ile kıyaslandığında, çok düşük güneş enerjisi potansiyeline sahip olan Almanya, 2018 yılı elektrik enerjisi üretiminin %8,4'ünü FV sistemlerinden elde etmiştir. Bu başarısında etkili olan faktörler arasında; yüksek teşvikler ve yatırım prosedürlerinin hızlı işlemesi yer almaktadır. Almanya, kaynak çeşitliliği ve arz güvenliği açısından geçmişte yüksek teşvik bedelleri ödeyerek bu teknolojiyi desteklemiştir. Bugün geliştirmiş olduğu bu teknolojiyi hem ihraç edip ekonomisine katkı sağlamakta; hemde kendi enerji tüketiminin bir kısmını bu yolla karşılayarak kaynak çeşitliliği oluşturmaktadır.

Türkiye ise; nüfusu artan, sanayileşen ve gelişmekte olan bir ülke olması sebebiyle enerji talebi sürekli artan; kendi öz kaynakları ile enerji ihtiyacını karşılama noktasında henüz yeterli seviyede olamayan ve bu yüzden enerjiyi ithal eden; enerji ithalatı ise ekonomisi üzerinde baskı oluşturup sürekli cari açık veren; mevcut durum itibarıyla birincil enerji ihtiyacı bakımından %72, elektrik enerjisi üretiminde ise %51 oranında dışa bağımlılığı olan ve gelecekte bu oranların giderek artacağı öngörülen; yeterli fosil kaynak rezervlerine sahip olamadığı için bu kaynakların neredeyse tamamına yakınına ithal eden; en önemli kaynaklarından linyitin düşük kalitede olması sebebiyle de sera gazı emisyonuna neden olan bir ülkedir.

2018 yılı Türkiye birincil enerji tüketimi 145,9 Mtep olup, bu karşın 41,3 Mtep birincil enerji üretimi gerçekleşmiştir. Bu dönem elektrik enerjisi üretimi ise, 304,8 TWh (26,2 Mtep) ulaşmıştır. Bu değer, Türkiye birincil enerji tüketiminin yaklaşık %18'ine tekabül etmektedir. 2018 yılı elektrik enerjisi üretiminin sadece %2,6'sı (7,8 TWh) FV sistemlerden üretilmiştir. Türkiye'nin enerji profili ağırlıklı olarak, öz kaynaklarından linyit ile hidroelektrik enerjisine ve büyük oranda ithal ettiği petrol,

doğal gaz ve kömüre dayanmaktadır. 2018 yılı içerisinde gerçekleşen 223 milyar dolarlık ithalatın, 43 milyar doları (%19,3) enerji ithalatına aittir.

Türkiye küresel bir güç olma yolunda ilerlerken, enerjide dışa bağımlılık oranının düşürülmesi, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve aynı zamanda cari açığın azaltılması öncelikli olarak ele alınması gereken meselelerdir. Enerjide dışa bağımlılık oranının yıllar itibarıyla artmasında en önemli etken ise, doğal gaz tüketiminin artması ve buna bağlı olarak tüketilen doğal gazın neredeyse tamamının (%99,03) ithal edilmesidir. 2018 yılı ulusal doğal gaz tüketiminin %36,89'u elektrik enerjisi üretiminde kullanılmış olup üretilen elektriğin %30,3'ü (92,5 TWh) doğal gaz santrallerinden elde edilmiştir. Alternatif çözümler bulunamadığı müddetçe gelecek yıllarda da elektrik enerjisi talep artışına bağlı olarak doğal gaza dayalı elektrik enerjisi üretimi önemini korumaya devam edecektir.

Türkiye'nin genel enerji arzında dışa bağımlılığının azaltılmasında sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli önemli bir fırsat olarak görünmekle beraber günümüz şartlarında bu dışa bağımlılığın tamamen ortadan kaldırılması pratikte pek mümkün değildir. Yerli üretimin yetersiz olması sebebiyle demir-çelik, petro-kimya, ulaşım vb. sektörler için petrol, doğal gaz ve kömürün ithal edilmesi kaçınılmaz olmaya devam edecektir. Ancak, elektrik enerjisi üretiminde doğal gaza olan bağımlılığın azaltılmasında mevcut tüm teknolojiler arasında teknik olarak toplamda en yüksek potansiyele (56.000 MW) sahip olan güneş enerjisi önemli bir kaynak olarak görülmektedir. Bu nedenle, Türkiye elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistemlerin gelişimi; enerji arz güvenliğinin sağlanması, ulusal şebeke, ekonomi ve çevre açısından önem arz etmektedir.

