

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE’DE ENERJİ SEKTÖRÜNÜN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ
KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANBERK ÜNAL

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. EMİN AÇIKKALP

BİLECİK, 2022

10480172

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE’DE ENERJİ SEKTÖRÜNÜN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ
KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANBERK ÜNAL

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. EMİN AÇIKKALP

BİLECİK, 2022

10480172

BEYAN

‘Türkiye’de Enerji Sektörünün Genişletilmiş Ekserji Analizi Kullanılarak Değerlendirilmesi’ adlı yüksek lisans yeterlik tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Canberk ÜNAL

Tarih

İmza

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Prof. Dr. Emin AÇIKKALP'e değerli katkıları için teşekkür eder, saygılar sunarım.

Savunma sınavımda yer alan değerli jüri üyelerine ve danışman hocam Sayın Prof. Dr. Emin AÇIKKALP'e tezin son haline gelmesindeki katkıları nedeniyle teşekkür ederim.

Son olarak, bu güne kadar verdikleri emekleri ve sabırları nedeniyle aileme teşekkür ederim.

Canberk ÜNAL



ÖZET

TÜRKİYE’DE ENERJİ SEKTÖRÜNÜN GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Enerji, insanoğlunun temel ihtiyaçlarını karşılamada ve ülkelerin toplumsal olarak kalkınabilmeleri için gerekli olan en önemli unsurlar arasında gösterilebilir. Türkiye günümüzde büyük ölçüde fosil kaynaklara güvenmektedir ancak artan enerji tüketimi ile birlikte fosil enerji kaynaklarının kullanılabilir rezervleri hızla azalmaktadır. Bu durum hem çevreyi hem de dış ticaret dengesini olumsuz etkiler. Yenilenebilir enerji, potansiyel olarak bu etkileri azaltabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile ulusal çıkarlarımız doğrultusunda ithal yakıtlara olan bağılılığın en aza indirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada Türkiye'deki enerji sektörü, referans olarak 2019 yılı için genişletilmiş ekserji analizi metodu kullanılarak incelenmiştir. Genişletilmiş ekserji analizi metodu kullanılırken EnergyPlan (15.1) yazılımından yararlanılmıştır. Genişletilmiş ekserji analizi, iş gücü, sermaye akışı ve çevresel etkiler gibi hususları geleneksel ekserji kavramına entegre edilerek hesaplanır ve analize dahil edilir. Tüm bu kaynaklar, girdilerin ne kadar verimli kullanıldığını görmek için ekserjetik eşdeğerlere dönüştürülür. Genişletilmiş ekserji analizi uygulanan 2019 yılı için iki farklı senaryo incelenmiştir. İlk senaryo, enerji sektörünün gerçek koşullarının değerlendirilmesiyle ilgili olup, ikinci senaryo ise elektriğin %100'ünün yenilenebilir kaynaklardan üretildiği varsayımına dayanmaktadır.

Bu iki senaryo için iş gücü, sermaye, malzeme tüketimi ve çevresel etki unsurlarının karşılaştırmaları yapıp sonuçlar sunulmuştur. Bu sonuçlar Türkiye'nin istihdam, ekonomik kalkınma ve çevresel etki gibi çeşitli alanlarda bizlere fikirler sunmaktadır.

Anahtar Kelime: Ekserji, Genişletilmiş Ekserji, Enerji Sektörü, Sürdürülebilirlik

ABSTRACT

EVALUATION OF TURKISH ENERGY SECTOR USING EXTENDED EXERGY ANALYSIS

Energy can be considered among the most crucial factors to meet humankind's needs and develop countries further. Turkey currently relies heavily on fossil resources, but with increasing energy consumption, the usable reserves of fossil energy resources are rapidly decreasing. This situation negatively affects the environment and the foreign trade balance, and renewable energy can potentially reduce these effects. With renewable energy sources, dependence on imported fuels should be minimized in line with our national interests.

In this study, the energy sector in Turkey, the year 2019 was taken as a reference and examined using the extended exergy analysis method. The extended exergy analysis method was applied with the help of EnergyPlan (15.1) software. Extended exergy analysis is calculated and included by integrating labor, capital flow, and environmental effects into the traditional exergy concept. All these resources are converted into exergetic equivalents to see how efficiently the inputs are used. Two different scenarios were analyzed for 2019, in which extended exergy analysis was applied. The first scenario is related to assessing the actual conditions of the energy sector. In contrast, the second scenario assumes that 100% of the electricity is produced from renewable sources.

For these two scenarios, labor force, capital, material consumption, and environmental impact factors were compared, and the results were presented. These results provide us with ideas in various fields such as employment, economic development, and environmental impact in Turkey.

Key Words: Exergy, Extended Exergy, Energy Sector, Sustainability

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ	iv
GRAFİKLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	viii
1.GİRİŞ	1
1.1.Motivasyonve Amaç.....	3
1.2.Literatür Taraması	3
2.TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ VE ELEKTRİK ÜRETİM SEKTÖRÜ	8
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	8
2.1.1. Güneş Enerjisi.	8
2.1.2. Rüzgâr Enerjisi.....	10
2.1.3. Hidroelektrik Enerjisi	12
2.1.4. Hidrojen Enerjisi.....	12
2.1.5. Jeotermal Enerjisi.	14
2.1.6. Biyokütle Enerjisi	15
2.2. Yenilenebilir Enerjide Kurulu Güç Analizi	16
2.3. Yenilenebilir Enerjide Elektrik Üretim Analizi.....	17
2.4. Türkiye’de Elektrik Üretim Sektörü.....	17
2.4.1. Elektrik Talep Analizi	18
2.4.2. Türkiye’de Kurulu Güç.....	19
2.4.3. Üretim ve Tüketim	20

3. GELENEKSEL VE GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ.....	22
3.1. Geleneksel Ekserji.....	22
3.1.1.Ekserji İfadeleri.....	22
3.2. Genişletilmiş Ekserji Analizi	24
4. GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ MODELLEMESİ İÇİN SİSTEM AÇIKLAMASI	27
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
6. SONUÇLAR	37
KAYNAKÇA	38



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Güneş Enerjisi Dönüşümleri	9
Tablo 2.2. Yenilenebilir Enerji Kurulu Güç Gelişimi (MW)	19
Tablo 2.3. Yenilenebilir Elektrik Üretim Gelişimi (MW)	19
Tablo 2.4. Türkiye Elektrik Üretimi 2018-2019	23
Tablo 2.5. Türkiye Elektrik Enerji Üretiminde Kullanılan Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı 2018-2019.....	24
Tablo 5.1. Genişletilmiş Ekserji Analizinde Kullanılan Veriler	33
Tablo 5.2. 2019 Yılı İçin Yakıt Tüketimi (Mevcut Durum)	34
Tablo 5.3. 2019 Yılı İçin Yakıt Tüketimleri (%100 Yenilenebilir Senaryo)	34
Tablo 5.4. Enerji Talep ve Arz Değerleri (Mevcut Durum).....	35
Tablo 5.5. Enerji Talep ve Arz Değerleri (%100 Yenilenebilir Senaryo)	36
Tablo 5.6. Genişletilmiş Ekserji Analizinin Sonuçları (PJ)	37
Tablo 5.7. Genişletilmiş Ekserji Değerlendirme Endeksleri.....	37
Tablo 5.8. Mevcut Durum ve %100 Yenilenebilir Senaryoları İçin Sermaye Payı Yüzdeleri	40

GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa No

Grafik 1.1. Elektrik Üretim Kaynaklarının Dağılımı	1
Grafik 2.1. Türkiye’de Rüzgar Enerji Santralleri İçin Kurulum (MW)	11
Grafik 2.2. Türkiye’de Günümüzde İşletme Halinde RES’lerin Bölgesel Dağılımı (MW) ...	11
Grafik 2.3. Özel Sektörün Elektrik Üretimindeki Payı	20
Grafik 2.4. Yıllara Göre Türkiye’nin Elektrik İhtiyacının Artışı.....	21
Grafik 2.5. Türkiye Kurulu Güç Gelişimi (GW).....	21
Grafik 2.6. Türkiye’de 2019 Yılı İçinde Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü Dağılımı.....	22
Grafik 3.1. Bir Prosesin Kaynak Tüketimi, Yıkım ve Kayıp Ekserji Emisyonları ile Ekserji Verimi.....	25

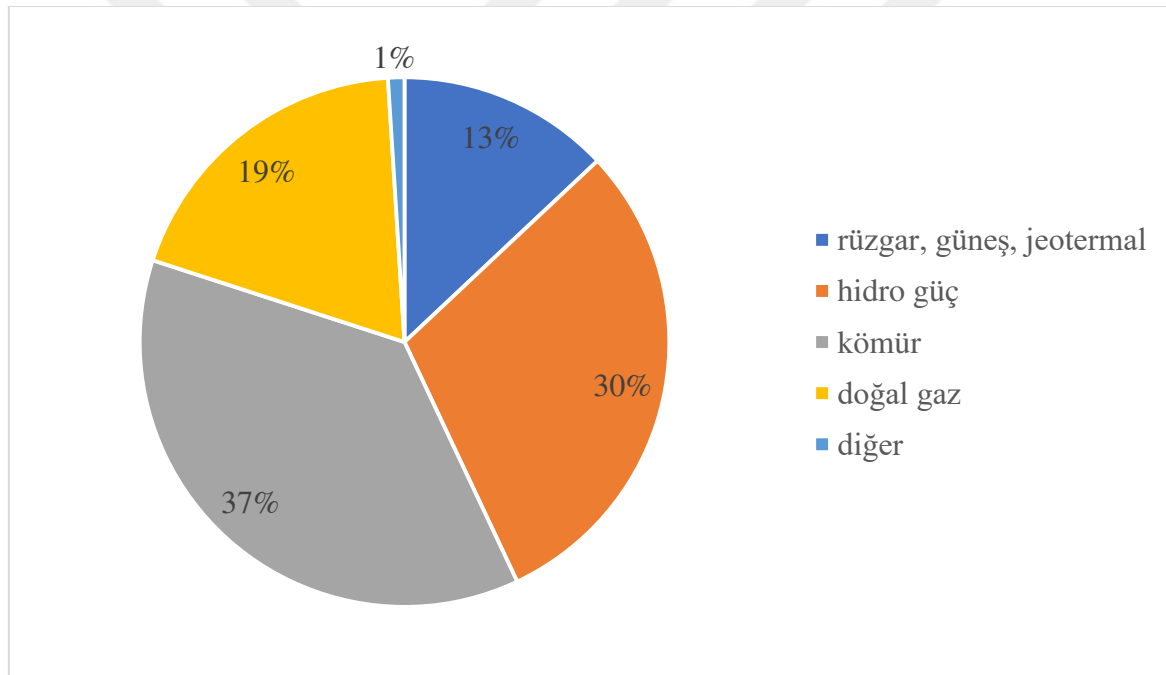
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

E_{in}	: Global Ekserji Akışı
I_d	: Yatay Yüzeydeki Ortalama Güneş Radyasyonu
A_{total}	: Ülkenin Toplam Alanı
ζ	: Güneş Enerjisinin Ekserji Katsayısı
GEA	: Genişletilmiş Ekserji Analizi
E_{x_K}	: Sermayede Somutlaşan Ekserji
E_{x_L}	: Emek İçinde Vücut Bulan Ekserji
$CExC$	: Kümülatif Ekserji Tüketimi
ee_K	: Sermayenin Ekserji Eşdeğeri
N_w	: Çalışan Sayısı
N_{wh}	: Çalışma Saatleri / Yıl Çalışma Saati Sayısı
N_h	: Nüfus Sayısı
$E_{x_{surv}}$	: Hayatta Kalmak İçin Ekserji Gereksinimi
HDI	: İnsani Gelişme Endeksi
HDI_0	: Geleneksel Referans
e_{co_2}	: Emisyon Faktörü
$E_{x_{used}}$	: Tüm Popülasyon Tarafından Tüketilen Ekserji
f	: Ekserji Tüketimi Büyütme Faktörü
S	: Ortalama Ücret
$M2$	: Para Benzeri Dolaşım
α	: Birinci Ekonomik Faktör
β	: İkinci Ekonomik Faktör
Kap	: Sermaye Tükenmesi
Lab	: Emek Tükenmesi
Res	: Kaynak Tükenmesi
e_{kn}	: Kinetik Ekserji
e_{pt}	: Potansiyel Ekserji

e_{ph}	:	Fiziksel Ekserji
e_{ch}	:	Kimyasal Ekserji
u	:	Özgöl İç Enerji
h	:	Özgöl Entalpi
s	:	Özgöl Entropi
P	:	Basınç
T	:	Sıcaklık
R	:	İdeal Gaz Sabiti
C_v	:	Sabit Hacimde Özgöl Isı
C_p	:	Sabit Basınçta Özgöl Isı
P_{0g}	:	Gazın Kısmi Basıncı
P_0	:	Referans Çevre Basıncı
$\dot{E}_F$	:	Yakıtın Ekserji Akımı
$\dot{E}_P$	:	Ürünün Ekserji Akımı
Φ	:	Ekserji Verimi
γ	:	Ekserji Kayıp Oranı
$\dot{E}_L$	:	Kayıp Ekserji Akımı

1. GİRİŞ

Türkiye birincil enerji kaynaklarının büyük bir bölümünü ithal etmektedir (Demirbaş ve Bakis, 2004: 475). Bu enerji talebinin 2013'ten 2034'e kadar yirmi yıl içinde ikiye katlanması beklenmektedir (Sönmez vd., 2017: 302) ve Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığı %70 civarındadır. Elektrik sektöründe durum nispeten daha iyidir. Ancak elektrik enerjisinin ana payı hâlâ ithal edilmesi gereken fosil kaynaklardan sağlanmaktadır (Grafik 1.1). Türkiye'nin dış ticaret açığı dikkate alındığında, bu ithalatın azaltılması ekonomik olarak son derece arzu edilmektedir. 2019 yılında Türkiye'de elektrik enerjisi için yıllık talep 272 TWh elektriktir. Türkiye nüfusunun daha da artacağını varsayarsak, gelecekte enerji talebinde bir artış olacaktır. Bu nedenle yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi kaçınılmazdır.



Grafik 1.1. Elektrik Üretim Kaynaklarının Dağılımı

Kaynak: (Enerji Atlası, 2019)

Farklı çalışmalarda bulunan yazarlar, Türkiye'deki yenilenebilir enerjilerin potansiyelleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Kaygusuz ve Sarı (2003), Evrendilek ve Ertekin (2003), Türkiye'deki yenilenebilir enerji potansiyeli üzerine çalışmalar sunmuştur. Yenilenebilir enerjilerin Türkiye'de ki enerji temini için yenilenebilir enerjinin makul çözüm olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmalar dışında, belirli yenilenebilir enerji türleri için değerlendirmeye alan farklı yazarlar mevcuttur. Örneğin rüzgâr enerjisi potansiyeli Oğulata

(2003) tarafından değerlendirilirken, biyokütle ile ilgili analiz Toklu (2017) ve atıkların kullanımını Baran ve ark. (2016) değerlendirmiştir.

