

T.C.
İstanbul Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
İktisat Anabilim Dalı
Teknoloji ve Sanayi İktisadı Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**NÜKLEER ENERJİNİN TÜRKİYE’DE ENERJİ
İHTİYACINI KARŞILAMADAKİ ROLÜ**

Ogan KIZILTAN
2501070740

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Gökhan KARABULUT

İstanbul, 2010



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRLÜĞÜ



TEZ ONAYI

Enstitümüz **TEKNOLOJİ VE SANAYİ İKTİSADI** Bilim Dalı'nda ders dönemindeki Eğitim - Öğretim Programını başarı ile tamamlayan **2501070740** numaralı **OGAN KIZILTAN**'ın hazırladığı **"NÜKLEER ENERJİNİN TÜRKİYE'DE ENERJİ İHTİYACINI KARŞILAMADAKİ ROLÜ"** konulu **YÜKSEK LİSANS/ DOKTORA TEZİ** ile ilgili **TEZ SAVUNMA SINAVI**, Lisansüstü Öğretim Yönetmeliği'nin 15.Maddesi uyarınca **26.11.2010 CUMA** günü saat **09:30'da** yapılmış, sorulan sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezininne* **OYBİRLİĞİ /OYÇOKLUĞUYLA** karar verilmiştir.

JÜRİ ÜYESİ	KANAATİ(*)	İMZA
DOÇ.DR.GÖKHAN KARABULUT	Kabul	
DOÇ.DR.SERDAR ONGAN	Kabul	
DOÇ.DR.DÜNDAR MURAT DEMİRÖZ	KABUL	
YRD.DOÇ.DR.ABDÜLKADİR TUNA	KABUL	
YRD.DOÇ.DR.BARIŞ ALTAYLIGİL	KABUL	

ÖZ

Çağımızda dünyanın enerjiye duyduğu ihtiyaç artan nüfusla ve teknolojik gelişmelerle her geçen gün daha da çoğalmaktadır. Ancak bu ihtiyacın karşılanmasında çeşitli sorunlar yaşanmaktadır. Ekonomiklik, enerji üretiminde aranan en önemli husus olmaya devam ederken; çevresel sürdürülebilirlik ve arz güvenliği enerji politikalarında önemli hale gelmektedir. İktisadi, sosyal ve teknolojik açıdan gelişen Türkiye; enerji ihtiyacını karşılamakta zorlanmakta ve özellikle enerji kaynaklarında çeşitliliğe ihtiyaç duymaktadır.

Enerji kaynakları içerisinde nükleer enerji, yapısında barındırdığı kendine has özellikleri ile ayrı bir öneme sahiptir. Nükleer santraller, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin enerji kaynaklarında kayda değer bir paya sahiptir ve özellikle bazı ülkelerde üretilen elektriğin büyük kısmını karşılamaktadır. Nükleer santraller teknolojik açıdan gelişmeye devam ederken, dünyanın farklı coğrafyalarına yayılarak ticari ölçekli üretim gerçekleştirmektedir.

Hazırlanan bu çalışmada nükleer santrallerin yapısal özellikleri ve var olmalarının önemi üzerinde durulmaktadır. Ayrıca Türkiye’de uzun zamandır kurulması planlanan nükleer santrallerin, yaratacağı etkiler de ele alınmaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde enerji kaynakları sınıflandırılarak; dünyada ve Türkiye’de üretim, tüketim ve rezervler yönünden incelenmiştir. Nükleer santrallere ilişkin veriler, reaktörlerin teknolojik açıdan incelenmesi ve nükleer enerji kullanımının eğilimi ayrı bir bölümde toplanmıştır. Son olarak nükleer santrallerin ekonomik yapısı, çevresel etkileri ve arz güvenliği vurgulanmış; bununla birlikte Türkiye’deki gerekliliğine de dikkat çekilmiştir.

ABSTRACT

In our times, energy need of the world increases due to population growth and technological developments day after day. However, to satisfy this need makes human beings go through various troubles. While affordability keeps being the most salient issue in energy production, environmental sustainability and security of supply have been of importance in energy policy. Turkey, which develops as economic, social and technological aspects, is confronted with difficulties in meeting energy demand, and Turkey especially needs diversity of energy sources.