Türkiye bulunduğu coğrafi konum itibarıyla yüksek güneş ışınım değerine sahip olmasına rağmen, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimini uzun yıllar ihmal etmiştir. Bu ihmalin altında yatan temel olgu ise, geleneksel elektrik enerjisi üretim yöntemleriyle kıyaslandığında, fotovoltaik teknolojisinin "pahalı" olarak değerlendirilmiş olması ve buna bağlı olarak da bekle-gör politikasının benimsenmiş olmasıdır. Ülke ekonomik şartları göz önünde bulundurulduğunda bu durum anlaşılabilir olmaktadır. Ancak, Hintli nükleer fizikçi Dr. Homi Jehangir Bhabha, çağımızın en önemli sorunlarından biri olan enerji konusunda söylemiş olduğu

“olmayan enerji en pahalı enerjidir” ifadesini de unutmamak gerekir (United States Delegation, 1964: 57).

Türkiye sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmekte geç kalmış olsa da, son yıllarda elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik sistem payının artırılması yönünde olumlu gelişmelerin olduğu ifade edilebilir. Uygulanan teşvik politikaları neticesinde, 2014 yılında 40 MW olan kurulu güç kapasitesi 2018 yılı sonu itibarıyla 5.063 MW düzeyine ulaşmıştır. Ancak, fotovoltaik sistem kurulu güç kapasitesinin artışı kadar önemli olan bir diğer husus ise, bu alanda yerli üretim kabiliyetinin geliştirilmesi olacaktır. Türkiye’de bir çok firma üretim yaparken dünyadaki belli başlı üreticilerin geliştirmiş olduğu mevcut sistemleri kullanmakta, üretim sırasında ihtiyaç duyulan önemli malzemeleri ithal etmektedir. Fotovoltaik tesis kurulumu için sistem bileşenlerinin ithal edilmesi, hem ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına, hem de Türkiye’yi bir pazar haline dönüştürerek ithalat giderlerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik teknolojisinde yerli ve milli üretimin gelişmesini sağlayacak etkili politikaların üretilmesi gereklidir.



KAYNAKLAR

- Akova, İ. (2008). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*, Ankara: Nobel Yayınları.
- Alhouli, O. J. (2017). *Using solar energy in Kuwait to generate electricity instead of natural gas* (Yüksek Lisans Tezi), Manhattan: Kansas State University Department of Electrical and Computer Engineering College of Engineering.
- Altuntop, N. ve Erdemir, D. (2013). “Dünyada ve Türkiye’de güneşenerjisi ile ilgili gelişmeler”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 54(639), 69-77.
- Aydın, F. F. (2010). “Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme”, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (35), 317-340.
- Başay, V., Eken, R. ve Yılmaz, G. (2019). “Orta Yükseklikte Dağlık Bölgelerde Kurulan Güneş Enerjisi Santralinde Fotovoltaik Modüllerin Yaşlanmasının Araştırılması”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 325-336.
- Batur, H. (2013). *Güneş Gözelerinin Modellenmesi ve Verimlilik* (Yüksek lisans tezi), Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bavbek, G. (2015). “Türkiye’de Fotovoltaik Güneş Enerjisi Piyasası: Olanaklar ve Zorluklar”, *Ekonomi ve Dış Politika Araştırmalar Merkezi*. (https://edam.org.tr/wp-content/uploads/2015/05/EDAM_Solar_2015May%C4%B1s.pdf, Erişim tarihi:07.10.2019).
- Bayard, W. (1974, 5 Temmuz). As Energy Grows Scarcer, Science Again Looks to the Sun, *The New York Times*, 31.
- Beltran, A. (2018). “Introduction: Energy in History, the History of energy”, *Journal of Energy History*. (energyhistory.eu/en/node/84, Erişim tarihi:28.05.2019).
- Bertran, B. L. (2009). *Biodiesel Cost Analysis in Spain and Turkey* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: ITU Institute of Science and Technology.
- Bilginoğlu, M. A. (1991). “Gelişmekte Olan Ülkelerde Enerji Sorunu ve Alternatif Enerji Politikaları”, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (9), 122-147.
- Bilmez, A. (2015). “Piyasa Analizleri”, *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Ocak-Şubat 2015 Bülteni*, (6), 4-36.
- BP. (2018). “BP Statistical Review of World Energy-All Data, 1965-2018”, *British Petroleum*. (<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, Erişim tarihi:29.05.2019).
- BP. (2019a). “Energy Outlook 2019 edition”, *British Petroleum*. (<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>, Erişim tarihi:21.05.2019).
- BP. (2019b). “BP Energy Outlook 2019 summary tables”, *British Petroleum*. (<http://www.bp.com/energyoutlook>, Erişim tarihi:21.05.2019).
- BP. (2019c). “Energy Outlook 2019 Chart Data Pack”, *British Petroleum*. ([www.bp.com > corporate > xlsx](http://www.bp.com/corporate/xlsx), Erişim tarihi:20.05.2019).
- Campbell, M. (2008). “The Drivers of The Levelized Cost of Electricity For Utility-Scale”, *Sunpower*. (<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/vasudev1/docs/sunpower.pdf>, Erişim tarihi:18.08.2020).