Enerji verimliliğinin, temiz bir çevreyi sürdürmek ve sürdürülebilir bir ekonomiye ulaşmak için bir ön koşul olduğu söylenebilir. Yakın gelecekte enerji ihtiyacını ve karbon emisyonunu azaltmanın en akılcı yoldur. Enerji verimliliği, enerjiyi daha ekonomik (doğalgaz, kömür, elektrik vb.) kullanmak ve iyi yaşam koşullarını etkilemeden daha fazla iyi hizmet üretmek anlamına gelir. Yeni teknolojilerin kullanımıyla enerji tasarrufunun gelişimini gösterir. Çünkü enerji verimliliği, üretimi, kaliteyi, performansını ve en önemlisi toplumsal refahı düşürmeden hizmet miktarı başına kullanılan enerjiyi azaltmaktır. (Aydın, 2016: 411). ‘Sürdürülebilir kavramı ise var olan kaynaklarımızı gelecek nesillere de aktaracak şekilde kullanımını ifade etmektedir. “Sürdürülebilirlik” küresel ısınma sonucu mevcut olan kaynakların tükenmesini baz almıştır. Sürdürülebilirlik, yakın gelecekte de üretebilme olanağının korunması olarak tanımlanmaktadır (Seydioğulları, 2013: 20). Doğada bulunan kaynaklar ve çevre, insan faaliyetleri sonucunda gittikçe daha da zarar görmektedir. Bundan dolayı sürdürülebilirlik kavramı günümüzde çok önemli bir kavram haline gelmiştir. Sürdürülebilir kalkınmanın merkezindeki önemli bir unsur ise enerjidir. Enerjinin sürdürülebilirliğinin kalkınmadaki rolü, uzun bir süre sadece enerjinin tüketicilere nasıl güvenli bir biçimde sunulabileceği noktasında ele alınarak değerlendirilmiştir. Enerji kaynaklarının büyük bir kısmını oluşturan kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilen enerji gün geçtikçe azalmaktadır. Ayrıca fosil yakıtlardan enerji eldesi için kullanılan yöntemler, elde edilen enerjinin dağıtımı ve kullanımı sırasında ortaya çıkan çevre sorunları, bu enerji kaynaklarının ekonomik olarak nasıl kullanılması gerektiği sorusunu da beraberinde getirmiştir. (Aydın, 2016: 415).

Ekserji analizi, enerji sistemlerinin değerlendirilmesi, tersinmezliklerin azaltırken verimlerin artırılması için değerli bir araçtır. Ekserji, bir referans duruma göre termodinamik dengeye getirildiğinde sistemden çıkarılabilecek maksimum işi tanımlayan sistemin bir özelliğidir (Koroneos, 2003: 296). Enerjiden farklı olarak, ekserji korunmaz ve tersinmezlikler nedeniyle sürekli tükenir. Ekserjinin bir kısmı sistem içindeki tersinmezlikler nedeniyle yok olurken bir kısmı da sistem sınırları üzerinden çevreye kaybolmaktadır (Rahim ve Gündüz, 2013: 20). Ekserji kayıpları azaltılabilirse süreçteki kaynak tüketimi de azalacaktır (Tekel, 2006: 47). Bununla birlikte, geleneksel ekserji kavramı yalnızca enerjilere ve maddelere erişebilirken, diğer insan etkeni, ekonomik ve çevresel girdiler göz ardı edilir.

Geleneksel ekserji analizinden türetilen GEA (Genişletilmiş Ekserji Analizi) yöntemi Sciubba (2001,2004) tarafından tanıtılmıştır. Genişletilmiş ekserji analizi yönteminde dış faktörler (iş gücü, sermaye, çevresel etki) bir ekserji birimine dönüştürülerek analize dahil edilir (Ağaçbacak, 2013: 28). Genişletilmiş ekserji, bir sistemin doğal kaynaklarının tüketimini değerlendirmek ve optimize etmek için iyi biçimlendirilmiş termoeconomik çerçeve içinde kullanılabilir. Son zamanlarda yapılan bazı araştırmalar, GEA'nın hem geleneksel enerji sistemlerini hem de karmaşık sistemleri analiz etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Sonuçlar, GEA'nın tasarım ve konfigürasyon optimizasyonunu gerçekleştirmek için bir araç olduğunu ve sonuçlarının termoeconomik analizle karşılaştırıldığında ek bilgi sağlanabileceğini göstermektedir (Rocco vd., 2014: 1416).

1.1. Motivasyon ve Amaç

Geleneksel ekserji analizi yukarıda belirtildiği üzere enerji sistemlerinin performansının değerlendirilmesi verimsizliklerin tespiti ve optimizasyon çalışmaları için çok kullanışlı ve güçlü bir metot olmasına rağmen bazı eksiklikler barındırmaktadır. Örneğin geleneksel ekserji analizinde yalnızca enerji akışıyla ilgilenirken çevresel, ekonomik ve iş gücünün ekserji analizi ile birleştirilmesi için ek analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Genişletilmiş ekserji analizi ise içinde çevresel ve ekonomik bileşenleri de taşımakla birlikte bunlara ek olarak iş gücünün ekserji karşılığını da göz önüne almaktadır. Bu sebepten dolayı Türkiye'nin elektrik üretim sektörünün yukarıda bahsi geçen bütün parametreleri de içerecek şekilde genişletilmiş ekserji analizi ile değerlendirilmesi bu tezin amacı olmuştur. Tezin motivasyonu ise Türkiye'nin elektrik enerjisi üretim sektöründe yapması gereken önemli atılımlara bir katkı sağlamasıdır.

1.2. Literatür Taraması

Genişletilmiş Ekserji Analizi (GEA) üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Seckin ve ark.(2012) Türkiye için 2006 yılı değerlerine dayalı olarak GEA yöntemi ile analiz yapmışlardır. Bu makale, Ülkenin sürdürülebilirlik derecesinin geliştirilmesine yönelik olası yapısal müdahalelere destek sağlamayı amaçlamaktadır. GEA, maddi kaynaklar, emeğin maddi olmayan akışları, sermaye ve çevresel iyileştirme söz konusu olması üzere sözde dışsalılıkların dışsal eşdeğerleri açısından değerlendirilmesine izin verir. Bu yöntemle kaynak tüketimi ve çevresel etkiye ilişkin daha kapsamlı ve derin bir kavrayış mümkün hale gelir. Ağaçbacak (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisi santrallerinin verimlilik analizi Genişletilmiş Ekserji Analizi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin sürdürülebilirliğini incelemek için Genişletilmiş Ekserji Analizi yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle ekserji analizine ek olarak,

ekserji birimlerinde dış faktörlerin (işçilik, çevresel etki, maliyetler) kaynak kullanım ödeneği hesaplanarak analize dahil edilir. Çanakkale ve Muğla illeri incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Rüzgâr hızı ve lokasyon seçimi gibi parametrelerin verime olan etkileri incelenmiştir. Seçkin (2016), GEA metodolojisi aracılığıyla rafineri ve kok işleyen katı atıklardan elektrik üretiminin çevresel iyileştirme maliyetinin belirlenmesine odaklanmaktadır. Rafineri ve kok işleme atıkları entegre gazlaştırma ve yakma teknolojisine tabi tutulur. Rafineri ve kok işleme atığı kombinasyonunun çevresel iyileştirme maliyetinin ekserji karşılığı 0.138 TJ / ton olarak belirlenmiştir. Çevresel iyileştirme maliyetinin en büyük bileşeninin, salınan CO₂ ve atık nakliyesi için gerekli arıtma süreçlerindeki kaynak tüketimi olduğu gösterilmiştir. Sciubba (2011), sırasıyla emek ve sermayenin genişletilmiş ekserji eşdeğerlerini hesaplamak için kullanılan, genellikle " α " ve " β " olarak adlandırılan iki ekonometrik katsayının hesaplanmasına odaklandı. GEA yönteminin önceki uygulamalarında, bu katsayılar küresel sistem değerlendirmeleri temelinde tahmin edilen yaklaşık değerler atanmıştır. Bu, GEA'nın uygulandığı topluluğun ayrıntılı ekserji ve parasal dengelerine dayalı olarak " α " ve " β " gibi ekonometrik katsayıların "kesin" değerlerinin hesaplanmasına izin veren yeni bir prosedürü açıklamaktadır. Aghbashlo ve ark. (2020), GEA yaklaşımına dayanarak, İran'ın güneydoğu, orta ve kuzeybatı şehirlerinin güneş PV güç sistemleri için umut verici adaylar olduğunu göstermiştir. Önerilen genişletilmiş ekserji analizi performans çerçevesi, çeşitli çevresel ve iklimsel koşullar için diğer bağımsız ve hibrit yenilenebilir enerji sistemleri için uygulanabilirliğini göstermiştir. Chen ve ark. (2014), ekserji ve genişletilmiş ekserji sosyoekonomik önlemleri kullanarak 2000-2007 yılları arasında Çin'e giren doğal kaynakların varyasyonlarını analiz etmektedir. Çin toplumunun genişletilmiş ekserji analizi, uzun vadeli kaynak tükenmesini ortaya çıkarmaya ve sosyal-ekonomik-çevresel sistemdeki kaynak dönüşümünün verimliliğini artırmaya yardımcı olur, böylece karar vericiler için bütünsel bir yöntem ve sistematik bir bakış sağlar. Chen ve ark.(2009), sosyal sistemlerin ekolojisi üzerine gelecekte karşılaştırmalı çalışmalar için bir kıyaslama örneği sağlamak ve Çin toplumsal sistemini yedi farklı sektörde sınıflandırarak, bu sektörlere dayalı genişletilmiş ekserji analizi (GEA) uygulanmıştır. İşgücü değeri teorisinin ve olası sürdürülebilirlik ölçüsünün bir uzantısı olarak, ekserji değerleri, GEA için işgücü, sermaye ve çevresel iyileştirme maliyetleri dahil olmak üzere üretim faktörlerine atandı. Çin'in GEA performansları, enerji stratejisini ve sürdürülebilir kalkınma modelini belirlemek için sağlam bir temel sağlamak için Norveç, İngiltere, İtalya ve İtalya'nın Siena eyaleti ile karşılaştırıldı. Aghbashlo ve ark. (2018), İran'ın kuzey bölgesinde bulunan bir rüzgâr çiftliğinin performansını değerlendirmek için standart ekserji ve genişletilmiş ekserji analizi (GEA) yaklaşımlarını uyguladı. Tüm rüzgâr çiftliğinin

verimliliği, standart ekserji ve GEA yaklaşımlarına göre sırasıyla %63,8 ve %15,8 idi. GEA konseptine göre bu düşük dışsal verimlilik, esas olarak sermaye girdisinin, özellikle dışsal hesaplamalara dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Rocco ve ark.(2014), geleneksel ve ileri ekserji analizi yöntemleri kısaca tartışılmış ve GEA'nin teorik temelleri ve uygulanmasına yönelik detaylar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Yalnızca malzeme ve enerji akışlarını değil, aynı zamanda dışsallıkları da (emek, sermaye ve çevresel maliyetler) eşdeğer birincil ekserji akışlarına dönüştürür, böylece sistem ve çevre, titiz bir termodinamik temelde tamamen açıklanabilir. Ekserji temelli yöntemlerin sınıflandırılması için taksonomi önerilmiştir. GEA yönteminin yeni bir değerlendirmesi sağlanır, avantajları ve dezavantajları tartışılır ve daha fazla teorik araştırmaya ihtiyaç duyulan alanlar belirlenir. Sciubba (2001), ekserji akış diyagramlarının genişletilmiş bir temsiline dayalı olarak, enerji dönüşüm süreçlerinin ve sistemlerinin değerlendirilmesine yönelik yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım, hem Kümülatif ekserji tüketimi hem de Termo-ekonomik yöntemleri birleşik tutarlı bir biçimciliğe entegre etmeye yönelik sistematik bir girişimdir. İşgücü ve çevresel etki gibi enerjisiz niceliklerin doğrudan nicel bir karşılaştırmasına izin verdiği için her ikisinin bir genellemesini oluşturur. GEA'nin bir gaz türbini sürecine dayalı bir kojenerasyon tesisine uygulanmasının resmi bir temsili sunmaktadır ve çözümün gerçekten de "optimal" bir tasarıma yol açtığı görülmektedir. Ptasinski ve ark.(2006), Hollanda Enerji Sektörünün performansı, Standart Ekserji Analizi ve Genişletilmiş Ekserji Analizi (GEA) yöntemi kullanılarak analiz edilir. Enerji, ekserji ve kümülatif ekserji tüketimine dayalı performans göstergeleri üç alt sektör (enerjinin kullanımı, dönüşümü ve dağıtımı) için değerlendirilmektedir. Kümülatif ekserji tüketimine dayalı performans göstergelerinin, enerji ve ekserji kavramlarına dayalı olanlardan çok daha düşük olduğu gösterilmiştir. Genişletilmiş ekserjinin parasal karşılığının, ilgili ürün satışlarından daha yüksek olduğu bulunmuştur ve son olarak, genişletilmiş ekserjiye dayalı seçilmiş enerji dallarının performans göstergelerinin kümülatif ekserji temelli olanlardan çok daha düşük olduğu gösterilmiştir. Sciubba ve ark.(2008), ekserji ve genişletilmiş ekserji analizlerinin büyük karmaşık sistemlere uygulanmasını açıklamaktadır. Analiz edilecek sistemin sabit durumda olduğu varsayılır ve madde ve enerjinin girdi ve çıktı verileri ekserji birimleri ile ifade edilir. GEA'nın klasik bir ekserji analizine göre avantajı, dışsal eşdeğerlerinin sistem dengesine dahil edilmesidir: İşgücü, Sermaye ve Çevresel İyileştirme maliyetleri. Bu yöntemin Siena vilayetinin bir modeline uygulanması (2000 yılı veri tabanında) görülür. Sonuçlar, bu Eyaletteki sektörlerin İtalyan ortalamasına yakın verimlilik değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Son olarak en büyük verimsizliğin, GEA'da %30'un altında ve klasik ekserji analizinde %10'un altında bir verime sahip olan ulaştırma sektöründe olduğu

bulunmuştur. Sciubba (2003), enerji dönüşüm süreçlerinin ve sistemlerinin değerlendirilmesine yönelik, ekserji akış diyagramlarının genişletilmiş temsiline dayanan yeni bir sistematik yaklaşım sunulmakta ve tartışılmaktadır. Tamamen parasal bir yaklaşımla veya hatta termoeconomik bir yaklaşımla ele alınması zor olan bazı konuların, genişletilmiş ekserji analizi ile basit bir şekilde çözülebileceği tartışılmaktadır. Yöntemin potansiyelinin bir göstergesi olarak, entegre olmayan bir atık geri dönüşümü ile entegre bir atık geri dönüşüm ve yakma tesisi arasındaki teknik bir alternatifi değerlendirilmesine GEA'nın uygulanmasının genel, niteliksel bir örneği sunulmaktadır. Ertesvåg (2005) 2000 yılında Norveç toplumunda enerji taşıyıcılarının ve malzemelerin çıkarılması, dönüştürülmesi ve kullanılması, Sciubba'nın genişletilmiş ekserji analizi (GEA) yöntemiyle araştırıldı. Bu yöntemde termomekanik ve kimyasal ekserji değerlerine ek olarak işgücü ve sermaye akışlarına genişletilmiş ekserji değerleri atanır. Kaynakların ve ürünlerin değişimi, toplumun yedi sektörü arasında ve sektörler ile diğer ülkeler arasında enerji ve ekserji açısından ölçüldü. Çevreden kaynakların çıkarılması ve atıkların boşaltılması ve depolanması da analize dahil edildi. Peiro ve ark. (2010), biyoyakıtlar gibi yenilenebilir enerji üretimini değerlendirirken, değerlendirmeye kaynak girdileri, sermaye, işgücü yatırımı ve çevresel iyileştirme maliyetlerini dahil etmiştir. Genişletilmiş ekserji analizinin (GEA) kavramsal yeniliği, homojen birimlerde (Joule) ölçülen dışsallıkları da (sermaye, emek ve çevresel etki) içermesiyle temsil edilir. GEA'nın bir örneği olarak, kullanılmış yemeklik yağ (UCOME) ve kolza bitkilerinden (RME) 1 ton biyodizel üretimini değerlendirilir ve karşılaştırılır. UCOME ve RME'nin genişletilmiş ekserji içeriği sırasıyla 51.90 GJ ve 77.05 GJ'dir. UCOME üretimi 25,15 GJ daha az kaynak (malzeme ve enerji) kullanır ve RME'den daha düşük toplam yatırım ve çevresel iyileştirme maliyetleri gerektirir. Ayrıca, UCOME %35 daha fazla çalışma saati gerektirir. Özetle, UCOME'un genişletilmiş ekserjisi, RME'nin genişletilmiş ekserji içeriğinin yaklaşık 1.5 kadarıdır. Bu nedenle, UCO'dan biyodizel üretiminin, RME'den yapılan üretime göre daha az kaynak kullanımı yoğun olduğu sonucuna varılabilir. Jawad ve ark.(2015) literatürde gerçeğe yakın sonuçlar için ortaya çıkan Ekonomik Düzen Miktarının (EDM) birçok çeşidine rağmen, yine de sınırlamaları vardır. Bunlardan en önemlisi, envanter sistemlerinde bulunan gizli maliyetleri hesaba katmamasıdır. Bu maliyetlerden bazıları çevresel, sosyal iş gücü ve ekonomik etkiler dahil olmak üzere sürdürülebilirlik konuları ile ilgilidir. Bu maliyetlerin bazılarını, dışsal maliyetler olarak adlandırmakta ve Genişletilmiş Ekserji Analizi, yaklaşımını kullanarak tahmin etmektedir. Genişletilmiş Ekserji Analizi, bir sistemin sermaye, işçilik ve çevresel iyileştirme maliyetlerine eşdeğer dışsal değerler atar. Analiz, klasik ekserji analizini sürdürülebilirlik faktörleri olan emek, sermaye ve çevre ile birleştirir. Rapor, ABD, Almanya