Nuclear power in all energy sources has its own importance in its structure consisting of its unique characteristic features. Nuclear power plants get a significant share from developed and developing countries' energy sources and especially in some countries where it meets a majority of electricity that is produced. While nuclear power plants continue to develop rapidly as technological aspects, the commercial scale production has performed via spreading over different regions of the world.

In this study, structural features of nuclear power plants are discussed. In addition, In Turkey, the effects (which are) created by nuclear power plants which has long planned to establish are discussed. In the first part of the study, energy sources are classified and by doing this, this is examined in terms of production, consumption and reserves in the whole world and Turkey. The data on nuclear power plants, nuclear reactors which are examined as a technological and the tendency to use nuclear energy are collected in a separate section. Finally, the economic structure of nuclear power plants, environmental impacts and the security of supply are emphasized and (are) taken attention to its necessity for its being in Turkey.

ÖNSÖZ

Türkiye'nin sahip olduğu birincil enerji kaynakları, talebi karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Az miktarda yerli rezerv ve rezervlerin düşük üretim kapasiteleri nedeniyle, enerji ihtiyacının çok büyük kısmı ithalat yoluyla gerçekleşmektedir. Bu sebeple, Türkiye'de enerji ithalatına yüksek bedeller ödenmekte ve ihtiyaca paralel olarak ödemelerin miktarı da gün geçtikçe artmaktadır. Türkiye'nin enerji kaynakları içerisinde nükleer enerji bulunmamasının yanında, yenilenebilir kaynakların payı da çok düşüktür. Kaynak çeşitliliğinde yetersizliğe yol açan bu durum, enerji ithalatını zorunlu kılmakta ve ülkemizi enerjide dışa bağımlı bir hale getirmektedir. Nükleer santrallerin kurulumuyla sağlanacak elektrik enerjisi üretimi, termik santrallerde kullanılan fosil yakıtların ithalatını azaltacak; en azından artışının önüne geçilebilecektir. Nükleer santrallerin düşük ve istikrarlı üretim maliyetleri sayesinde, Türkiye'nin enerji piyasasında sağlanmak istenen rekabetçi yapı desteklenmiş olacaktır. Ayrıca Türkiye'de kurulması olası nükleer santraller; hiçbir şekilde sera gazı açığa çıkarmaması, endüstri ve konutlarda kullanılabilecek ısı sağlayabilmesi, istihdam yaratması, hidrojen üretimine olanak tanınması gibi birçok alanda dışsal faydalar gösterebilecektir.

Bu tezde çoğunlukla yabancı kaynaklardan faydalanılmıştır. Bu alanda ülkemizde yerli kaynaklar ve özellikle de güncel anlamdaki sayısal veriler yeterli değildir. Sıklıkla kullanılan istatistiki verilerin seçiminde, uluslararası kuruluşların en güncellerine itibar edilmiştir.

Tez çalışmam süresince bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Gökhan Karabulut'a ve bana her şekilde destek olan annemle babama teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLO LİSTESİ	ix
GRAFİK LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ KAYNAKLARINA GENEL BAKIŞ

1.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması	4
1.2. Genel Hatlarıyla Dünya Enerji Kaynakları	5
1.2.1. Fosil Yakıtlı Enerji Kaynakları.....	7
1.2.1.1. Petrol.....	7
1.2.1.2. Doğal Gaz.....	9
1.2.1.3. Kömür.....	10
1.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	12
1.2.2.1. Hidrolik Enerji.....	12
1.2.2.2. Rüzgar Enerjisi	13
1.2.2.3. Biyokütle Enerjisi.....	14
1.2.2.4. Güneş Enerjisi.....	16
1.2.2.5. Jeotermal Enerji.....	17
1.2.2.6. Hidrojen Enerjisi.....	17
1.3. Türkiye'nin Sahip Olduğu Enerji Kaynakları	18
1.3.1. Türkiye'de Birincil Enerji Kaynaklarının Arzı	18
1.3.2. Türkiye'de Birincil Enerji Kaynakları Tüketimi	20
1.3.3. Türkiye'nin Fosil Yakıt Rezervleri.....	21