- CSB. (2016). “Türkiye Çevre Durum Raporu”, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*. (https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/tcdr_tr_2015.pdf, Erişim tarihi:02.07.2019).
- CSB. (2019a). “Enerji Yatırımları-Termik santraller”, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*. (<https://ced.csb.gov.tr/enerji-yatirimlari-i-82258>, Erişim tarihi:02.07.2019).
- CSB. (2019b). “Enerji Yatırımları-Nükleer santraller”, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*. (<https://ced.csb.gov.tr/enerji-yatirimlari-i-82258>, Erişim tarihi:02.07.2019).
- Cumhurbaşkanlığı. (2019). “On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)”, *Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı*. (<https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf>, Erişim tarihi:19.11.2019).
- Çağıl, G., Türkmen, S. ve Çakır, Ö. (2013). “Enerji ve Makroekonomik Değişkenler Arasındaki İlişki: Türkiye Açısından Bir Uygulama”, *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (58), 161-174.
- Çepel, N. (1995). *Çevre Koruma ve Ekoloji Terimleri Sözlüğü: Türkçe-Almanca-İngilizce*, İstanbul: Tema Vakfı Yayınları.
- Dahl, R. A. (1957). “The Concept of Power”, *Behavioral Science*, 2(3), 201-215.
- DEK. (2007). *Hidrolik ve Yenilenebilir Enerji Çalışma Grubu Hidrolik Enerji Alt Çalışma Grubu Raporu*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.
- DEK. (2009). *Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara: EKC Form Ofset.
- DOE. (2019). “The Solar Energy Technologies Office-Photovoltaics”, *US Department of Energy*. (<https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaics>, Erişim tarihi:22.15.2019).
- Doğanay, H. ve Çoşkun, O. (2017). *Enerji Kaynakları (3b.)*, Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık.
- DPT. (2001). *Sekizinci Kalkınma Planı: Elektrik Enerjisi Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı.
- DSİ. (2019). “Atatürk Barajı”, *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*. (<http://www.dsi.gov.tr/projeler/ataturk-baraji>, Erişim tarihi:12.12.2019).
- EERE. (2019). “The History of Solar”, *U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*. (https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf, Erişim tarihi:27.07.2019).
- EIA. (2019). “Electric Power Monthly with Data for July 2019”, *U.S. Energy Information Administration*. (<https://www.eia.gov/electricity/monthly/archive/september2019.pdf>, Erişim tarihi:17.10.2019).
- EİGM. (2019a). “Güneş Enerjisi ve Teknolojileri”, *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. (http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx, Erişim tarihi:01.08.2019).
- EİGM. (2019b). “YEGM’nin Güneş Enerjisi Çalışmaları”, *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. (http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_calismalari.aspx, Erişim tarihi:06.12.2019).
- EİGM. (2019c). “Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)”, *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. (<http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>, Erişim tarihi:09.12.2019).