ve Çin'de faaliyet gösteren üç firmanın EDM envanter politikalarını belirlemek için dışsal bir model kullanıyor. Sonuçlar, EDM'nin üç firma için farklı olduğunu göstermektedir çünkü sermaye, işgücü ve çevre iyileştirme maliyetlerinin eşdeğer ekserjisi her ülkede farklıdır. Song ve ark. (2019), Çin'deki tipik bir çimento üretim zincirini keşfetmek için genişletilmiş ekserji analizi kullanılmıştır. Çimento üretiminin gerçek ekolojik maliyetini ölçmek için kümülatif ekserji tüketimi, sermaye ve iş gücü ekserjisi ve çevresel iyileştirme ekserjisi hesaplanır ve ekserji kaybı olan sektörler belirlenir. Ayrıca, geleneksel çimento üretiminin potansiyel gelişimini genişletilmiş ekserji bileşenlerinin ayrıntılı karşılaştırması ile incelemek için karbür cüruf ikamesi, mısır samanı ikamesi ve atık ısı geri kazanımını içeren üç senaryo oluşturulmuştur. Sonuçlar, entegre bir enerji verimliliği, sosyo-ekonomik ve çevresel maliyet perspektifinde çimento endüstrisinin iyileştirilmesi için faydalı öneriler sağlaması düşünülmektedir.

GEA yöntemi, sistemlerin verimliliğine, girdi ve çıktılarını dışsal değerlere dönüştürerek erişir. Bu çalışmada Türkiye'deki enerji sektörü 2019 referans yılı için incelenmiştir. İncelenen yıl için iki farklı senaryo ele alınmıştır. İlk senaryo, enerji sektörünün gerçek koşullarının araştırılmasıyla ilgilidir. İkinci senaryo, elektriğin %100'ünün yenilenebilir kaynaklardan üretildiği varsayımına dayanmaktadır. Sistemle ilgili açıklamalar ve senaryolar sonraki bölümlerde verilmektedir. EnergyPlan (15.1) yazılımında uygulanan GEA modeli uygulanmıştır (EnergyPlan, 2020).

2. TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ VE ELEKTRİK ÜRETİM SEKTÖRÜ

2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, doğada var olan ve sürekli kendini yenileyebilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Türkiye’de ve dünyada yenilenebilir enerji üretimine verilen değer son 15 yılda artmıştır. Yenilenebilir enerji eldesi için kullanılan başlıca kaynaklar rüzgâr, jeotermal, hidrojen, güneş, biyokütle ve hidrolik enerjileridir (Erdoğan, 2020b: 286).

Yenilenebilir enerji elde edilen kaynakların, havanın karbondioksit emisyonu değerlerini düşürmesi çevrenin korunmasını sağlaması en önemli avantajlarından. Yerli ve yenilenebilir enerji kaynakların olması ülkeler açısından, önemli bir role sahip olup, cari açığın ve işsizliğin azalmasına da neden olur. Enerji iletiminin verim değeri ve ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olması yenilenebilir enerjinin dezavantajları arasındadır (Aydın, 2010: 319).

Enerji elde etme sektöründe fosil yakıtlar, nükleer ve yenilenebilir enerjinin üç temel enerji kaynağı olduğu bilinmektedir. Enerji elde edilen sistemin geniş bir çeşitlilik kazanması amacıyla enerji elde edilen kaynakların çeşitlendirilmesi, yerli ve yenilenebilir enerji üretim santrallerinin kapasitelerinin artırılması, ucuz ve sürdürülebilir enerjinin sağlanması önemlidir.

2.1.1. Güneş Enerjisi

Enerjinin temel kaynağı güneştir. Bu güneş enerjisi, güneşin çekirdeğindeki hidrojen gazının kimyasal tepkimeler sonucunda helyuma dönüşmesiyle birlikte ortaya ışıma enerjisidir. Geçmişte güneş enerjisi sadece ısı enerjisine dönüştürülen bir kaynak olarak kullanılırken, zamanımızda güneş panelleri kullanılarak elektrik enerjisi de üretilmektedir. Güneş kaynaklı enerji ile ocaklar, güneş pilleri, sıcak su eldesi, güneş enerjisinden faydalanan otomobiller, su arıtma ve tarımsal sulama gibi alanlarda kullanılmaktadır (TC. Serhat Kalkınma Ajansı, 2015: 23).

Güneş ışınımının yaklaşık %50’si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşabilmektedir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinden yapay ve doğal şekilde (Tablo 2.1) dönüştürülerek faydalanılır.

Tablo 2.1. Güneş Enerjisi Dönüşümleri

Doğal Dönüşüm Tipleri	Yapay Dönüşüm Tipleri		
Toprağın Isınması	Güneş Işınımı	→→	Isı
Suyun Isınması	Güneş Işınımı	→→	Elektrik(Güneş Pilleri)
Fotosentez	Su Gücü	→→	Mekanik Elektrik(Barajlar)
Su Döngüsü	Rüzgar	→→	Elektrik-Mekanik(Türbinler)
Rüzgar Oluşumu	Biyokütle	→→	Isı-gaz ve Sıvı yakıt
Dalga Oluşumu	Fosil Yakıt	→→	Isı-elektrik(Elektrik ve ısı üretim malzemeleri)
Doğal Yangınlar	Güneş Mimarlığı Uygulamaları		

Kaynak: (Erdoğan, 2020a: 9)

Tablo 2.1’ de yapay dönüşümler insanlar tarafından farklı amaçlarda yararlanmak için geliştirilmiş teknolojilerdir. Güneş Enerji Sistemlerinde önemli bir yer tutan Fotovoltaik güneş hücreleri, üzerine güneş ışıkları (fotonlar) düştüğünde güneş enerjisi direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Bir başka örnek ise Güneş Enerji Sistemlerinde ilk olarak ısı enerjisine dönüştürülür. Elde edilen ısı direkt olarak enerji şeklinde kullanılabileceği gibi farklı yöntemlerle elektrik enerjisine de çevrilebilir.

Güneş enerjilerinin olumlu ve olumsuz yönleri bulunur. Aşağıda güneş enerjilerinin avantajı açıklanmıştır.

- Güneşten enerji eldesi basit teknoloji gerektirdiği için yerel sanayi kuruluşları tarafından kolaylıkla güneş enerjisinden yararlanılabilmektedir.
- Güneş enerji eldesi dışa bağımlı değildir. Bu nedenle dış ülkelere bağımlılığı ortadan kaldırır.
- Güneş enerji eldesi çevreci ve temizdir.
- Güneş enerji eldesi işletim ve bakım maliyeti diğer enerji kaynaklarından düşüktür.
- Elektrik iletimi yöresel olarak kullanılabilir.
- İletim hattı ve şebeke gibi ilave yatırımlara gerek duyulmadığı için güneş enerji eldesi, enerji nakil sorunu oluşturmaz.

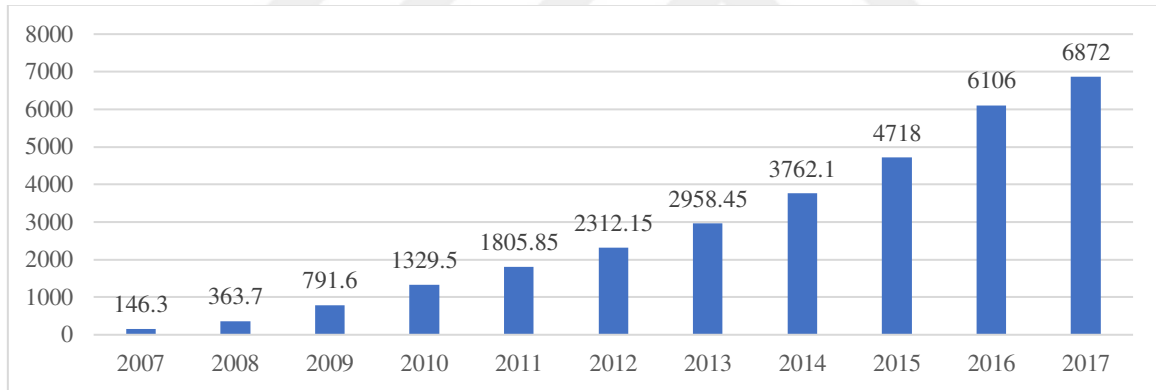
Güneşten enerji üretiminin dezavantajları ise aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- Hava şartlarına bağlı olan güneş enerjisi, kış ayları ve geceleri enerji üretimi yüksek miktarda düşmektedir.
- Güneş enerjisi tesislerinin kuruluş yatırım maliyeti yüksektir.
- Depolanması gerekebilir.
- Verimi düşüktür.

Güneş enerji santralleri büyük alan kaplar. Tarımsal üretimin azalmaması için kurulan santrallerin tarıma elverişsiz alanlarda kurulması gerekir. Güneş enerji santralleri, elektrik enerji üretimine katkısı nedeniyle verilen teşvikler artırılarak ve yasal zorunluluklar getirilerek yapılan binalara belli kapasitede santraller kurulabileceği düşünülmektedir. Güneş enerji santrallerinde kullanılan ürünlerin ithal olması durumunda elde edilen gelirin yaklaşık 19 yıl boyunca ithal edilen ülkeye ödenecek olması ülke ekonomisine olumlu bir katkı sağlayamayacaktır. Yerli teknolojiler kullanılarak güneş enerji santralleri kullanılabilir ve ülkeye net bir katkı sağlanabilir (Erdoğan, 2020a: 11).

2.1.2. Rüzgâr Enerjisi

Türkiye'de rüzgârdan faydalanılarak elde edilen enerji, gelişme potansiyeli yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Türkiye'nin etrafının denizlerle çevrili olması nedeniyle, denizden karaya doğru olan hava akımı rüzgâr enerjisi elde etme olanağını arttırmaktadır. Türkiye'de 1998 yılında kurulan ilk rüzgâr enerji sırasıyla santralleri Çeşme Germiyan ve Çesme Alaçatı'da bulunmaktadır. Çeşme Germiyan santralleri 1,7 MW ve Çeşme Alaçatı santralleri ise 7,2 MW seviyesindedir (Koçaslan, 2010: 58).



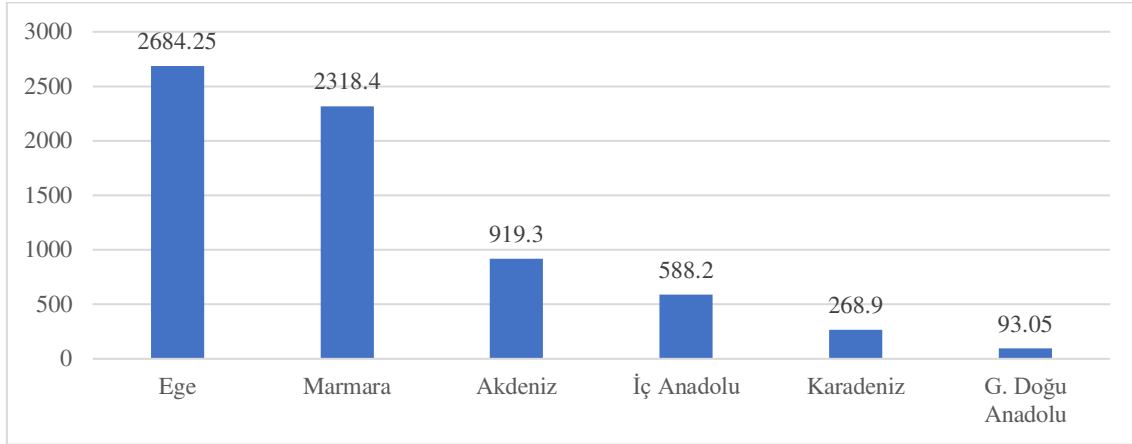
Grafik 2.1. Türkiye’de Rüzgâr Enerji Santralleri İçin Kurulum (MW)

Kaynak: (Özarslan ve Bayraç, 2018: 385)

Grafik 2.1.’de Türkiye’de 2007-2017 yılları arasındaki rüzgâr enerji santrallerinin kümülatif kurulumu gösterilmektedir. Türkiye’de rüzgar santrallerinden elde edilen enerji miktarı yaklaşık 48 GW seviyesindedir. Grafik 2.1’de gösterildiği gibi, 2017 yılı ait içinde toplam rüzgâr enerji santrali kurulum gücünün 6,872 MW olduğu ve bu miktarın, toplam enerji potansiyel ile karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyede kaldığı anlaşılmaktadır (Özarslan ve Bayraç, 2018: 385).

Rüzgar enerji türbinini ekonomik bir yatırım olması için, 50 metre yüksekliğe sahip bir alanda bulunması ve hesaplanan rüzgâr hızının da minimum 7.0 m/s olması gerekmektedir (Şenel ve Koç, 2015: 52). Girişimciler rüzgâr enerji elde etmeleri için kurulan sektöre yatırım

yapması rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu alanları tercih etmesi gerekmektedir. Türkiye'de rüzgâr enerji santrallerinin (RES) bölgelere göre dağılımı grafik 2.2'de belirtilmektedir.



Grafik 2.2. Türkiye’de Günümüzde İşletme Halinde bulunan RES’lerin Bölgesel Dağılımı (MW)

Kaynak: (Özarslan ve Bayraç, 2018: 386)

Grafik 2.2’de görüldüğü üzere işletme halinde rüzgâr enerjisi santrallerin en yoğun olduğu bölgeler Ege ve Marmara’dır. Ege ve Marmaradan sonra sırasıyla Akdeniz, İç Anadolu, Karadeniz ve Güney Doğu Anadolu Bölgeleri takip etmektedir.

Rüzgâr kaynaklı enerji elde etmenin de avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajları aşağıda belirtildiği gibi açıklanabilir.

- Yenilenemez kaynaklara alternatif oluşturan rüzgâr kaynaklı enerji, sera gazı emisyonuna neden olmayan, ekolojik dengeyi koruyan ve böylece çevre kirliliğine sebep olmayan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.
- Rüzgâr kaynaklı enerjisi dışa bağımlı değildir. .
- Teknolojik gelişmelerin artmasıyla Rüzgâr kaynaklı enerjinin yatırım maliyeti düşüktür.
- Rüzgâr enerji santralleri projelerinin kurulumu basit ve bakımı kolaydır. Herhangi bir kaza olasılığı yok denecek kadar düşük bir orandadır.
- Diğer faaliyetlere engel olmaksızın dünyanın çoğu yerinde rüzgâr enerjisi üretilebilir.
- Rüzgâr enerjisi yeni bir faaliyet olacağından istihdam yaratır.