1.3.4. Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları	22
1.3.5. Türkiye'de Elektrik Enerjisi	24

2. BÖLÜM

NÜKLEER ENERJİ

2.1. Nükleer Enerjinin Gelişimi ve Mevcut Kullanım Alanları	26
2.1.1. Dünyada Nükleer Teknolojilerin Gelişimi	26
2.1.2. Türkiye'nin Nükleer Enerji Tarihi.....	30
2.1.3. Nükleer Santrallerde Elektrik Üretimi.....	33
2.1.4. Nükleer Teknolojilerin Diğer Kullanım Alanları	35
2.2. Nükleer Reaktör Tipleri ve Teknolojileri.....	37
2.2.1. Nükleer Reaktör Nesilleri.....	37
2.2.2. Ticari Reaktör Tipleri	39
2.2.3. Uluslararası Ortak Oluşumlar Ve Yeni Nesil Reaktörler	44
2.3. Nükleer Santrallerin Mevcut Kullanımı.....	48
2.3.1. Nükleer Santrallere Sahip Ülkeler Ve Santrallerin Elektrik Üretimi	48
2.3.2. Nükleer Santral Yapılanmalarında Eğilim	50
2.4. Nükleer Hammadde ve Yakıt Çevrimi.....	52
2.4.1. Uranyum	52
2.4.2. Toryum	59

3. BÖLÜM

NÜKLEER SANTRALLERİN ÜRETİM MALİYETLERİ, ÇEVRESEL ETKİLERİ VE TÜRKİYE'NİN ENERJİ İHTİYACINDAKİ YERİ

3.1. Nükleer Santrallerde Maliyetler	62
3.1.1. Yatırım Maliyetleri	62
3.1.2. Değişken Maliyetler	65
3.1.2.1. İşletme Ve Bakım Maliyetleri	66
3.1.2.2. Yakıt Maliyetleri.....	67
3.1.3. Nükleer Enerji Santrallerinde Elektrik Üretim Maliyetleri ve Diğer Enerji Santralleri İle Karşılaştırılması	70

3.2. Nükleer Santrallerde Dışsalıklar	79
3.2.1. Santralde Hasara veya Radyoaktif Atıklara Bağlı Muhtemel Radyasyon Sızıntısı	79
3.2.2. Nükleer Silahlanma Potansiyeli.....	81
3.3. Nükleer Santrallerin Çevre Ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri	82
3.3.1. Nükleer Enerji Ve Diğer Enerji Santrallerinin Çevre Üzerindeki Potansiyel Etkileri.....	82
3.3.2. Sera Gazları Emisyonu Ve Küresel Isınma Açısından Nükleer Santraller.....	84
3.3.3. Nükleer Enerjiye Bağlı Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerinde Etkisi	87
3.4. Türkiye’de Nükleer Enerji Kurulumunun Enerjide Dışa Bağımlılık ve Arz Güvenliğine Etkisi.....	89
3.5. Nükleer Enerjide Türkiye’ye Yönelik Genel Tespitler Ve Santrallerde Dikkat Edilecek Hususlar.....	92
3.5.1. Türkiye Enerji Piyasasının Serbestleşmesi.....	92
3.5.2. Nükleer Santrallerde Maliyet Düşürme Yöntemleri.....	94
3.5.3. TAEK Kriterleri Çerçevesinde Nükleer Teknoloji Transferi	97
SONUÇ.....	99
KAYNAKÇA.....	101