- EİGM. (2019d). “Türkiye’nin Hidroelektrik Potansiyeli”, *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. (http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/h_turkiye_potansiyel.aspx, Erişim tarihi:10.11.2019).
- El-Shimy, M., Abdelaziz, A., Oliba, K., AbdEl-hameed Kh.A., Selim O.A., Helal R.M., Asaad R.A., AbdEl-nasser R., Email R., Tolba S.H., Zain S.S. ve Essam R. (2018). “*Experimental Analysis of Conditions Based Variations of Characteristics and Parameters of Photovoltaic Modules*”, 3rd IUGRC International Undergraduate Research Conference, Cairo. DOI: 10.6084/m9.figshare.6199253
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında, (2011, Ocak 8). “Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında”, *Resmi Gazete* (Sayı: 28022). (<https://www.resmigazete.gov.tr/ilanlar/eskiilanlar/2011/08/20110811-4.htm#%C3%A707>, Erişim tarihi:22.12.2019).
- EPDK. (2010-2018). “Doğal Gaz Piyasası Sektör Raporları”, *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*. (<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-94/dogalgazyillik-sektor-raporu>, Erişim tarihi:11.10.2019).
- EPDK. (2015-2018). “Elektrik Piyasası Yıllık Sektör Raporları”, *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*. (<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-24-3/elektrikyillik-sektor-raporu>, Erişim tarihi:15.10.2019).
- EPDK. (2019). “Elektrik Piyasası Kanunlar Listesi”, *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*. (<https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-0-2256/kanunlar>, Erişim tarihi:21.12.2019).
- EPIAŞ. (2019a). “Gerçek Zamanlı Tüketim”, *Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. Şeffaflık Platformu*. (<https://seffalik.epias.com.tr/transparency/tuketim/gerceklesen-tuketim/gercek-zamanli-tuketim.xhtml>, Erişim tarihi:26.12.2019).
- EPIAŞ. (2019b). “Gerçek Zamanlı Üretim”, *Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. Şeffaflık Platformu*. (<https://seffalik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml>, Erişim tarihi:26.12.2019).
- EPIAŞ. (2020). “Dönemlik Fiyat Ortalamaları”, *Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.* (<https://rapor.epias.com.tr/rapor/xhtml/ptfSmfDonemlik.xhtml>, Erişim tarihi:12.03.2020).
- Erdal, L. (2011). *Enerji Arz Güvenliğini Etkileyen Faktörler ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Alternatifi* (Doktora Tezi), Aydın: Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Eriksson, H. (2019). “Introduction to Radiation Theory”, *Lund University*. (https://www.nateko.lu.se/sites/nateko.lu.se/files/radiation_theory_he2015.pdf, Erişim tarihi:12.07.2019).
- ETKB. (2019a). “Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu”, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. (https://enerjiapi.etkb.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/Raporlar/Enerji_Talep_Projeksiyonu/114176-turkiye_elektrik_enerjisi_talep_projeksiyonu_raporu.pdf, Erişim tarihi:14.09.2019).
- ETKB. (2019b). “Güneş”, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. (<https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>, Erişim tarihi:12.06.2019).
- ETKB. (2019c). “Rüzgâr”, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. (<https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>, Erişim tarihi:10.11.2019).
- EÜ–GEE. (2019). “Enstitü Hakkında”, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü*. (https://eusolar.ege.edu.tr/tr-3307/enstitu_hakkinda.html, Erişim tarihi:05.09.2019).

- Fraunhofer ISE. (2019). “Photovoltaics Report”, *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, Freiburg.
- Gazibey, Y. (2012). *Türkiye İçin Fotovoltaik Güneş Enerjisi Yol Haritası* (Doktora Tezi), Ankara: Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü.
- Gedik, Ö. T. (2015). *Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Çevresel Etkileri* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Göksu, Ç. (1999). “*Güneş Kent, Güneş Enerjili Yerleşim Modeli*”, Ankara: Güneş Yayınları.
- Graf, R. F. (1999). *Modem Dictionary of Electronics 7th ed*, United States of America: Butterworth-Heinemann publications.
- GÜYAD. (2019). “YEKA 2 GES İhalesi Hakkında”, *Güneş Enerjisi Yatırımcıları Derneği*. (<http://www.guyad.org/TR,185/yeka-2-ges-ihalesi-hakkinda.html>, Erişim tarihi:23.12.2019).
- Hoang, S. (2017). “The Environmental History of Solar Photovoltaic Cells”, *Wellesley College Digital Scholarship and Archive*. (http://repository.wellesley.edu/library_awards/24, Erişim tarihi:23.07.2019).
- IEA. (2014a). “Technology Roadmap Solar Thermal Electricity 2014 Edition”, *International Energy Agency*. (<https://webstore.iea.org/technology-roadmap-solar-thermal-electricity-2014>, Erişim tarihi:18.07.2019).
- IEA. (2014b). “Energy Policies of IEA Countries The United States 2014 Review”, *International Energy Agency*. (<https://webstore.iea.org/energy-policies-of-iea-countries-the-united-states-2014-review>, Erişim tarihi:22.10.2019).
- IEA. (2018). “World Energy Outlook 2018”, *International Energy Agency*. (<https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>, Erişim tarihi:21.05.2019).
- IEA. (2019a). “Statistics”, *International Energy Agency*. (<https://www.iea.org/statistics/>, Erişim tarihi:21.05.2019).
- IEA. (2019b). “World Energy Outlook 2019 Executive Summary”, *International Energy Agency*. (<https://webstore.iea.org/download/summary/2467?fileName=1.English-Summary-WEO2019.pdf>, Erişim tarihi:08.01.2020).
- IEA. (2019c). “PVPS 2019 Snapshot of Global PV Markets”, *International Energy Agency*. (https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/IEA-PVPS_T1_35_Snapshot2019-Report.pdf, Erişim tarihi:04.10.2019).
- IEA. (2019d). “Global Energy & CO2 Status Report 2018”, *International Energy Agency*. (<https://webstore.iea.org/global-energy-co2-status-report-2018>, Erişim tarihi:24.05.2019).
- IEA. (2019e). “PVPS Trends in Photovoltaics applications 2019”, *International Energy Agency*. (<https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf>, Erişim tarihi:04.01.2020).
- Illich, I. (1983). “The Social Construction of Energy”, *New Geographies 2: Landscapes of Energy-Harvard University Press(2010)*,11-19. (Metin, daha önce yayımlanmamış bir açılış konuşmasıdır, “The Basic Option Within Any Future Low-Energy Society,” El Colegio de Mexico, Temmuz 1983.)
- IMF. (2019b). “Primary Commodity Price System”, *The International Monetary Fund*. (<https://data.imf.org/?sk=471DDDF8-D8A7-499A-81BA-5B332C01F8B9&sId=1393552803658>, Erişim tarihi:05.10.2019).