Rüzgâr enerjisinin dezavantajlarını ise şu şekilde sıralanabilir.

- Öncelikle Rüzgâr türbinleri için geniş bir alan gereklidir.
- Rüzgâr kaynaklı enerjisinin genelde verim düşüktür.
- Rüzgâr enerji santralleri gürültülü çalışır.
- Rüzgâr enerji santralleri yüksek tepelik alanlar haricinde istenilen verim elde edilemez.

Rüzgâr enerji santrallerinin kurulacağı alan geniş olması gerektiğinden uygun alanların iyi seçilmesi ve planlanması gerekir. Rüzgâr enerji santrallerinin kurulacağı alanların kuşların göç sırasında kullandığı göç yollarından yollardan uzak olmalıdır. Türkiye rüzgâr kaynaklı enerjinin tamamını kullanması durumunda elektrik ihtiyacının % 57'sini karşılayabilecek durumdadır (Erdoğan, 2020a: 14).

2.1.3. Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik enerjinin kaynağı sudur. Hidroelektrik yüksek bir noktadan aşağıda akışta bulunan suyun hareketinden elde edilen bir enerji çeşididir. Bu enerji hidroelektrik santraller aracılığı ile üretilip, kullanılabilir bir kaynak haline getirilir. İlk hidroelektrik santrali 1882 yılında Amerika'da inşa edilmiştir. Yıllar içinde dünya genelinde yaygın kullanılan bir enerji çeşidi olmuştur. Hidroelektrik santraller büyük, küçük, mikro ve mini olmak üzere boyutlandırılmıştır. Büyük ve küçük santraller ulusal enerji ihtiyacını karşılarken, mikro ve mini santraller ise kırsal kesimin ve yerel kısımların elektriğini karşılamaktadır (Soylu, 2019: 14). Dünyada kullanılan elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %23'ü hidroelektrik enerji santrallerinden sağlanmaktadır.

Hidroelektrik enerji santralleri su depolama şekline göre nehir tipi (regülatör), depolamalı (rezervuar) tip ve pompaj depolamalı tip olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Hidroelektrik enerji santrallerinin kurulacağı alanlar çok iyi şekilde incelenerek seçilmesi önemlidir. İyi bir seçim yapılmadan kurulan enerji santralleri tarım arazilerini veya yerleşim alanlarının su altında kalmasında neden olabilir. Hidroelektrik enerji santrallerinin kurulacağı alanların yerleşim bölgelerinden uzak olması gerekmektedir. Fazla yağışlı geçen mevsimlerde taşmalar sonucu yerleşim alanları olumsuz yönde etkilebilir. İyi incelenmeden kurulan (HES) hidroelektrik Santraller deprem kuşağında olması nedeniyle oluşacak bir deprem sonucu zarar görebilir ve suyu tutamaz hale gelerek taşkınlara neden olabilir (Erdoğan, 2020a: 17).

2.1.4. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, havadan 14,4 kez daha hafif olup, basit yapıya sahiptir ve sık rastlanan elementidir. Ayrıca hidrojen zehirsiz, rengi ve kokusu olmayan bir gaz özelliğindedir. Hidrojen, güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkime vermiş olduğu ısı yakıt olarak evrenin temel enerji kaynağıdır.

Hidrojen gazı (H_2) yaklaşık $-2530^{\circ}C$ 'de sıvılaştırılarak depolanma yapılabilir. Sıvı hidrojenin hacmi, gaz halindeki hacminin oranı 1/700'ü kadar düşük seviyededir. Hidrojen gazı

bilenen tüm yakıtlar karşılaştırıldığında birim kütle başına en yüksek enerji veren bir enerji kaynağıdır. (1kg hidrojen gazı, 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye eşdeğerdir.). Hidrojen doğada serbest bir şekilde değil bileşikler halinde bulunmaktadır. Hidrojen enerjisi elde edilmesinde çevre kirleticisi hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde salınımı söz konusu değildir.

Otomotiv sektörü için oldukça umut verici bir enerji kaynağıdır. Otomotiv sektörünün tükenbilir fosil yakıtlara bağımlı olduğu bilinmektedir. Gelişen teknoloji ve çalışmalar ile hidrojen gazından alınan yüksek verim ve düşük emisyonları sebebiyle yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Hidrojen gazından, ulaşımda, mutfaklarımızda, ısınmada ve sanayi gibi birçok alanda faydalanabiliriz.

Hidrojen enerjisinin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir.

Avantajları:

- Enerji döngüsü devamlıdır.
- Çevreye zararı yoktur.
- Düşük fiyatlardır.
- Kaynak sıkıntısı yoktur.
- Güvenilirdir.
- Hidrojen yakıtı; diğer yakıtlarla kıyaslandığı zaman, hafif, randımanlı temiz, ucuz, çeşitli kullanım alanına sahip, üretim hacmi fazla olan ve araçlar için iyi bir tercih olan yakıttır.

Dezavantajları:

- Altyapıda eksiklikler mevcuttur.
- Yüksek maliyetlidir.
- Depolama zorluğu mevcuttur.

Yenilenebilir enerjiler arasında çevreye en az zarar veren hidrojen enerjisidir. Hidrojen enerjisinin depolanabilir olması diğer yenilenebilir enerjilere göre en önemli avantajıdır. Tüm yenilenebilir enerjiler arasında en yüksek potansiyele hidrojen enerjisi sahiptir denilebilir (Soylu, 2019: 14).

2.1.5. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun altında sıcak su, buhar ve gazların kullanılmasına dayanır. Dünyanın çekirdeği, elementlerin kademeli olarak radyoaktif bozunması nedeniyle 5000°C'lik bir sıcaklığı korur. Isı enerjisi sürekli olarak sıcak çekirdekten kabuğa akar ve volkanik faaliyetler bu sıcak malzemeyi kabuktan, yer kabuğunun altındaki yakın yüzeye taşır ve sıcak su, buhar veya gaz şeklinde bir termal enerji yer kabuğunun altında depolanır. Jeotermal sistemler bu enerjiyi ya elektrik üretmek ya da ısınmak için kullanır. Jeotermal enerji projeleri, sera gazı emisyonları, hava kalitesi, arazi kullanımı ve su kalitesi gibi düşük çevresel etkilerle genel olarak temiz ve yenilenebilirdir. Amerika, Afrika ve Kuzey Asya en yüksek jeotermal potansiyele sahiptir. Türkiye yüksek jeotermal potansiyele sahip ülkeler arasındadır.

Elektrik üretiminde jeotermal kaynaklar doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Jeotermalden elektriği elde etmek için kullanılan en yaygın yöntem, yer kabuğundan çıkarılan sıcak sudan üretilen buharın bir türbini çalıştırmak için kullanıldığı ve elektriğin türbine bağlı jeneratörden üretildiği hidrotermal sistemlerin kullanılmasına dayanmaktadır. Buhar, kondenser tarafından tekrar suya dönüştürülür ve yer kabuğuna enjekte edilir.

Jeotermal enerji ayrıca konut, ticari ve endüstriyel sektörlerde doğrudan ısıtma için, tarım için balık, meyve, sebze ve kereste ürünlerinin kurutulmasında, yün yıkamada, kumaş boyamada, kâğıt imalatında ve sütün pastörize edilmesinde kullanılabilir.

SO_x, CO₂, NO_x, gazların yayılma hızı çok düşük olduğu için jeotermal kaynaklar temiz enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Öte yandan jeotermal enerji, hava koşullarına bağlı olmadığı için sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır (Vural, 2019: 27).

Jeotermal enerjinin avantajları;

- Jeotermal enerji, sınırsız bir enerji kaynağı sağlar ve hava veya su kirliliği oluşturmaz
- Çevre dostudur ve duman şeklinde kirlilik oluşturmaz.
- Rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi gibi hava koşullarına bağlı diğer birçok yenilenebilir enerji kaynağının aksine sabit güç sağlayabilir.
- Petrol ve kömür gibi geleneksel kirletici yakıtların kullanımında azalma sağlar.
- Elektrik üretiminin yanı sıra evleri ve ofisleri ısıtmak için de kullanılabilir.
- İsraf veya yan ürün üretimi yoktur.
- Jeotermal santralin bakım maliyeti çok daha azdır ve çok yer kaplamaz (Mohammad, 2019: 38).

2.1.6. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi en eski enerji kaynaklarından biridir ve yüz yıllardır kullanılmaktadır. Basitçe, organik maddelerden enerji üretimine biyokütle enerjisi denir. Biyoenerjinin besleme stoğunun sürekli olması, her yerde bulunabilmesi ve gereksinimlere bağlı olarak kolaylıkla depolanabilmesi önemli özelliklerindendir. Potansiyel hammadde aşağıda listelenmiştir.

- Tarımsal kalıntılar: mısır, şeker kamışı küspesi, kabuklar, buğday samanı, meyve çekirdekleri;
- Otsu bitkiler (enerji bitkileri): filotu (çın kamışı), dallı darı, bambu ve diğer otlar;
- Odunsu bitkiler: kara akasya, okaliptüs, melez kavak. Douglas köknarı, kavak, akçaağaç, çam ve söğüt;
- Orman artıkları: sert ağaç ve yumuşak ağaç;
- Kentsel ve endüstriyel kalıntılar: gazete, oluklu kâğıt, mumlu kartonlar, belediye katı atıkları, sıvı atık;
- Hayvan atıkları: gübreler.

Biyokütle enerji işlemleri için çeşitli uygulama türleri vardır. Bunlar yanma, anaerobik çürütme, gazlaştırma ve birleşik ısı ve güçtür. Yanma, en yaygın biyokütle enerjisi üretim türüdür ve biyokütle ateşlemeli buhar kazanlarının çalışma prensibi ile geniş bir ölçekte uygulanabilir ve elektrik üretimi için türbinlere türetilir. Birlikte ateşleme ve birleşik ısı ve güç, yanma uygulamasının alt kümeleridir. Anaerobik çürütme, CH₄ (%60-65), CO₂ (%10-15) ve amonyak (NH₃), kükürt dioksit (SO₂), hidrojen sülfür (H₂S) ve hidrojen gibi diğer küçük gazları içeren oksijeni biyogaza dönüştüren hammadde yokluğunda mikroorganizmalar tarafından uygulanan bir işlemdir. Gazlaştırma, katı biyokütleyi sıvı biyo-yağ ve yüksek kalorili gaza dönüştürmek için önemli bir uygulamadır. Gazlaştırma, sıvıları beslemek için 500°C'ye kadar uygulanan piroliz ve yaklaşık 1000°C'de uygulanan gazlaştırma ve sentez gazı ile sonuçlanan iki adımda gerçekleşir (Durmuşoğlu, 2018: 59).

Biyokütlerdeki kimyasal enerji, yandığında ısı olarak açığa çıkar ve ayrıca yakıt olarak yakılabilen biyoyakıtı veya biyogaza dönüştürülebilir. Biyokütle, üç ana ürün tipine dönüştürülebilir:

- Elektrik/ısı enerjisi,
- Yakıt nakliyesi,
- Kimyasal hammadde.

Biyokütle, ateşin keşfinden beri kullanılan bir enerji olmuştur. Birçok faydası vardır ve diğer yenilenebilir enerjiler gibi birçok sınırlaması vardır. Örneğin, biyokütlenin faydalarından biri temiz enerji sağlaması ve sera gazının azaltılmasına yardımcı olması, dezavantajlarından biri ise biyokütle için kullanılan yakıtın yani biyoenerji üretmek için kullanılan ürünlerin diğer birçok amaç için kullanılmasıdır. Bu nedenle biyokütlenin rekabet eden kullanımlarının bir dezavantaj olduğunu söylenebilir.

Biyoenerjinin sürdürülebilir bir şekilde kullanılması halinde sera gazı azaltımına katkıda bulunabileceği ve birçok çevresel, sosyal ve ekonomik fayda sağlayabileceği konusunda artan bir fikir birliği söz konusudur. Biyokütle bol ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve atık ürünleri yakmak için kullanılabilir. Biyokütle, birçok düşük karbon senaryosunda genişletilmiş bir rol oynar ve diğer yenilenebilir enerjinin pek kullanışlı olmayabileceği ulaşım sektöründe özellikle faydalı olabilir. Çevreye çok fazla zarar veren fosil yakıtlar ve petrol ürünleri bağımlılığının azaltılması sağlanır. Duman ve zehirli kimyasal gaz emisyonlarının seviyelerin düşmesini sağlar. Çöp sahalarına olan ihtiyacın azaltılmasına yardımcı olan atık ürünlerin kullanımı sağlanır. Nispeten ucuz bir enerji kaynağıdır ve kırsal alanlarda istihdam yaratma fırsatı mevcuttur (Mohammad, 2019: 42).

2.2. Yenilenebilir Enerjide Kurulu Güç Analizi

Türkiye'nin yenilenebilir enerjinin kurulu gücü her geçen yıl artış göstermektedir. 2013 yılında Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu gücü 25,6 GW seviyesinden, 2020 yılının Eylül ayı itibarıyla 47 GW seviyesine yükselerek büyük bir artış göstermiştir. 2013 ile 2020 yılları arasında Hidroelektrik santraller (HES) 7,5 GW artış ile yenilenebilir enerjiye dayalı kurulu güç artışında en büyük paya sahip olmuştur. Hidroelektrik santrallerinin yanı sıra, bu yıllar arasında 6,4 GW'lık artış ile güneş enerji santralleri (GES), 5,3 GW'lık artış ile rüzgâr enerji santralleri (RES), 1,2 GW'lık artış ile jeotermal enerji santralleri (JES) ve 1 GW'lık artış ile biyokütle enerjisi santralleri (BES) takip etmektedir.

Tablo 2.2'de 2015 yılında Hidroelektrik enerji santrallerinin yenilenebilir enerji kaynakları kurulu gücü içerisindeki payı %81 iken, bu pay 2020 yılına kadar rüzgâr enerji santralleri ve güneş enerji santrallerinin artışına bağlı olarak %63 seviyesine düşmüştür. Buna rağmen, hidroelektrik enerji santralleri 2020 yılının Eylül ayı itibarıyla yine de en büyük paya sahip olduğu gözlenmektedir. Lisanssız enerji santrallerindeki yatırımların artması dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynakları kurulu gücündeki pay, güneş enerji santrallerinde %14, rüzgâr enerji santrallerinde ise %17 seviyesine yükseldiği görülmektedir. Ayrıca biyokütle enerji

santralleri ve jeotermal enerji santralleri bu paylar arasında her ikisinin de %3 civarı olduğu gözlenmektedir (TSKB, 2020: 28).

Tablo 2.2. Yenilenebilir Enerji Kurulu Güç Gelişimi (MW)

Kaynak	2015	2016	2017	2018	2019	2020/9
Hidroelektrik	25868	26682	27273	28291	28503	29790
Rüzgar	4498	5751	6516	7005	7591	8077
Güneş	310	833	3421	5063	5995	6361
Jeotermal	624	821	1064	1283	1515	1515
Biyokütle	345	467	575	739	1163	1238
Yenilenebilir Toplam	31645	34554	38849	42381	44768	46981

Kaynak: (TSKB, 2020: 29).

2.3. Yenilenebilir Enerjide Elektrik Üretim Analizi

Yenilenebilir enerji santrallerindeki artış nedeniyle Türkiye'nin toplam elektrik üretimi 2015 yılında 261,8 GWh iken 2019 yılında 304,3 GWh'ye yükselmiştir. Benzer şekilde 2015 yılında yenilenebilir enerji santrallerinden elde edilen elektrik üretimi 84,2 GWh iken 2019 yılında 133,7 GWh değerine ulaşmıştır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3. Yenilenebilir Elektrik Üretim Gelişimi (MW)

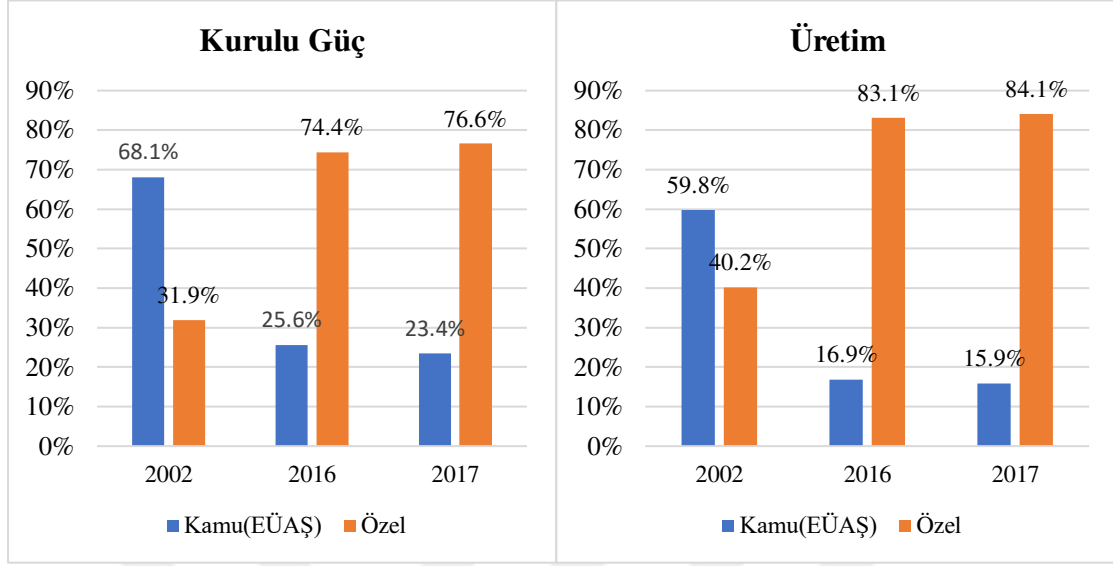
Kaynak	2015	2016	2017	2018	2019	2020/9
Hidroelektrik	67146	67231	58219	59939	88886	66377
Rüzgar	11653	15517	17904	19949	21515	18645
Güneş	194	1043	2889	7800	10542	9624
Jeotermal	3425	4819	6128	7431	8230	6826
Biyokütle	1758	2372	2972	3623	4524	3991
Yenilenebilir Toplam	84175	90981	88111	98741	133697	105464

Kaynak: (TSKB, 2020: 29)

2.4. Türkiye’de Elektrik Üretim Sektörü

Türkiye’nin elektrik sektörü, arz güvenliği ilkesine öncelikli olarak önem veren, ekonomik gelişme ve ülkenin refahına katkı sağlama doğrultusunda gelişmiştir. 1990 yılında elektrik üretim ve dağıtım faaliyetleri birbirinden ayrılmış, özel şirketlerin yatırım ve işletme sürecine dahil edilmesi yönünde girişimler başlatılmıştır. 2000’li yılların başında çıkarılan kanun ve yönetmeliklerle elektrik sektörü bir rekabet biçimine dönüşmüştür. 2018 yılı sonrasında elektrik üretim ve dağıtım faaliyetlerinin özelleştirilmesi tamamlanmıştır. Grafik 2.3’de Türkiye’nin elektrik üretimindeki özel sektörün payı ‘kurulu güç’ ve ‘üretim’ olarak

gösterilmiştir. Dağıtım şirketlerinin ortaya çıkması, kamu sorumluluğundaki iletim faaliyetleri dışında bir rekabet ortamı yaratmıştır. (TSKB, 2018: 18).

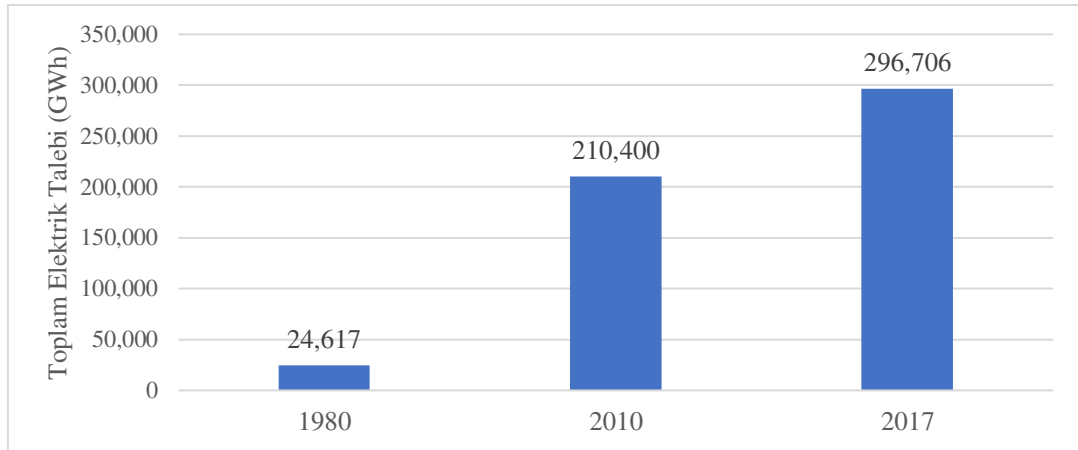


Grafik 2.3. Özel Sektörün Elektrik Üretimindeki Payı

Kaynak: (TSKB, 2018: 19)

2.4.1. Elektrik Talep Analizi

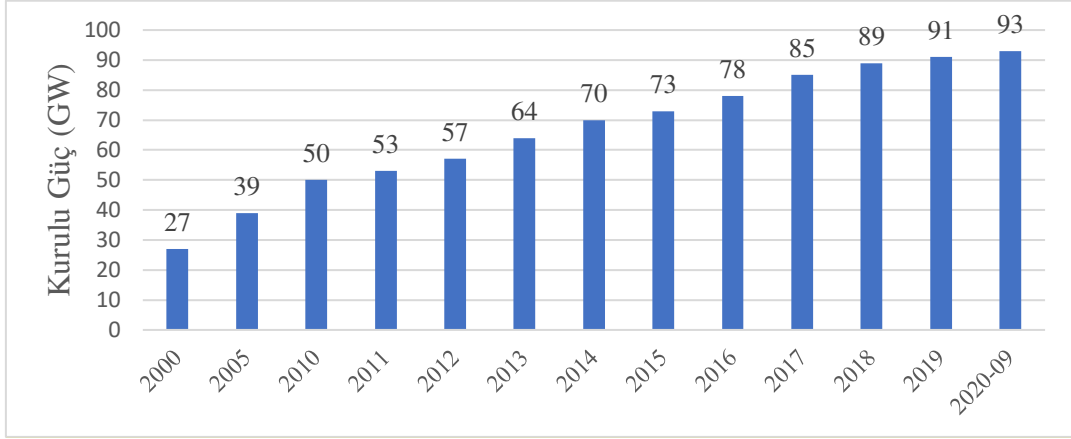
Türkiye'nin toplam elektrik ihtiyacı 1980 yılından 2017 yılına kadar devamlı artış göstermiştir. Grafik 2.4'te 1980, 2010 ve 2017 yıllarındaki Türkiye'nin elektrik talebi değerini GWh cinsinden gösterilmiştir. Ayrıca 2017 yılında Türkiye'nin toplam elektrik ihtiyacı bir önceki yıla göre %6,2 artmıştır.



Grafik 2.4. Yıllara Göre Türkiye'nin Elektrik Talebinin Gelişimi

Kaynak: (TSKB, 2018: 21)

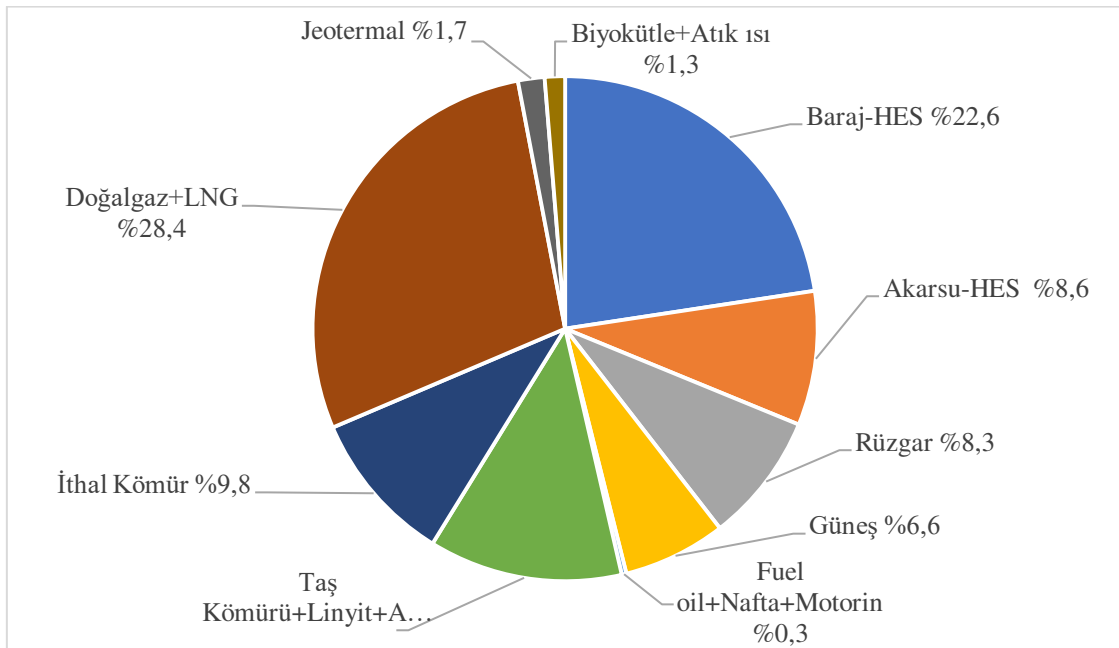
2.4.2. Türkiye’de Kurulu Güç



Grafik 2.5. Türkiye Kurulu Güç Gelişimi (GW)

Kaynak: (TSKB, 2020: 13)

Grafik 2.5'te görüldüğü gibi 2017 yıl sonu itibarıyla Türkiye'nin toplam kurulu gücü 85 GW'a yükselmiştir. 2017'den 2018'e Türkiye'nin toplam kurulu gücü 4GW artarak 89 GW'a yükseldi. 2020 yılının ilk dokuz ayı itibarıyla Türkiye'nin toplam kurulu gücü 93,2 GW'a ulaşmıştır. 2020 yılının ilk dokuz ayında kurulu gücün, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üreten santrallerden elde edilen enerji dahil olmak üzere yaklaşık 1912 megavat (MW) değerinde artmıştır. Toplam büyümenin 374 MW'ı rüzgar santrallerinden (RES), 237 MW'ı ise güneş santrallerinden (GES) kaynaklanmaktadır. Bu dönemde elektrik üretimi için doğalgaz enerjisi ve katı yakıt kullanan santrallerin net toplam kurulu gücü 291 MW düşmüştür (TSKB, 2020: 13).



Grafik 2.6. Türkiye’de 2019 Yılı İçinde Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü Dağılımı

Kaynak: (TMMOB,2020)

Yüzdelik dilimler ile gösterilen Grafik 2.6’da en büyük payı 25.904,3 MW ile Doğalgaz ve LNG alırken, sonraki büyük payı 20.642,5 MW ile Baraj-HES almıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından Güneş, Rüzgar, Biyokütle ve atık ısı, sırasıyla 5.995,2 MW, 7.591,2 MW ve 1.163,4 MW değerlerine sahiptir. Aynı şekil de Jeotermal 1.514,7 MW iken Akarsu-HES 7.860,5 MW’tır. Fuel oil+Nafta+Motorin 311,6 MW ile en küçük paya sahiptir. Bütün değerlere 11.316,8 MW Taş kömürü+Linyit+Asfaltit ve 8.966,9MW ithal kömür eklendiği zaman Türkiye’nin 2019 yılının kurulu gücünün 91.267,0 MW olduğunu görebiliriz.

2.4.3. Üretim ve Tüketim

Türkiye’de 2019 yılı elektrik enerjisi üretimi 2018 yılına göre % 0,3’e azalarak gelen 904,3 milyon kWh seviyesine inmiş ve 303.897,6 milyon kWh olarak belirlenmiştir. Tüketim ise yine % 0,3 azalarak 846,5 milyon kWh seviyesine inmiş ve 303.320,4 milyon kWh olmuştur (Tablo2.4).

Tablo 2.4. Türkiye Elektrik Üretimi 2018-2019

	2018		2019		Değişim
	GWh	%	GWh	%	%
Termik	209.683,50	68,80%	175.142,50	57,60%	-16,50%
Hidrolik	59.938,40	19,70%	88.822,80	29,20%	48,20%
Jeotermal	7.431,00	2,40%	8.951,70	2,90%	20,50%
Rüzgar	19.949,20	6,60%	21.730,70	7,20%	8,90%
Güneş	7.799,80	2,60%	9.249,80	3,00%	18,60%
Brüt Üretim	304.801,90		303.897,60		-0,30%
Dış Alım	2.476,90		2.211,50		
Dış Satım	3.111,90		2.788,70		
Brüt Tüketim	304.166,90		303.320,40		-0,30%

Kaynak: (TEİAŞ, 2019: 35)

Tablo 2.5’de Türkiye’nin 2018 ve 2019 yıllarına ait elektrik enerjisi üretiminin birincil enerji kaynakları dağılımı gösterilmiştir. Tablo 2.5’te gösterildiği gibi değişimin en fazla olduğu % 48,2 ile ‘Hidrolik’ 2018 yılında 59.938,40 GWh iken 2019 yılında 88.822,80 GWh değerine ulaşmıştır. ‘Doğalgaz’ 2018 yılında 92.482,80 GWh iken 2019 yılında 57.288,20 GWh ile değişimin -%38,1 olduğu görülmektedir.

Tablo 2.5. Türkiye’de Elektrik Enerji Üretiminde Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Dağılımı 2018-2019

	2018		2019		Değişim
	GWh	%	GWh	%	%
Kömür	113.248,60	37,20%	112.894,10	37,10%	-0,30%
Sıvı Yakıtlar	329,1	0,10%	336	0,10%	2,10%
Doğalgaz	92.482,80	30,30%	57.288,20	18,90%	-38,10%
Yenilenebilir atık+ atık ısı	3.622,90	1,20%	4.624,20	1,50%	27,60%
Hidrolik	59.938,40	19,70%	88.822,80	29,20%	48,20%
Jeotermal	7.431,00	2,40%	8.951,70	2,90%	20,50%
Rüzgar	19.949,20	6,50%	21.730,70	7,20%	8,90%
Güneş	7.799,80	2,60%	9.249,80	3,00%	18,60%
Toplam	304.801,90	100,00%	303.897,60	100,00%	-0,30%

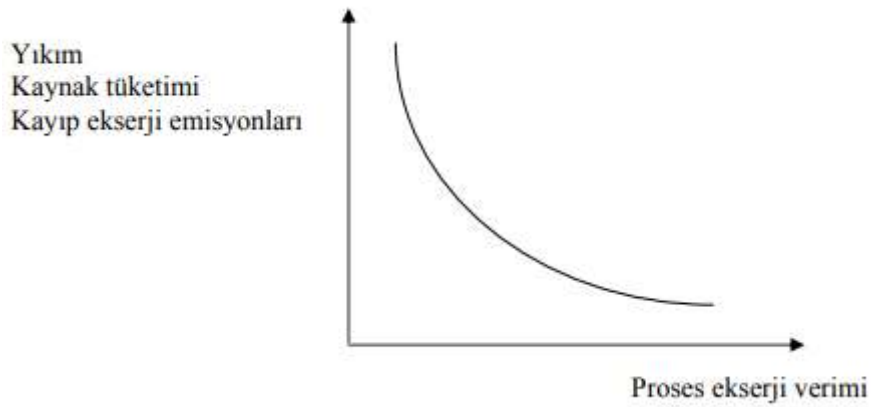
Kaynak: (TEİAŞ, 2019: 35)

3. GELENEKSEL VE GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ

3.1. Geleneksel Ekserji

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına uymayan bir çevrimi yürütmek mümkün değildir. Bir çevrimden alınabilecek maksimum iş miktarı (ısı makineleri) veya bir çevrime verilebilecek minimum iş miktarını (soğutma çevrimleri ve ısı pompaları) belirlemektedir. İş, bir sistemin geçtiği hal değişimi, sistemin ilk haline ve son haline de bağlıdır. Bir ısı makinesinde elde edilen maksimum iş veya bir soğutma makinesine verilecek minimum iş, sistemdeki hal değişimlerinin tersinir olması ile sağlanabilir. Tersinir bir sistemin son hali, çevre hali (ölü hal) ise bu sistemden elde edilen işe ekserji adı verilir (Açıkkalp, 2013: 14).