- IMF. (2020a). “Primary Commodity Price System”, *The International Monetary Fund*. (<https://data.imf.org/?sk=471DDDF8-D8A7-499A-81BA-5B332C01F8B9&sId=1547558078595>, Erişim tarihi:03.01.2020).
- IRENA. (2012a). “Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series-Solar Photovoltaics”, *International Renewable Energy Agency*. (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf, Erişim tarihi:27.09.2019).
- IRENA. (2012b). “Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series Concentrating Solar Power”, *International Renewable Energy Agency*. (https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf, Erişim tarihi:18.07.2019).
- IRENA. (2013). “Concentrating Solar Power Technology Brief”, *International Renewable Energy Agency*. (<https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E10-Concentrating-Solar-Power.pdf>, Erişim tarihi:18.07.2019).
- IRENA. (2019a). “Renewable Power Generation Costs in 2018”. *International Renewable Energy Agency*. (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf, Erişim tarihi:19.07.2019).
- IRENA. (2019b). “Data & Statistics”, *International Renewable Energy Agency*, (<https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>, Erişim tarihi:03.01.2020).
- İLBANK. (2019). “Güneş Enerjisi”, *İller Bankası*. (<https://www.ilbank.gov.tr/index.php?Sayfa=htmlsayfa&hid=2160>, Erişim tarihi:04.11.2019).
- İmer, S. (2008). “Türkiye’nin Demir Çelik Sanayinin Durumu ve Geleceği”, *Cumhuriyet Gazetesi Strateji Eki*, (27), 3-5.
- İsmayilov, S. (2018). *Enerji Güvenliği Bağlamında Türkiye ve Azerbaycan’ın Enerji Politikası* (Yüksek Lisans Tezi), Ankara: Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- İTÜ. (2019). “Fotovoltaik (Güneş Pilleri)”, *İstanbul Teknik Üniversitesi*. (<https://web.itu.edu.tr/~kaymak/PV.html>, Erişim tarihi:06.08.2019).
- Jäger, K., Isabella, O., Smets, A., Swaaij, R. ve Zeman, M. (2014). *Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems*, Delft: Delft University of Technology.
- Jäger-Waldau, A. (2018). “PV Status Report 2018”, *Publications Office of the European Union*, Luxembourg. DOI:10.2760/826496.
- Karabulut, B. (2016). “Enerji Güvenliğine Küresel Ölçekte Bir Bakış”, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 15 (1), 31-54.
- Kenton, W. (2019). “What Is a Feed-In Tariff (FIT)?” *Investopedia*. (<https://www.investopedia.com/terms/f/feed-in-tariff.asp>, Erişim tarihi:29.12.2019).
- Kibria, M. T., Ahammed, A., Sony, S. M., Hossain, F. ve Islam, S. U. (2014). “A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology”, *Proceedings of 5th International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh*, 51-53.
- Kılıç, F. Ç. (2015). “Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri”, *Mühendis ve Makina*, 56 (671), 28-40.