Ekserji veriminin artması, yani ekserji kayıplarının azalması durumunda proste gerçekleşecek kaynak tüketimi, yıkım ve kayıp ekserji emisyonları ters orantılı olarak azalacaktır (Grafik 3.1).



Grafik 3.1. Bir Prosesin Kaynak Tüketimi, Yıkım ve Kayıp Ekserji Emisyonları ile Ekserji Verimi Arasındaki Durumu

Kaynak: (Rosen ve Dincer, 1997: 651)

3.1.1. Ekserji İfadeleri

Isıl bir sistemde manyetik, elektrik ve yüzey gerilmesi etkilerinin olmadığı varsayımıyla ekserji ifadesidir.

$$e = e_{kn} + e_{pt} + e_{ph} + e_{ch} \quad (3.1)$$

Bu denklemde; e_{kn} , e_{pt} , e_{ph} , e_{ch} sırasıyla özgül (birim kütle başına) kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjilerdir. Potansiyel ve kinetik ekserjiler tamamen işe dönüşebilen mekanik ekserjilerdir. Çevre şartlarına bağlı olmaksızın doğrudan potansiyel ve kinetik enerjilere eşittir. Kinetik ve potansiyel enerji (ekserji) sırasıyla:

$$e_{kn} = \frac{v^2}{2} \quad (3.2)$$

$$e_{pt} = g \cdot z \quad (3.3)$$

olarak gösterilebilir. Fiziksel ekserji, sistemin basıncı ve sıcaklığına ilişkili olup, doğrudan çevre koşullarına bağlıdır. Fiziksel ekserji kapalı ve açık sistemler için farklı şekilde ifade edilir. Kapalı ve açık sistemlerde özgül ekserji sırasıyla aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir:

$$e_{ph} = (u - u_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) \quad (3.4)$$

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (3.5)$$

‘ u ’ özgül iç enerjiyi, ‘ h ’ özgül entalpiyi, ‘ s ’ özgül entropiyi, ‘ P ’ basıncı ve ‘ T ’ sıcaklığı göstermektedir. Denklem (3.3) ve (3.4) e bakıldığında s , h ve u değerlerinin bulunması özgül ısıların sıcaklık ile değişmesine veya sıcaklıkla sabit kalmasına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Açıkkalp, 2013: 15). Özgül ısıların sıcaklıkla sabit olduğu kabulü ile h , u ve s :

$$h_f - h_i = C_p (T_f - T_i) \quad (3.6)$$

$$u_f - u_i = C_v (T_f - T_i) \quad (3.7)$$

$$S_f - S_i = C_v \ln \frac{T_f}{T_i} - R \ln \frac{P_f}{P_i} \quad \text{veya} \quad S_f - S_i = C_p \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (3.8)$$

olarak gösterilir. Özgül ısıların sıcaklığa bağlı olduğu hallerde h , u ve s denklemleri:

$$h_f - h_i = \int_{T_i}^{T_f} C_p (T) dT \quad (3.9)$$

$$u_f - u_i = \int_{T_i}^{T_f} C_v (T) dT \quad (3.10)$$

$$S_f - S_i = \int_{T_i}^{T_f} \frac{C_v(T)}{T} dT - R \ln \frac{P_f}{P_i} \quad \text{veya} \quad S_f - S_i = \int_{T_i}^{T_f} \frac{C_p(T)}{T} dT + R \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Üstte belirtilen denklemlerde R , C_v ve C_p ifadeleri sırasıyla ideal gaz sabiti, sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısıları göstermektedir. Özgül ısıların sıcaklıkla değişimini gösteren denklemler kesin sonuçlar sağlarlar. Ancak düşük sıcaklık aralıklarında özgül ısıların sabit kabul edilmesi ufak bir hata oranıyla oldukça doğru sonuçlar vermesinin haricinde işlemlerde de kolaylık sağlar.

Yanmış gazların ideal gaz denklemlerine uyduğu kabulü ile fiziksel ekserji:

$$e_{ph} = C_p [T - T_0 - T_0 \ln(\frac{T}{T_0})] + R \ln \frac{P}{P_0} \quad (3.12)$$

denklemini ile hesaplanabilir.

Kimyasal ekserji reaksiyon sonucunda oluşan kimyasal değişikliklerden kaynaklanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$e_{ch} = -RT_0 \sum \frac{P_{0g}}{P_0} \quad (3.13)$$

Denklemden, P_{0g} gazın kısmi basıncı, P_0 referans çevre basıncıdır. Enerjinin aksine bir sistemdeki ekserji korunmaz ve bir kısmı tersinmezlikler (entropi üretimi) nedeniyle yok olur. Sistemde birim zamanda meydana gelen ekserji yok oluş akımı: (Açıkkalp, 2013: 17).

$$\dot{E}_D = \dot{E}_F - \dot{E}_P \quad (3.14)$$

Yukarıda, $\dot{E}_F$ (yakıtın ekserji akımını) birim zaman için arzulanan ekserji çıktısını sağlamak için kaynaktan sağlanan gider ve $\dot{E}_P$ (ürünün ekserji akımını) birim zaman için sistemin işleyişinden kaynaklanan arzu edilen ekserji çıktısıdır. Bir sistemin enerji veriminden (birinci yasa verimi) söz edilirken, ekserji veriminden (ikinci yasa verimi) söz etmek de mümkündür. Birinci yasa verimi sisteme giren enerjinin ne kadar verimli kullanıldığının göstergesi iken, ikinci yasa verimi sistemin tersinir bir çevrime ne kadar yakın olduğunun bir göstergesidir.

Ekserji verimi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\phi = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} \text{ veya } \phi = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (3.15)$$

Ekserji kayıp oranı:

$$y = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (3.16)$$

Şeklinde ifade edilir. Ekserji verimi ve ekserji kayıp oranı sistemin değerlendirilmesi için tanımlanmış temel iki ölçüttür.

Bir sistem için birim zamandaki ekserji dengesi:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (3.17)$$

Denklemden $\dot{E}_L$ (kayıp ekserji akımını) sistemde artık yararlanılamayacak şekilde sistem sınırlarından atılan ekserjidir (Açıkkalp, 2013: 18).

3.2. Genişletilmiş Ekserji Analizi

Genişletilmiş ekserji analizi (GEA), uygun bir termodinamik temelde, sistem ile çevre arasındaki tüm akışları hesaba katmak için, yalnızca enerji ve malzeme akışlarını değil, aynı zamanda dışsallıkları (işgücü, sermaye ve çevresel maliyetler) eşdeğer ekserji akışlarına dönüştürür. Genişletilmiş ekserji, kaynakların kümülatif ekserji içeriğinin, iş gücünün, sermayenin ve çevresel iyileştirmenin eşdeğer ekserji akışlarının toplamı olarak tanımlanır (Seçkin, 2013: 19).

Bir ülkeye yapılan toplam enerji girdisi, ülkedeki toplam güneş enerjisinin girdisi olarak kabul edilebilir. Bu güneş enerjisi, aşağıdaki denkleme göre ekserji değerine dönüştürülür.

$$E_{in} = 365 \cdot I_d \cdot A_{total} \cdot \zeta \quad (3.18)$$

Bu denklemde ' I_d ' yatay bir yüzeydeki ortalama güneş radyasyonu (W / m^2), ' A_{total} ' ülkenin toplam alanıdır ve ' ζ ' güneş radyasyonunun ekserji katsayısıdır. Genişletilmiş ekserji analizinin geleneksel ekserji analizi yaklaşımından farklı, ekserji birimleri açısından işgücü, sermaye ve çevresel etkinin dahil edilmesidir. Genişletilmiş ekserji analizinde, sadece enerji akışları dahil edilmekle kalmaz, aynı zamanda, denklem 3.19'da görülebildiği üzere bir süreçte ihtiyaç duyulan malzemeler, çevresel iyileştirme maliyetleri, işçilik ve sermayenin ekserji eşdeğeri de dahil edilir.

$$EEA = E_{cexc} + E_{xK(energy)} + E_{xL(energy)} + E_{xE} \quad (3.19)$$

Burada, ' E_{cexc} ' hammaddeler veya tamamen üretilmiş malzeme girdileri dahil olmak üzere malzemelerin kümülatif ekserji tüketimidir. ' E_{cexc} ' bir sürecin yaşam döngüsü içinde tüketilen tüm ekserjiyi içerir. ' E_{xK} ' enerji sektöründeki eşdeğer dışsal içeriği cinsinden ifade edilen ekipmanın, ücretlerin vb. toplam parasal maliyetini gösterir. ' E_{xL} ' enerji sektöründeki eşdeğer ekserjetik girdisi cinsinden ifade edilen işgücü katkısının toplamını gösterir ve ' E_{xE} ' kirlenici emisyonları ortadan kaldırmak için çevresel iyileştirmenin ekserji tüketimidir.

$$E_{xL(energy)} = ee_L N_{wh} \quad (3.20)$$

Bu denklemde ' ee_L ' değeri (iş gücünün ekserji eşdeğeri) şu şekilde hesaplanır:

$$ee_L = \frac{365 N_h Ex_{surv} f}{N_{wh}} \quad (3.21)$$

' f ' belirli bir sosyal sistemdeki modern yaşam düzeyiyle ilgili bir tüketim düzeltme faktörüdür. (Seçkin, 2013: 21).

$$f = HDI / HDI_0 \quad (3.22)$$

' HDI ', Birleşmiş Milletler tarafından her yıl yayınlanan insani gelişme endeksidir ve ' HDI_0 ', sanayi öncesi bir toplumun insani gelişme endeksidir. ' Ex_{surv} ' bir kişinin metabolik hayatta kalması için minimum temel ekserji tüketimini ifade eder (UNDP, 2019). ' N_h ' Türkiye'nin nüfusu, ' N_{wh} ' enerji sektöründe yıllık çalışma saatlerini ifade eder.

$$Ex_{used} = 365 \cdot f \cdot Ex_{surv} \cdot N_h \quad (3.23)$$

' $E_{x_{used}}$ ' tüm popülasyon tarafından tüketilen ekserjiyi ifade eder. Para birimlerinin belirli ekserji eşdeğeri aşağıdaki denklemde tanımlanır: (Ehyaeia vd., 2019: 378).

$$Ex_K = ee_K \Sigma CC = \beta . ExL \quad (3.24)$$

$$ExL = \alpha . E_{in} \quad (\text{Colombo vd., 2015:68}) \quad (3.25)$$

burada, ' CC ' toplam maliyettir(€). Ekonomik faktörler α ve β değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\alpha = \frac{E_{x_{used}}}{E_{in}} \quad (3.26)$$

$$\beta = \frac{M2-S}{S} \quad (3.27)$$

burada ' S ' ortalama ücret ve para biriminin toplam enerji eşdeğeri olarak ulusal ücret miktarını gösterir.

$$E_{x_{env}} = CO_2 e_{CO_2} \quad (3.28)$$

Çevresel etki azaltma değerlerinin ekserji değeri, CO_2 miktarı ile emisyon faktörü çarpılarak bulunur. Nihai parametre, ürün ekserjisini (yani elektrik) genişletilmiş ekserji hesabına oranlayan genişletilmiş ekserji verimliliğidir (Seçkin, 2013: 22).

$$\varphi = \frac{E_p}{GEA} \quad (3.29)$$

4. GENİŞLETİLMİŞ EKSERJİ ANALİZİ MODELLEMESİ İÇİN SİSTEM AÇIKLAMASI

Geniştirilmiş ekserji analizi modellemesi için EnergyPLAN yazılımı kullanılmıştır. EnergyPLAN, elektrik, ısıtma, soğutma, sanayi ve ulaşım dahil olmak üzere ulusal enerji sisteminin çalışmasını saatlik olarak gerçekçi bir şekilde simüle edebilen Delphi tabanlı bir girdi/çıktı simülasyon modeline sahip bir yazılımdır. Bu yazılım belirli bir model mantığı ile çalışır buna da programın adı ile EnergyPLAN modeli adı verilmektedir. EnergyPLAN programı, Danimarka'daki Aalborg Üniversitesi Sürdürülebilir Enerji Planlama Araştırma Grubu tarafından 1999 yılında oluşturuldu ve bugüne kadar birçok farklı versiyonla düzenli olarak geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu yazılım modeli, dünya çapında birçok araştırmacı, danışman ve politika yapıcı tarafından kullanılmaktadır. EnergyPLAN'ın dünya çapında yaygın olarak kullanılmasının nedeni kullanıcı dostu bir arayüze sahip olması, birçok ülkede erişilebilir olması ve ücretsiz olmasıdır.

EnergyPLAN yazılımının temel amacı, teknik ve ekonomik analizlere dayalı ulusal veya bölgesel enerji planlama stratejilerini desteklemektir. Bu yazılım, elektrik, ısı, ulaşım ve sanayi gibi tüm ulusal ve bölgesel enerji sistemlerini kapsamaktadır.

EnergyPLAN, belirleyici bir girdi/çıktı modelidir. Yani belirli parametrelerin değerlerini sisteme girerek bize gerçeğe çok yakın bir çıktı sağlar.

Bu program için genel girdiler şunlardır:

- Yıl içerisindeki saatlik enerji talep değerleri
- Yenilenebilir enerji kaynakları
- Enerji üretim kapasiteleri
- Enerji sistem verimlilik değerleri
- Maliyetler

Genel çıktılar ise şunlardır:

- Enerji dengesi ve yıllık üretim
- Yakıt tüketimi
- İthal ve ihraç edilen elektrik
- Toplam maliyetler

EnergyPLAN, diğer enerji simülasyon modelleriyle karşılaştırıldığında bazı özellikler ile ön plana çıkmaktadır.

- EnergyPLAN, Monte Carlo yöntemlerini veya olasılık modellerini kullanan modellerden farklı olarak belirleyici bir modeldir. Aynı girdi için her zaman aynı sonucu verecektir.
- EnergyPLAN, yıllık üretim ve tüketimin toplamını hesaplayan modelden farklı olan saatlik bir simülasyon modelidir. Başka bir deyişle, model bize en gerçekçi sonuçları sağlamak için elektrik ve ısı talebinin mevsimsel veya haftalık dalgalanma etkilerini analiz edebilir.
- Yazılım, yıl boyunca belirli bir zaman dilimine göre çalışan bir modelden farklı olarak, yılın her günü için saatlik verileri analiz eder.
- Yazılım, dinamik programlama, iterasyon ve gelişmiş matematiksel araçlardan ziyade analitik programlamaya dayanmaktadır. Bu yazılım hesaplamalarının hızlı ve doğrudan tamamlanmasını sağlar.
- Bu yazılım, sadece elektrik üretimi sektörüne odaklanmakla kalmıyor, aynı zamanda ulaşım, bölgesel ısıtma ve soğutma, doğal gaz şebekeleri ve altyapıyı da analiz etmektedir. Kısacası bir bölge veya ülkedeki enerji ile ilgili tüm projeleri analiz eder ve gerçeğe en yakın simülasyonlar yapmaktadır.

Enerji talebi, üretimi ve enerji sistemlerinin gerek bölgesel gerekse de ulusal düzeyde analizi ile gelecek talep ve üretim tahminlerinin yapılması sağlıklı enerji stratejilerinin oluşturulması için oldukça önemlidir. Ulusal ve yerel yönetimler bu konuya dikkat ederse, uzun vadede sadece enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda üretim kapasitesini ve yatırım yönetimi verimliliğini de iyileştirebilir.

Yukarıda belirtildiği gibi bu çalışmada iki senaryo oluşturulmuştur. 2019 referans yılı olarak seçilmiştir. Çünkü tam bir veri setinin mevcut olduğu en son yıl olmuştur. Tüm senaryolar için ortak varsayımlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Enerji sektöründe su tüketimi ihmal edilmektedir.
- Emisyon olarak sadece CO₂ dikkate alınmıştır.
- Ulaştırma sektörü için yakıt tüketimi, enerji sektörünün bir parçası olarak görülmemektedir ve elektrikli otomobillerin enerji talebi ihmal edilebilir düzeydedir.
- Bu çalışmada Nükleer enerji dahil edilmemektedir.

İlk senaryo (senaryo I), Türkiye'nin 2019'daki fiili enerji durumunu temsil etmektedir.

İkinci senaryoda, enerji temini %100 yenilenebilirdir. Bu senaryo için, farklı yenilenebilir teknolojilerin katkılarının mevcut paylarıyla orantılı olarak arttığı varsayılmaktadır. Böylece rüzgâr türbinleri (%9), fotovoltaikler (%6), jeotermal güç (%5), biyokütle (%31) ve hidroelektrik (%49) tarafından elektrik üretilir.

Tüm senaryolar için yakıt tüketimi tablo 5.2 ve tablo 5.3’de görülebilmekte ve enerji talep ve arz değerleri tablo 5.4 ve 5.5’de gösterilmektedir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmayı teknik yönler üzerinden genişletmek için, 2019 yılı Türkiye enerji sektöründe genişletilmiş ekserji analizi uygulanmıştır. Çalışmada farklı senaryolar incelenmiştir. Çalışmanın girdi verileri tablo 5.1.'de rapor edilmiştir.

Tablo 5.1. Genişletilmiş Ekserji Analizinde Kullanılan Veriler

	Mevcut Durum	%100 Yenilenebilir
$Ex_{in} (PJ)$	3550926	3550926
N_h	83154999	83154999
$N_w (Toplam)$	32372000	32372000
$N_w (Enerji)$	256737	535600
$N_{wh}(Toplam)$	75750480000	75750480000
$N_{wh}(Enerji)$	600765100	1253304000
$S (Euro/h)$	1	1
$M2(MEuro)$	384807	384807
F	14,91	14,91
Ex_{surv} (MJ/day person)	10,5	10,5
α	0,0013	0,0013
β	4,08	4,08

Tablo 5.1'de giren ekserji olarak alınan ' Ex_{in} ' ülkeye giren toplam güneş enerjisidir. ' N_h ' Türkiye'nin 2019 yılında ki toplam nüfusunu temsil etmektedir. ' $N_w (Toplam)$ ' ülkenin toplam işçi sayısıdır. Belirtilen bu faktörlerin kendi değerleri her iki senaryo için eşdeğerdir. ' $N_w (Enerji)$ ' ise enerji sektöründeki işçi sayısını gösterir. Tümü yenilenebilir sektöründeki işçi sayısı mevcut durumdaki işçi sayısının 2 katından daha fazla olduğu görülmektedir. ' $N_{wh}(Total)$ ' ve ' $N_{wh}(Energy)$ ' sırasıyla toplam yıllık çalışma saati ve enerji alanında yıllık çalışma saati olarak gösterilmiştir. Her iki senaryoda ki ' $N_w (Enerji)$ ' değerlerine bağlı olarak ' $N_{wh}(Energy)$ ' değeri tümü yenilenebilir sektörde daha fazla olduğu görülebilir. ' S ' ortalama ücret, ' f ' belirli bir sosyal sistemdeki modern yaşam düzeyiyle ilgili bir tüketim düzeltme faktörüdür. ' Ex_{surv} ' bir kişiyi hayatta kalması için gereken ekserji gereksinimidir. ' α ' ve ' β ' sırasıyla ilk ekonomik faktör ve ikinci ekonomik faktör olarak adlandırılır. ' α ' tüm nüfus tarafından tüketilen ekserjinin, giren güneş enerjisine oranı olarak hesaplanır.

İlk olarak, yakıt tüketimi tartışılır ve sonuçlar tablo 5.2 ve tablo 5.3’de görülebilir.

Tablo 5.2. 2019 Yılı İçin Yakıt Tüketimleri (Mevcut Durum)

YILLIK YAKIT TÜKETİMLERİ (TWh/yıl) TOPLAM	
Kömür Tüketimi	205,7
Petrol tüketimi	0,34
Doğalgaz Tüketimi	83,84
Biyokütle Tüketimi	4,25
Nükleer Yakıt Tüketimi	0
Yakıt Tüketimi (Toplam)	434,07

Tablo 5.2’de görüldüğü gibi 2019 yılının mevcut durumdaki yakıt tüketimi sırasında ilk sırayı 205,7 TWh/yıl ile kömür tüketimi yer almaktadır. Doğalgaz tüketimi 83,84 TWh/yıl ile ikinci sırayı alırken, petrol tüketimi ve biyokütle tüketimi düşük değerlere sahiptir. 2019 yılı mevcut durumun yakıt tüketimin de, Nükleer yakıt tüketimi pay sahibi değildir. Mevcut durumdaki toplam yakıt tüketimi 434,07 TWh/yıl olup bu değer büyük kısmını kömür ve doğalgaz tüketimi oluşturmaktadır.

Tablo 5.3. 2019 Yılı İçin Yakıt Tüketimleri (%100 Yenilenebilir Senaryo)

YILLIK YAKIT TÜKETİMLERİ (TWh/yıl) TOPLAM	
Kömür Tüketimi	0
Yağ tüketimi	0
Doğalgaz Tüketimi	0
Biyokütle Tüketimi	269,12
Nükleer Yakıt Tüketimi	0
Yakıt Tüketimi (Toplam)	269,12

2019 yılının tüm yenilenebilir yakıt tüketimleri için biyokütle tüketimi 269,12 TWh/yıl ile tek değere sahip olup %100 yenilenebilir senaryosunda toplam yakıt tüketimi bu değerdir(Tablo 5.3). Enerji talebi ve arzları tablo 5.4 ve tablo 5.5’de verilmiştir. Bu çalışmada taleplerin her iki senaryo için de aynı olduğu ve sadece tedarik yöntemlerinin farklı olduğu varsayılmıştır.

Tablo 5.4. Enerji Talep ve Arz Değerleri (Mevcut Durum)

TALEP		ARZ				
	Elektrik	Rüzgar	PV	Hidro	PP	Jeotermal
BİR YIL İÇİN TOPLAM (TWh / yıl)						
Yıllık:	272	20,47	10,11	86,99	216,18	10,07
AYLIK ORTALAMA DEĞERLER (MW)						
Ocak	31247	1819	474	9880	26142	1085
Şubat	31060	2084	742	11390	24912	1121
Mart	29952	2394	1025	11366	23210	1153
Nisan	29718	2260	1296	11634	22716	1118
Mayıs	29222	2314	1602	8660	22932	973
Haziran	30702	2890	1767	11183	22758	1083
Temmuz	33161	3416	1814	11504	25051	1040
Ağustos	34492	3402	1734	11640	26497	1030
Eylül	31618	2403	1373	8531	25495	1113
Ekim	27631	1953	897	7848	22359	1125
Kasım	31123	1472	607	7831	26312	1450
Aralık	31642	1527	469	7444	26932	1471
Yıllık ortalama	30965	2330	1151	9903	24611	1147
Yıllık maksimum	43320	8701	6688	20979	32866	1532
Yıllık minimum	15875	0	0	4196	12204	632

Tablo 5.4’de mevcut durumun elektrik talebi ve farklı enerji çeşitleri için aylık ortalama değerler, yıllık maksimum, minimum ve yıllık ortalama değer ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu tabloya göre ilk olarak aylık ortalama değerler göz önüne alındığında rüzgâr enerjisinin temmuz ayında 3416 MW ile en yüksek değere sahip iken, PV Temmuz ayında 1814 MW, Hidroelektrik Ağustos ayında 11640 MW, PP Aralık ayında 26932 MW, Jeotermal enerji ise Aralık ayında 1471 MW ile en yüksek değerler belirtilmiştir. Elektrik talebinin 34492 MW ile en yüksek

değere sahip olduğu ay Ağustos, 27631 MW ile en düşük değere sahip Ekim ayında olduğu belirtilmiştir. Bu enerji çeşitlerinin en düşük değerleri Aralık ayında PV ve Hidro, Kasım ayında rüzgâr, Ekim ayında PP ve son olarak Mayıs ayında Jeotermal enerji olarak görülmektedir. Elektrik talebinin yıllık maksimum ve yıllık minimum değerleri sırasıyla 43320 MW ve 15875 MW'tır. Enerji çeşitlerinin arz miktarlarının yıllık ortalaması toplamı 39142 MW ile elektrik talebinin yıllık ortalama değerini karşılamaktadır.

Tablo 5.5. Enerji Talep ve Arz Değerleri (%100 yenilenebilir senaryo)

TALEP		ARZ				
	Elektrik	Rüzgar	PV	Hidro	PP	Jeotermal
BİR YIL İÇİN TOPLAM (TWh / yıl)						
Yıllık:	272	23,63	15,15	86,99	134,56	12,49
AYLIK ORTALAMA DEĞERLER (MW)						
Ocak	31247	2136	709	9880	17044	1345
Şubat	31060	2467	1114	11390	14891	1390
Mart	29952	2830	1535	11366	13215	1429
Nisan	29718	2642	1945	11634	12626	1386
Mayıs	29222	2626	2402	8660	14640	1207
Haziran	30702	3247	2656	11183	12857	1343
Temmuz	33161	3887	2718	11504	14126	1289
Ağustos	34492	3906	2592	11640	15217	1277
Eylül	31618	2779	2053	8531	16799	1380
Ekim	27631	2269	1344	7848	15000	1395
Kasım	31123	1699	908	7831	18374	1798
Aralık	31642	1765	701	7444	18989	1824
Yıllık ortalama	30965	2690	1725	9903	15319	1422
Yıllık maksimum	43320	10000	10000	20979	22284	1900
Yıllık minimum	15875	0	0	4196	371	784

Tablo 5.5’de %100 yenilenebilir senaryo için elektrik talebi ve farklı enerji çeşitlerinin arz değerleri verilmiştir. Bu senaryoda mevcut durumun elektrik talebi değerleri ile aynı değere sahip olup enerji çeşitlerinin arz değerleri farklılık göstermiştir. Hidroelektrik enerjisini arz değerleri hariç diğer enerji çeşitlerinde mevcut duruma göre bir artış söz konusudur. Enerji çeşitlerinin arz değerleri göz önüne alındığında Ağustos ayında rüzgâr enerjisi ve hidroelektrik enerjisi sırasıyla 3906 MW ve 11640 MW ile en yüksek seviyededir. Aralık ayında ise PP 18989 MW, jeotermal enerji ise 1824 MW ile diğer aylardan daha yüksek değere sahiptir. Enerji çeşitlerinden son olarak en yüksek değere sahip olan PV Temmuz ayında 2718 MW’tır. Enerji çeşitlerinin yıllık ortalama arz değeri toplamı 31059 MW ile elektrik talebinin yıllık ortalama değeri olan 30965 MW’tan yüksektir.

Tablo 5.6. Genişletilmiş Ekserji Analizinin Sonuçları (PJ)

	Mevcut Durum	%100 Yenilenebilir
Üretilen Elektrik Ekserjisi (E_{XP})	980	980
Emeğin Ekserjisi (E_{XL})	38	79
Sermaye Ekserjisi (E_{XK})	479	4813
CO ₂ Giderimi İçin Ekserji (E_{XE})	55	0
Malzemelerin Ekserjisi (E_{XCEXC})	1114	1095
Toplam Genişletilmiş Ekserji Talebi (GEA)	1687	7213
Ekserji Yıkımı (E_{XD})	707	6234

Tablo 5.6’da genişletilmiş ekserji analizinin sonuçları verilmiştir. Ekserji yıkımı, kaybedilen iş potansiyeline karşı gelir. Aynı zamanda tersinmezlik veya kayıp iş olarak da adlandırılır. Ekserji yıkımı gerçek işlemler için pozitif, ancak tersinir işlemler için sıfırdır. Üretilen elektrik ekserjisinin (E_{XP}), toplam genişletilmiş ekserji talebine oranı bize ‘ Φ ’ değerini verir.

Tablo 5.7. Genişletilmiş ekserji değerlendirme endeksleri

	Mevcut Durum	%100 Yenilenebilir
Φ	0,58	0,14
E_{XP}/E_{XCEXC}	0,88	0,9
E_{XP}/E_{XL}	25,99	12,48
E_{XP}/E_{XK}	2,04	0,2
<i>Res.</i>	0,66	0,15
<i>Lab.</i>	0,022	0,011
<i>Kap.</i>	0,28	0,66
<i>Env</i>	0,03	0

' Ex_{CEXC} 'güç üretiminden kaynaklanan malzeme tüketiminin ekserji eşdeğeridir (örneğin yanma, ayrıca aşınma nedeniyle). Bir ürünün üretimi veya işlenmesi sırasındaki toplam ekserji gereksinimi de denilebilir. Malzeme tüketimi, ekserji yıkımına önemli bir katkıdır. Bu çalışmada ' Ex_{CEXC} 'ye bağlı olarak iki endeks vardır. Birincisi, Res , ' Ex_{CEXC} 'nin toplam genişletilmiş ekserji içindeki payını temsil eder. İkinci olarak, Ex_p / Ex_{CEXC} , maksimize edilmesi istenen, tüketilen malzeme başına üretilen çıktı miktarını tanımlar. Her iki senaryoda da enerji sisteminin toplam ekserji talebinde malzeme tüketiminin önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Tablo 5.7). Bu değeri düşürmek için yani daha az miktarda kaynak kullanımı için verimli teknolojiler kullanılabilir. Şu anda bu payın Res_{mevcut} durum $\approx \%66$ olduğu tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, yenilenebilir enerjilere geçiş malzeme tüketimini büyük ölçüde düşürür. Toplam genişletilmiş ekserji üzerindeki pay ise önemli ölçüde azalır ($Res\%100$ yenilenebilir $\approx \%15$). Bunun nedeni, diğer elektrik üretim hizmetlerine olan talebin de benzer bir oranda azalmasıdır. ' Ex_p / Ex_{CEXC} ' fiziksel olarak kaynakların ne kadar verimli dönüştürüldüğünü gösterir (Tablo 5.7). Bu sonuçlar, Türkiye elektrik sektörünün verimliliğinin yenilenebilir enerjiye dayalı bir elektrik sektörüne geçilerek önemli ölçüde artırılabilirliğinin altını çizmektedir.