- Koç, E. ve Kaya, K. (2015). “Enerji Kaynakları - Yenilenebilir Enerji Durumu”, *Mühendis ve Makina*, 56 (668), 36-47.
- Koç, E. ve Şenel, M. C. (2013). “Dünyada ve Türkiye’de Enerji-Genel Değerlendirme”, *Mühendis ve Makina*, 54 (639), 32-44.
- Koçaslan, G. (2006). “Türkiye’nin Enerji Kaynakları ve Alternatif Bir Kaynak Olarak Rüzgar Enerjisinin Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi)”, İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler.
- KPMG. (2019). “Sektörel Bakış – Enerji”, *KPMG Türkiye*. (<https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/tr/pdf/2019/03/sectorel-bakis-2019-enerji.pdf>, Erişim tarihi:29.05.2019).
- Luceño-Sánchez, J. A., Díez-Pascual, A. M. ve Peña Capilla, R. (2019). “Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments”, *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4), 976.
- Mayer, J. (2015). “Güneş Enerjisi, Almanya’da Elektrik Fiyatlarını Düşürdü”, *Gündergi*, (7), 46-50.
- MEB. (2012). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Önemi*, Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları.
- MİLGES. (2019). “Proje Bilgileri”, *Milli Güneş Enerjisi Santrali Projesi*. (http://milges.gov.tr/proje_bilgileri.html, Erişim tarihi:26.07.2019).
- MMO. (2008). “Yenilenebilir Enerji Kaynakları”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*. (<https://www.mmo.org.tr/kitaplar/yenilenebilir-enerji-kaynaklari>, Erişim tarihi:04.07.2019).
- Narayan, P. K. ve Smyth, R. (2008). “Energy consumption and real GDP in G7 countries: New evidence from panel cointegration with structural breaks”, *Energy Economics*, 30 (5), 2331-2341. DOI: 10.1016/j.eneco.2007.10.006.
- NREL. (2019a). “Best Research Cell Efficiency Chart”, *The National Renewable Energy Laboratory*. (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, Erişim tarihi:25.07.2019).
- NREL. (2019b). “Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart”, *The National Renewable Energy Laboratory*. (<https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>, Erişim tarihi:25.07.2019).
- Oğuz, Y., Karakan, A. ve Uslu, B. (2015). “Afyonkarahisar’da Kurulu Olan Monokristal, Polikristal ve İnce Film Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi”, *Tesisat Mühendisliği*, (149), 47-58.
- Özçelik, S. (2016). “Fotovoltaik (PV) Teknolojileri”, *Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi*. (<http://fotonik.gazi.edu.tr/posts/download?id=16955>, Erişim tarihi:25.07.2019).
- Özek, F. (1998). *Katihal Elektroniği*, Ankara: A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları.
- Öztürk, H. H. (2017). “Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler”, *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*. (http://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf, Erişim tarihi:05.08.2019).
- Pardal, A., Pinto, J. ve Fernandes, J. (2019). “Evaluation of Energy Production Through Solar Photovoltaic Technology for Self-Consumption in the Parish Council of São Bartolomeu de Messines, Portugal – Preliminary Study”, *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 111-120. DOI:10.12911/22998993/105336.
- Power From Sunlight. (2019). “Why Is A Solar PV System The Best Technology Of Solar Energy?” *Power From Sunlight*.