Genişletilmiş ekserjinin bir diğer önemli bileşeni, iş gücünün ekserjetik eşdeğeridir. Hiçbir üründe insan katkısı göz ardı edilemez. Bu nedenle, girdi ekserjisinin bir kısmı, çalışanların kendileri tarafından tüketilen ekserji ile ilgilidir ve dikkate alınmalıdır. Hesaplamalarda, iş gücünün ekserjetik eşdeğeri denklem (3.21) ile elde edilir. Bu denklemde nüfus sayılarını, toplam çalışma saatlerini, insani gelişme indeksini ve bir kişinin hayatta kalması için gereken ekserjiyi de içerir. Fosil enerjilerin yerini yenilenebilir enerjiler alırsa, iş gücüne ilişkin ekserji talebi iki katına çıkmaktadır. İlk bakışta bu istenmeyen bir durum olarak görülmektedir. Ancak, iş gücünün ekserjisi, diğer ekserji talebi biçimlerinden farklı görülebilir. Emegın ekserjisi, istihdam sayılarıyla doğrusal bir şekilde ilişkilidir. Bu nedenle, iş gücü ekserjisinin yüksek bir değeri olumlu bir etki olarak görülebilir. İş gücü ekserjisinin toplam genişletilmiş ekserji ihtiyacının yalnızca küçük bir payına katkıda bulunduğu söylenebilir. Bu nedenle, kaynak tükenmesi üzerindeki olumsuz etki oldukça küçüktür. Sonuçlar, elektrik sektörünün yenilenebilir bir enerji sistemine dönüştürülmesinin mevcut duruma göre daha fazla iş imkanı sağlayacağını göstermektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin geleneksel sistemlerden daha fazla çalışana ihtiyacı olduğunu ve geleneksel sistemlerin yenilenebilir sistemlere dönüştürülmesinin insanlar için istihdam olanakları sağladığını vurgulamak en önemli noktalardan biridir.

Genişletilmiş ekserjinin bir başka kısmı, sermayenin ekserjetik eşdeğeridir(E_{xk}). Sermaye, iş gücü ve enerji girdisinden kaynaklanan bir üründür. Bu nedenle ekserji akılarına dönüştürülebilir. Tablo 5.6'da sermayenin ekserji karşılığı görülebilir. Yenilenebilir enerji teknolojileri kurmanın yüksek sermaye gereksinimi nedeniyle, tamamen yenilenebilir senaryo için bu değer yüksek seviyededir. Ancak bu sadece kısa ve orta vadeli perspektif için geçerlidir. Uzun vadede, %100 yenilenebilir senaryolarda sermaye talebi aslında daha düşüktür çünkü fosil enerji ithalatına sermaye çıkışı önlenir. Sermayenin genişletilmiş ekserji üzerindeki etkisini değerlendirmek için iki endeks kullanılabilir: Bunlar, para girişi başına ürün çıktısı olan ' E_{xp} / E_{xk} ' ve genişletilmiş ekserji içinde sermayenin payı olan ' Kap 'tır. %100 yenilenebilir senaryo için sermaye talebi yüksek olduğundan, elektrik üretiminin sermaye girdisine oranı ' E_{xp} / E_{xk} ' önemli ölçüde daha düşüktür. Genel olarak, sermaye talebinin mevcut durum için toplam genişletilmiş ekserji yıkımının ikinci büyük payını ve yenilenebilir enerji senaryosu için en önemlisini temsil ettiği belirtilmelidir(Tablo 5.7).

Son husus, çevresel iyileştirmenin ekserjetik eşdeğeridir (Tablo 5.6). Enerji sistemi tarafından salınan CO₂'nin atmosferden uzaklaştırılması için gerekli olan ekserjiyi kapsar. Emisyonların çevreye olan ekserjetik eşdeğeri ' Env ' olarak gösterilmiştir(Tablo 5.7). Beklenildiği üzere, mevcut enerji sistemiyle ilgili olarak, öncelikle fosil enerji taşıyıcılarına dayanan çok büyük bir ekolojik bileşen vardır. Diğer yandan ise, %100 yenilenebilir senaryoda, CO₂ emisyonları ve buna bağlı ekserji tahribatı ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak, mevcut durum için, CO₂ tutma tesislerinin inşa edilmesi ve işletilmesi gerekir, bu da ekstra yatırıma neden olur. Bu yatırım maliyeti, mevcut durum hesaplamalarında sermaye kısmına eklenir ve yenilenebilir enerji senaryoları bu maliyetin dışında tutulur.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkiye enerji sektörü incelenmiştir. Mevcut koşullar ve %100 yenilenebilir enerji sistemi varsayılarak iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

İş gücünün ekserji eşdeğeri, her iki senaryo için genişletilmiş ekserjinin yıkımında sadece küçük bir etkiye sahiptir ve birim ürün başına tüketilen işgücünün dışsal eşdeğeri çok düşüktür. Ancak sonuçlar, yenilenebilir enerjilerin insanlar için yeni istihdam fırsatları yaratmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Ekserji yıkımının ikinci ana unsuru, mevcut durum için sermaye girdisinin dışa dönük eşdeğeridir ve yenilenebilir enerji senaryoları için en önemlisidir. Bu, mevcut durum için genişletilmiş ekserji girdisinin yaklaşık % 28'ine ve yenilenebilir enerji senaryosuna % 66'sına katkıda bulunur. Ancak uzun vadeli perspektif düşünüldüğünde, Türkiye'nin halihazırda büyük miktarda fosil kaynağı ithal ettiği ve aynı zamanda negatif bir ticaret dengesine sahip olduğu unutulmamalıdır. Ancak sermayede, yenilenebilir enerji teknolojilerinde dışa bağımlılıktan dolayı ve bu teknolojilerin pahalı olduğu bilindiğinden, Türkiye'de bu teknolojilere ayrılan yatırımının artırılması ve yerli teknolojilerin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerjilere geçiş, bu ithalatı azaltacak ve sermaye çıkışını azaltacaktır. Böylelikle, yenilenebilir enerjiye dayalı bir enerji sisteminde yatırımların düşülmesinden sonra sermaye çıkışı şeklindeki ekserji girdisi azalacaktır. Bu durum, ekonomik kalkınmayı sağlamak için çok önemli bir ön koşuldur.

Tablo 5.8. Mevcut Durum Ve %100 Yenilenebilir Senaryoları İçin Sermaye Payı Yüzdeleri

Sermaye Payı	Mevcut Durum	%100 Yenilenebilir
Yatırım	42%	98%
İşçi ücretleri	8%	2%
Yakıtlar	50%	0.00

Mevcut durum en büyük kısmı olan malzeme kaynağının payı, tükenme miktarı toplam genişletilmiş ekserji üzerinden % 66'ya eşittir. Ek olarak, beklendiği gibi yenilenebilir enerji senaryosu için toplam genişletilmiş ekserji üzerindeki pay yalnızca % 15'i kadardır.

Son olarak, CO₂'yi atmosferden uzaklaştırmak ve çevresel iyileştirme için ekserji talebi, fosil enerji kaynakları yerine yenilenebilir enerji kaynakları uygulanarak genel ekserjetik verimlilik artırılabilir.

Türkiye'nin yenilenebilir enerji teknolojilerini kendi başına üretme yeteneklerini kazanmaya çalışması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu, istihdam, ekonomik kalkınma ve elbette çevresel etki gibi çeşitli açılardan oldukça avantajlı olacaktır.



KAYNAKÇA

- Açikkalp, E.** (2013). *Doğal Gaz Yakıtlı Bir Elektrik Üretim Tesisi ve Bir Trijenerasyon Sisteminin İleri Ekserji ve Eksergoekonomik Yöntemleri Kullanarak Analizi*. (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Hosseini, S.S., Dashti, B.B., & Soufiyan M.M.** (2018). Performance Assessment Of A Wind Power Plant Using Standard Exergy and Extended Exergy Accounting (EEA) Approaches. *Journal of Cleaner Production*, 171, 127-136.
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Rahnama, E., & Rosen, M. A.** (2020). A New Systematic Decision Support Framework Based on Solar Extended Exergy Accounting Performance to Prioritize Photovoltaic Sites. *Journal of Cleaner Production*, 256.
- Ağaçbacak, C.** (2013). *Genişletilmiş Ekserji Analizi Metodunun Rüzgar Enerji Sistemlerine Uygulanması*. (Yüksek Lisans Tezi). , Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, M.** (2016). Enerji Verimliliğinin Sürdürülebilir Kalkınmadaki Rolü: Türkiye Değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 14(28), 409-441.
- Aydın, F.F.** (2010). Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 35, 317-340.
- Baran, B., Mamis, M.S., & Alagöz B.B.** (2016). Utilization of Energy From Waste Potential in Turkey as Distributed Secondary Renewable Energy Source. *Renewable Energy*, 90, 493-500.
- Chen, Q.G., & Chen, B.** (2009). Extended-Exergy Analysis of The Chinese Society. *Energy*, 34(9), 1127-1144.
- Chen, B., Dai, J., & Sciubba, E.** (2014). Ecological Accounting For China Based on Extended Exergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 334-347.
- Colombo, E., Rocco, V.M., Toro, C., & Sciubba, E. (2015).** ‘An Exergy-based Approach To The Joint Economic And Environmental Impact Assessment Of Possible Photovoltaic Scenarios: A Case Study At A Regional Level In Italy’. *Ecological Modelling*, 318,64-74.
- Demirbaş, A., & Bakis, R.** (2004). Energy From Renewable Sources in Turkey: Status and Future Direction. *Energy Sources*, 26(5), 473-484.

Durmuşoğlu, B. (2018). *Yenilenebilir Enerji Ve Karbon Emisyonu Azaltımı: Türkiye Ve En Yüksek Emisyonlu Bölgelerin Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Ehyaieia, M.A., Ahmadib, A., & Rosen, M.A. (2019). Energy, Exergy, Economic And Advanced And Extended Exergy Analyses Of A Wind Turbine. *Energy Conversion and Management* 183, 369-381.

EnergyPlan, Advanced Energy System Analysis Computer Model. *Introduction of Energyplan Software* [Erişim: 07.10.2020, www.energyplan.eu/]

Enerji Atlası (2019). 2019 Yılı Elektrik Üretiminin Kaynaklara Dağılımı. [Erişim: 16.06.2020, <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-uretimi/>]

Erdoğan, N. (2020a). *Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Yönelik Teşvikler İle Yenilenebilir Enerji Üretimi Arasındaki Etkileşim Ve Finansal Yansımaları*. (Yüksek Lisans Tezi). Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sivas.

Erdoğan, S. (2020b). Enerji, Çevre ve Sera Gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi*, 10(1), 277-303.

Ertesvåg, I.S. (2005). Energy, Exergy, and Extended-Exergy Analysis of The Norwegian Society 2000. *Energy*, 30(5), 649-675.

Evrendilek, F., & Ertekin, C. (2003). Assessing The Potential of Renewable Energy Sources in Turkey. *Renewable Energy*, 28(15), 2203-2315.

Jawad, H., Jaber, M.Y., & Bonney, M. (2015). The Economic Order Quantity Model Revisited: An Extended Exergy Accounting Approach. *Journal of Cleaner Production*, 105, 64-73.

Kaygusuz, K., & Sarı, A. (2003). Renewable Energy Potential and Utilization in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 44(3), 459-478.

Koçaslan, G. (2010). Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi Çerçevesinde Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Yeri Ve Önemi. *Sosyal Bilimler Dergisi*, (1), 53-61.

Koroneos, C., Spachos, T., & Moussiopoulos N. (2003). Exergy Analysis of Renewable Energy Sources. *Renewable Energy*, 28(12), 295-310.

Mohammad, S. (2019). *Renewable Energy Review: Barriers To Renewable Energy In Developing Countries*. (Yüksek Lisans Tezi). Boğaziçi Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Oğulata, R. T.(2003). Energy Sector and Wind Energy Potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 469-484.

Özarslan, B., & Bayraç, H.N. (2018). Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisi: Ardl Sınır Testi Yaklaşımı. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 10(19), 381-395.

Peiró, L.T., Méndez, G.V., Sciubba, E., & Durany, X.G. (2010). Extended Exergy Accounting Applied to Biodiesel Production. *Energy*, 35(7), 2861-2869.

Ptasinski, K.J., Koymans, M.N., & Verspagen, H.H.G. (2006). Performance of The Dutch Energy Sector Based on Energy, Exergy and Extended Exergy Accounting. *Energy*, 31(15), 3135-3144.

Rahim, M., & Gündüz, D. (2013). Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 6(2), 19-27.

Rocco, M.V., Sciubba, E., & Colombo, E. (2014). Advances in Exergy Analysis: A Novel Assessment of The Extended Exergy Accounting Method. *Applied Energy*, 113, 1405-1420.

Rosen, M.A., & Dincer, İ. (1997). On Exergy And Environmental Impact. *International Journal Of Energy Research*, 21(7), 643-654.

Sciubba, E. (2001). Beyond Thermoeconomics? The Concept of Extended Exergy Accounting and Its Application To The Analysis and Design of Thermal Systems. *Exergy, An International Journal*. 1 (2), 68-84.

Sciubba, E. (2003). Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy*, 28(13), 1315-1334.

Sciubba, E. (2004). Exergoeconomics. *Encyclopedia of Energy*, 577-591.

Sciubba, E., Bastianoni, E., & Tiezzi, E. (2008). Exergy and Extended Exergy Accounting of Very Large Complex Systems With an Application to The Province of Siena, Italy. *Journal Of Environmental Management*, 86(2), 372-382

- Sciubba, E.** (2011). A Revised Calculation of The Econometric Factors *A*- and *B* For The Extended Exergy Accounting Method. *Ecological Modelling*, 222(4), 1060-1066.
- Seçkin, C., Sciubba, E., & Bayulken, A.R.** (2012). An Application of The Extended Exergy Accounting Method to The Turkish Society, year 2006. *Energy*, 40(1), 151-163.
- Seçkin, C.** (2013). *Extended Exergy Accounting (Eea) Analysis of Turkish Society-Determination of Environmental Remediation Costs.* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Seçkin, C.** (2016). Extended Exergy Accounting Analysis of IGCC Process – Determination of Environmental Remediation Cost of Refinery and Coke Processing Waste. *Journal of Cleaner Production*, 119(15), 178-186.
- Seydioğulları, H.S.** (2013). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji. *Planlama*, 23(1), 19-25.
- Song, D., Lin, L., & Wu, Y.** (2019). Extended Exergy Accounting For A Typical Cement Industry in China. *Energy*, 174, 678-686.
- Soylu, B.N.** (2019). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ve Konya İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli.* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- Sönmez, M., Akgüngör, P., & Bektaş, S.** (2017). Estimating Transportation Energy Demand in Turkey Using The Artificial Bee Colony Algorithm. *Energy*, 122, 301-310.
- Şenel C.M., & Koç, E.** (2015). Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu Genel Değerlendirme. *Mühendis ve Makine*, 56, 46-56.
- T.C. Serhat Kalkınma Ajansı** (2015). *Güneş Enerjisi.* [Erişim: 23.12.2020, <https://www.serka.gov.tr/dokumanflipbook/yesil-enerji-kaynaklari-sektor-raporu/227>]
- Tekel, E.** (2006). *Termik Santrallerin Enerji Ve Ekserji Analizi.* (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Toklu, E.** (2017). Biomass Energy Potential and Utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, 235-244.
- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB)** Elektrik Mühendisleri Odası (2020). *Türkiye’de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü.* [Erişim:28.04.2021, https://www.emo.org.tr/ekler/d6b5c1730d04923_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0]

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) (2019). *TEİAŞ Faaliyet Raporu 2019*. [Erişim: 14.04.2021, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR>]

Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) (2018). *Sektörel Görünüm: Enerji 2018*. [Erişim: 13.04.2021, <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektorel-gorunumu.pdf>]

Türkiye Sınai Kalkınma Bankası(TSKB) (2020). *Enerji Görünümü 2020*. [Erişim: 09.04.2021, <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>]

United Nations Development Programme (UNDP). *Human Development Reports*. Erişim: 15.09.2020, <http://hdr.undp.org/en>]

Vural, M. (2019). *Renewable Energy Potential And Production Of Turkey: 2023 Vision*. (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