- (<https://www.powerfromsunlight.com/solar-pv-system-best-technology-solar-energy/>, Erişim tarihi:22.07.2019).
- Quaschnig, V. (2016). *Understanding Renewable Energy Systems*, Routledge.
- REN21. (2019). “Renewables 2019 Global Status Report”, *Renewable Energy Policy Network for The 21st Century*. (https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf, Erişim tarihi:03.10.2019).
- Rowe, M. (2019). *Artificial intelligence in clinical practice: Implications for physiotherapy education*.
- Sabah, İ. (2015). *Analysis of the Expected Development of Solar PV Market in Turkey* (Yüksek Lisans Tezi), Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology.
- Saygın, H. (2006). “Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye”, *Türk Harb-İş Dergisi* (219), 26-31.
- Seydioğulları, H. S. (2013). “Sürdürülebilir Kalkınma için Yenilenebilir Enerji”, *Planlama*, 23(1), 19-25. DOI: 10.5505/planlama.2013.14633.
- SHURA. (2018). “Türkiye’nin Enerji Sisteminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı: İletimde Genişleme ve Esneklik Seçenekleri”, *SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi*. (https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2018/12/SHURA_T%C3%BCrkiye%E2%80%99nin-Enerji-Sisteminde-Yenilenebilir-Kaynaklar%C4%B1n-Artan-Pay%C4%B1.pdf, Erişim tarihi:27.12.2019).
- SHURA. (2019). “Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri”, *SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi*. (<https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/12/Turkiye-ulasirma-sektorunun-donusumu-Elektrikli-araclar%C4%B1n-Turkiye-dagitim-sebekesine-etkileri-.pdf>, Erişim tarihi:21.01.2020).
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A. ve Fayaz, H. (2011). “A review on global solar energy policy”, *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(4), 2149-2163.
- Solar Power Europe. (2019). “Global Market Outlook For Solar Power/2019-2023”, *Solar Power Europe*. (<https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/SolarPower-Europe-Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf>, Erişim tarihi:04.10.2019).
- Sonenblum, S. (1978). *The Energy Connections: Between Energy and The Economy*, Ballinger Publishing Company. ISBN: 0884100766, 9780884100768.
- SRM University. (2007). “PH0101 Unit-5 Lecture-2”, *SRM University*. (www.srmuniv.ac.in/openware_dloads/u5Lecture-2.ppt, Erişim tarihi:05.09.2020).
- Şahan, M., Tokat, Ö. ve Okur, Y. (2015). “Osmaniye’de Günlük Toplam Güneş Işınım Ölçümleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Dergisi*, 10 (2), 97-105.
- Şençiçek, H. (2017). *Yüzer ve Arazi Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Teknik Ve Ekonomik Açından İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.
- TBMM. (2019). “TBMM Mevzuat Bilgi Sistemi”, *Türkiye Büyük Millet Meclisi*. (https://mevzuat.tbmm.gov.tr/mevzuat/faces/maddetaylari;jsessionid=i9Eos7aUnSZ6ccZgaYaMqpdnlmcd_9fgpd0BQnyZnY9V6NLoO5f0!1376496849?psira=54412 Erişim tarihi:21.12.2019).

- TCMB. (2019). “Enflasyon Raporu 2019-III (31 Temmuz 2019)”, *Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası*. (https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/cd8859a8-736f-42fe-ac88-758af65fe9d8/Kutu+3.1_2019-3.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-cd8859a8-736f-42fe-ac88-758af65fe9d8-mN74hv3, Erişim tarihi:02.01.2020).
- TCMB. (2020). “Elektronik Veri Dağıtım Sistemi”, *Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası*. (https://evds2.tcmb.gov.tr/index.php?/evds/serieMarket/#collapse_2, Erişim tarihi:03.01.2020).
- TEİAŞ. (2012). “Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2012-2021)”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.* (<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-66-3/elektrikuretim-kapasite-projeksiyonlari#>, Erişim tarihi:29.11.2019).
- TEİAŞ. (2018). “Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2018-2022)”. *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.* (<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-66-3/elektrikuretim-kapasite-projeksiyonlari#>, Erişim tarihi:29.11.2019).
- TEİAŞ. (2019). “Elektrik İstatistikleri”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.* (<https://www.teias.gov.tr/tr/i-kurulu-guc-1>, Erişim tarihi:22.11.2019).
- Telemcioğlu, F. (2018). “Güneş Enerjisi Yol Haritası Sunumu”. 3. *SOLARENA Etkinliği*. (https://gunder.org.tr/wp-content/uploads/SOLARENA-2018-SUNUMU_Faruk-Telemcio%20C4%9Flu.pdf, Erişim tarihi:22.01.2020).
- TRT. (2020). “Ekonomi”, *Türkiye Radyo Televizyon Kurumu*. (<https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/yeka-ile-110-milyon-dolarlik-dogalgaz-ithalati-onlenecek-387959.html>, Erişim tarihi:02.01.2020).
- Tsao, J., Lewis, N. ve Crabtree, G. (2019). “FAQs”, *Sandia National Laboratories*. (<https://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf>, Erişim tarihi:07.12.2020).
- TSKB. (2018). “Sektörel Görünüm: Enerji”, *Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş.* (<http://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektorel-gorunumu.pdf>, Erişim tarihi:28.12.2019).
- TÜBA. (2018). “TÜBA-Güneş Enerjisi Teknolojileri Raporu”. *Türkiye Bilimler Akademisi*. (<http://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/G%C3%BCne%C5%9F%20Enerjisi%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>, Erişim tarihi:09.12.2019).
- TÜİK. (2019a). “Dış Ticaret İstatistikleri”, *Türkiye İstatistik Kurumu*. (<http://tuik.gov.tr>, Erişim tarihi:22.11.2019)
- TÜİK. (2019b). “Çevre ve Enerji”, *Türkiye İstatistik Kurumu*. (<http://www.tuik.gov.tr/>, Erişim tarihi:05.10.2019).
- TÜİK. (2019c). “Enerji İstatistikleri”, *Türkiye İstatistik Kurumu*. (<http://www.tuik.gov.tr>, Erişim tarihi:12.10.2019).
- Türkyılmaz, O. (2011). “Türkiye’nin Enerji Görünümü Mayıs 2011 Sorunlar Çözümler”, *Makina Mühendisleri Odası*. (https://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/88d93f6e293c357_ek.pdf?tipi=68&turu=X&sube=1, Erişim tarihi:21.05.2019).
- UN ESCAP. (2008). “Energy Security and Sustainable Development in Asia and the Pacific”, *The Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UN ESCAP)*. (<https://www.unescap.org/sites/default/files/energy-security-ap.pdf>, Erişim tarihi:25.12.2019).

- United States Delegation. (1964). *Atoms For Peace Conference, 1964*, U.S. Atomic Energy Commission.
- USPV. (2019). “Understanding Renewable Energy Credits & Certificates”, *US Photovoltaics Inc.* (<http://timberrockes.com/pdfs/USPV-SRECSprimer.pdf>, Erişim tarihi:25.12.2019).
- WEC. (2011). “World Energy Insight 2011”, *World Energy Council.* (https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_World-Energy-Insight_2011_WEC.pdf, Erişim tarihi:08.01.2020).
- Wiser, R., Hamrin, J. ve Wingate, M. (2002). “Renewable Energy Policy Options for China: A Comparison of Renewable Portfolio Standards, Feed-in Tariffs, and Tendering Policies”, *Center for Resource Solutions.* (https://resourcesolutions.org/wp-content/uploads/2015/08/IntPolicy-Feed-in_LawsandRPS.pdf, Erişim tarihi:23.09.2020).
- WNA. (2011). “Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources”, *World Nuclear Association.* (http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf, Erişim tarihi:05.01.2020).
- World Bank. (2019a). “World Development Indicators”, *The World Bank.* (<https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>, Erişim tarihi:05.07.2019).
- World Bank. (2019b). “Countries and Economies”, *The World.* (<https://data.worldbank.org/country/turkey?locale=tr>, Erişim tarihi:04.11.2019).
- World Steel Association. (2019). “Steel Statistical Yearbook 2019: Concise version”, *The World Steel Association.* (<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7aa2a95d-448d-4c56-b62b-b2457f067cd9/SSY19%2520concise%2520version.pdf>, Erişim tarihi:03.01.2020).
- Yazar, Y. (2011). “Enerji İşleri Bağlamında Türkiye ve Orta Asya Ülkeleri”, *Ahmet Yesevi Üniversitesi.* (https://www.ayu.edu.tr/static/kitaplar/enerji_raporu.pdf, Erişim tarihi:03.10.2020).
- YEGM. (2014). “Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı”, *Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü.* (<https://www.ebrd.com/documents/admin/trkiye-ulusal-yenlenebilir-enerji-eylem-planı.pdf>, Erişim tarihi:19.11.2019).
- YEGM. (2019). “Güneş Enerjisi ve Teknolojileri” *Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü.* (http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx, Erişim tarihi:09.08.2019).
- Yılmaz, M. (2014). “STEAM Enerji Arenası Konuşması – İstanbul (04.09.2014)”, *T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.* (<https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/17-113/konusma-metinleri>, Erişim tarihi:23.12.2019).
- Zarghani, S. H. (2008). “Designing a New Model to Measure National Power of the Countries”, *Journal of Applied Sciences*, 8 (2), 230-240.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Akın, Emre

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri :

Medeni hali :

Telefon :

Faks :

e-mail :

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	2009
Lise	Dolapoğlu Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013	Elektrik Üretim A.Ş.	Mühendis
2013	Başkent Elektrik Dağıtım A.Ş.	Mühendis
2012	Meram Elektrik Dağıtım A.Ş.	Mühendis
2010	Soykan Elektrik Taahhüt Tic. Ltd. Şti.	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce