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1.	: Dünya Kişi Başı Enerji Tüketimi (1990-2005)	7
Tablo 1.2.	: Dünya Petrol Rezervleri (2009)	8
Tablo 1.3.	: Dünya Petrol Üretim ve Tüketimi (1970-2008)	9
Tablo 1.4.	: Dünya Doğal Gaz Rezervleri (2009)	10
Tablo 1.5.	: Dünya Doğal Gaz Üretim ve Tüketimi 1970-2008)	10
Tablo 1.6.	: Dünya Kömür Rezervleri (2009)	11
Tablo 1.7.	: Dünya Kömür Üretim ve Tüketimi (1970-2009)	12
Tablo 1.8.	: Dünya Rüzgar Santrallerinin Toplam Kurulu Gücü (2009)	14
Tablo 1.9.	: Biyokütle Enerjisinin 2008 yılı İtibariyle Kurulu Gücü, Isıtma Kapasitesi ve Elde Edilen Biyoyakıtlar	15
Tablo 1.10.	: Dünya Güneş Enerjisi Kurulu Gücü 2008(MW)	16
Tablo 1.11.	: Enerjinin İthalat İçindeki Payı 2000-2008 (Milyon Dolar)	20
Tablo 1.12.	: Türkiye’de Fosil Yakıt Rezervleri ve Yerli Üretim (2008)	22
Tablo 1.13.	: Yıllar İtibariyle Kurulu Güç, Elektrik Üretimi ve Tüketimi	24
Tablo 2.1.	: Nükleer Reaktörlerin Kurulu Gücü ve Elektrik Üretimi (2010) ...	49
Tablo 2.2.	: İnşaatı Devam Eden ve kapatılması Planlanan Reaktörler (2010)	52
Tablo 2.3.	: Dünya Uranyum Üretimi 1998-2008 (ton)	55
Tablo 2.4.	: Dünya Uranyum Rezervleri 2007 (ton)	58
Tablo 2.5.	: Dünya Toryum Rezervleri 2007 (ton)	60
Tablo 3.1.	: Çeşitli Enerji Santrallerinde %5 ve %10 İskonto Oranı ile Üretim Maliyetlerinin Karşılaştırılması(2010)	74
Tablo 3.2.	: Nükleer Santrallerin Üretim Maliyetlerinin Kömür ve Gaz Santralleri ile Karşılaştırılması (2009)	75
Tablo 3.3.	: Nükleer Santrallerin Üretim Maliyetlerinin Diğer Enerji Santralleri ile Karşılaştırılması (2008)	77

Tablo 3.4.	:	Nükleer Santrallerinin Üretim Maliyetlerinin Kömür, Gaz ve Rüzgar santralleri ile karşılaştırılması (2004)	78
Tablo 3.5.	:	Enerji Santrallerinin Çevre Üzerinde Potansiyel Etkisi	83
Tablo 3.6.	:	Çeşitli Enerji Santrallerinin İşletme Ömrü Boyunca Sera Gazları Emisyonu (2002).....	85

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 1.1.	: Dünya Birincil Enerji Kaynakları Üretimi 2006	5
Grafik 1.2.	: Dünya Enerji Kaynakları Nihai Tüketimi, 2006	6
Grafik 1.3.	: Dünya Rüzgar Enerjisinin Kurulu Gücü 2000-2009(MW)	14
Grafik 1.4.	: Türkiye Birincil Enerji Kaynakları Arzı 2008 (%)	18
Grafik 1.5.	: Türkiye Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı(2008)	19
Grafik 1.6.	: Türkiye’de Birincil Enerji Kaynaklarının Yıllara Göre Tüketimi. 20	
Grafik 1.7.	: Birincil Enerji Kaynaklarının Sektörel Kullanımı (2006)	21
Grafik 1.8.	: Birincil Enerji Arzında Yenilenebilir Kaynakların Payı (2008)....	22
Grafik 1.9.	: Elektrik Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (2009)	25
Grafik 2.1.	: Nükleer Santrallerin Nesilleri (1950-2030).....	39
Grafik 2.2.	: Nükleer Reaktörlerin Tiplerine Göre Dağılımı	50
Grafik 2.3.	: Nükleer Santrallerin yıllar İtibariyle Kurulu Güç Gelişimi (MW).....	51
Grafik 2.4.	: Dünya Uranyum Arz ve Talebi 1957-2007 (bin ton)	57
Grafik 3.1.	: Çeşitli Ülkelerde 2010 yılı itibariyle İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$/MWsa)	66
Grafik 3.2.	: Nükleer Santrallerde Yakıt Maliyetinin Kendi İçerisinde Dağılımı.....	68
Grafik 3.3.	: Nükleer ve Doğal Gaz Santrallerinin Yakıt Fiyatlarındaki Değişime.....	69
Grafik 3.4.	: Bir Nükleer Santralde İşletme Ömrü Boyunca Gerçekleşen Nakit Akışı	70
Grafik 3.5.	: Nükleer Santrallerde Maliyetlerin Toplam Üretimdeki Pay Dağılımı (%).....	71

KISALTMALAR LİSTESİ

AB:	Avrupa Birliği
ABD:	Amerika Birleşik Devletleri
A.e. :	Aynı Eser
A.g.e. :	Adı Geçen Eser
ABWR:	Gelişkin Kaynar Su Reaktörü
Bkz. :	Bakınız
BM:	Birleşmiş Milletler
Bs. :	Baskı
BTU:	British Thermal Unit
BWR:	Kaynar Su Reaktörü
c:	Cent
c€:	Euro Cent
CH₄:	Metan
cm:	Santimetre
CO₂:	Karbondiyoksit
ÇNAEM:	Çekmece Nükleer Araştırmalar Merkezi
Ed. :	Editör
ETKB:	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EÜAŞ:	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GAP:	Güneydoğu Anadolu Projesi
GCR:	Gaz Soğutmalı Reaktör
GFR:	Gaz Soğutmalı Hızlı Reaktör
GIF:	IV. Nesil Nükleer Reaktörler Uluslararası Forumu
GNEP:	Global Nükleer Enerji Ortaklığı
GW:	Gigavat
GWsa:	Gigavat-saat
GWth:	Gigavat-termal
HFC:	Hidroflorokarbon
IAEA:	Uluslararası Atom Enerji Ajansı
ICRP:	Uluslararası Radyasyondan Korunma Kurumu
IEA:	Uluslararası Enerji Ajansı
INPRO:	Yenilikçi Nükleer Reaktörler ve Yakıt Çevrimleri Projesi
kg:	Kilogram
KW:	Kilovat
KWsa:	Kilovat-saat
LEC:	Düzleştirilmiş Elektrik Üretim Maliyeti
LFR:	Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör
LWGR:	Hafif Sulu Grafit Moderatörlü Reaktör
MIT:	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
MOX:	Nükleer Oksit Yakıt
MSR:	Eriyik Tuz Reaktörü

mSv:	Milisievert (Radyasyona Maruz kalma Ölçüsü)
MTEP:	Milyon Ton Eşdeğeri Petrol
MW:	Megavat
MWsa:	Megavat-saat
N₂O:	Nitroz Oksit
NEA:	Nükleer Enerji Ajansı
OECD:	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
PFC:	Petroflorokarbon
PHWR:	Basıncılı Ağır Su Reaktörü
PWR:	Basıncılı Su Reaktörü
SCWR:	Süper Kritik Su Soğutmalı Reaktör
SF₆:	Sülfür Hekzaflorid
SFR:	Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör
TAEK:	Türkiye Atom Enerjisi kurumu
TBMM:	Türkiye Büyük Millet Meclisi
TEİAŞ:	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEK:	Türkiye elektrik Kurumu
TETAŞ:	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
TMMOB:	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TW:	Tetravat
TWsa:	Tetravat-saat
U:	Uranyum
U₃O₈:	Uranyum Oksit
UF₆:	Uranyum Heksaflorür
WNA:	Dünya Nükleer Ajansı

GİRİŞ

İnsan hayatının devamlılığı ve ülkelerin ekonomik gelişimleri için en önemli ihtiyaç enerjidir. Gelişmekte olan ülkelerde enerjiye olan gereksinim ayrı bir öneme sahiptir. Bu ülkelerde enerjiye olan talep ile ekonomik büyüme arasında aynı yönde ilişki bulunmaktadır. Teknoloji ve enerji ise hem birbirlerini tamamlayan, hem de birbirlerine gereksinimi olan iki olgudur. Dünyanın gelişmesiyle her geçen gün teknolojik yenilikler ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan teknolojik yeniliklerin devam ettirilmesi ve bu yeniliklerden sürekli şekilde faydalanılabilmesi için enerji gerekmektedir. Günümüzde enerjinin bu denli önemli hale gelmesi, verimli kullanımını zorunlu bir hale getirmiştir. Enerjinin verimli kullanılarak sürdürülebilir şekilde tedarik edilmesi, teknoloji ve teknolojik gelişimlerle mümkün olmaktadır.

Enerjiye olan talep yüz yılı aşkın bir süredir fosil enerji yakıtlarından sağlanmaktadır. Bu kaynakların üretim ve tüketim payları günümüzde üstünlüğünü sürdürmeye devam etmektedir. Petrol, doğal gaz ve kömür dünyada en çok üretilen ve tüketilen fosil kökenli enerji kaynaklarıdır. Bunlardan kömür, sanayi devriminde en önemli yakıt olmuştur. 1960'lı yıllardan itibaren motorlu taşıtların yayılması ve ulaştırma sektörünün gelişmesiyle petrol, üretim ve tüketimde ilk sıraya geçmiştir. 1980'li yıllardan itibaren uzun mesafeli boru hatları ile doğal gazın kullanımı yaygınlaşmış, buna bağlı olarak üretimi artmıştır. Doğal gaz, petrole birlikte günümüzde en önemli enerji kaynağı olmaya devam etmektedir. Fosil yakıtlar dünyada kısıtlı rezervlere sahip kaynaklardır. Bu rezervler milyonlarca yılda oluştuğundan, yenilenebilir nitelikte değildir. Fosil yakıtların rezerv aramaları yoğun olarak devam etmekte; ancak tüketimi çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Petrol, doğal gaz ve kömürün yoğun üretim ve tüketim miktarı; ekonomi, çevre ve enerji güvenilirliği açısından temel sorunlara yol açmaktadır.

Dünya kömür, doğal gaz ve petrol rezervlerinin 2030 yılı itibariyle, sırasıyla; %25, %65 ve %85 oranında azalacağı tahmin edilmektedir.¹ Fosil yakıtlı enerji kaynaklarının tükenmekte olması, bu yakıtların üzerinde ekonomik baskılara yol

¹ Nusret Alemdaroğlu, **Enerji Sektörünün Geleceği Alternatif Enerji Kaynakları ve Türkiye'nin Önündeki Fırsatlar**, İstanbul, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, 2007, s.13.

açmaktadır. Fosil yakıt fiyatlarında sürekli dalgalanmalar gerçekleşmektedir. Bu dalgalanmalar; başta enerji çevrim sektörü olmak üzere, diğer tüm sektörlerin üretim maliyetlerinde istikrarsızlığa yol açmaktadır. Fosil yakıtların yarattığı çok önemli başka bir sorun çevre ve insan sağlığı ile ilgilidir. Fosil yakıtlar çevre ve insan sağlığı üzerinde; kullanılması, taşınması, dağıtımı ve madenciliği esnasında tahribatlara yol açmaktadır. Bu tahribatlar günümüzde küresel ölçekte ele alınmaktadır. Günümüzde enerji, stratejik bir öneme sahiptir. Dünyada fosil yakıtların önemli rezervlerini, az sayıda ülke elinde bulundurmaktadır. Enerjide aranan özelliklerden biri haline gelen kesintisiz kaynak tedariki, siyasi yönden aranan bir özelliktir. Fosil yakıtlar içinde petrol ve doğal gazın kesintisiz tedarik edilmesi söz konusu değildir. Petrol ve doğal gaz talebinin yüksek olduğu ülkelerde rezerv yetersizliğinden ötürü; talep ithalat yoluyla karşılandığında, arz güvenliğini sağlamakta sıkıntılar yaşanmaktadır.

Türkiye’de enerjiye olan talep, sanayi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte artmaktadır. Türkiye’nin birincil enerji arzının %90’lık kısmı petrol, doğal gaz ve kömürden oluşmaktadır. Dünyada fosil yakıtlara bağlı yaşanan sorunlar Türkiye’de de görülmektedir. Birincil enerji kaynakları arzının tamamına yakını fosil yakıtlar tarafından sağlanırken; petrol, doğal gaz ve kömür ithalatına yüksek ödemeler yapılmaktadır. Fosil yakıtların dalgalanan fiyatları, tüm sektörleri yakından etkilemektedir. Türkiye’de fosil yakıtların kullanımına bağlı çevresel sorunların daha da artacağı görülmektedir. Kyoto protokolüne taraf olan Türkiye, 2012 yılından sonra fosil yakıtların yarattığı karbon emisyonlarına bağlı olarak, dış ödemeler yapmak zorunda kalabilir. Fosil yakıtların kullanımı, enerji güvenilirliği açısından da Türkiye’de sorunlara yol açmaktadır. Özellikle doğal gazın ithal edildiği ülkelerin olası kesintileri, enerjide dışa bağlı olmanın sonuçlarını yansıtmaktadır.

Nükleer enerji santralleri yıllardır karşıt görüşlerden kaynaklanan tartışmalara konu olmuştur. Dünyada birçok ülkede nükleer santraller enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamaya devam etmektedir. Nükleer enerjinin devamlılığı, yakıt için hammadde olan uranyum rezervlerine bağlı olarak görülmektedir. Ancak uranyum, fosil yakıtlardan özellikleri itibarıyla ayrılmaktadır. Öncelikle dünyada birçok uranyum rezervi bulunmakta ve bu rezervlerin dağılımı coğrafi farklılıklar

göstermektedir. Tükenmekte olan kaynaklar arasında, varlığını en uzun süre devam ettirmesi beklenen kaynak uranyumdur. Ayrıca uranyum rezervlerinde arama çalışmaları, fosil yakıtlarda olduğu kadar yoğun değildir. Gelecekte uranyum arama çalışmalarının artacağı varsayımıyla ve bugünkü tüketim oranı dahilinde; 250 yıl yetebilecek uranyuma ulaşılması tahmin edilmektedir.² Bununla birlikte uranyum; yüksek miktarlarda depolanabilmekte, taşınabilmekte, uzun süreli kesintisiz enerji üretimi sağlayabilmektedir. Nükleer enerji, günümüzde diğer enerji kaynakları ile ekonomik bakımdan rekabet edebilecek güce sahiptir. Sanılanın aksine, nükleer santraller üretim zinciri boyunca çevresel tahribatlara yol açmamaktadır. Özellikleri itibarıyla nükleer enerji, Türkiye'nin enerjide yaşadığı sıkıntılara yanıt verebilecek bir potansiyele sahiptir.

Çalışmanın birinci bölümünde enerji kaynakları sınıflandırılarak, dünyada genel dengeleri açıklanacaktır. Yine birinci bölüm içerisinde ayrı olarak Türkiye'nin sahip olduğu enerji kaynaklarının; üretimi, tüketimi, rezervleri incelenecektir. İkinci bölüm, enerji kaynakları içerisinde nükleer enerjiye ayrılacaktır. Bu bölümde nükleer enerjinin; tarihi gelişimi, kullanım alanları, santral teknolojileri, dünyada mevcut kullanımı ve yakıtları açıklanarak önemli özellikleri vurgulanacaktır. Son bölümde, Türkiye'nin enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılaması olası nükleer santrallerin; ekonomik yapısı, çevresel etkileri ve enerji arz güvenliğini sağlamaya yönelik katkıları incelenecektir. Nükleer santrallerin kurulumu öncesinde, Türkiye'de dikkat edilmesi gereken hususlar yine son bölüm içerisinde açıklanacaktır.

² Fizik Mühendisleri Odası, **Nükleer Enerji Raporu**, Ankara, TMMOB, 2006, s.44.

I. BÖLÜM

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ KAYNAKLARINA GENEL BAKIŞ

Bu bölümde birincil enerji kaynakları, fosil yakıtlı ve yenilenebilir enerji kaynakları şeklinde ikiye ayrılmıştır. İncelemede bu kaynakların; rezervleri, üretimi, tüketimi ve tüketim eğilimlerine değinilecektir.

1.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

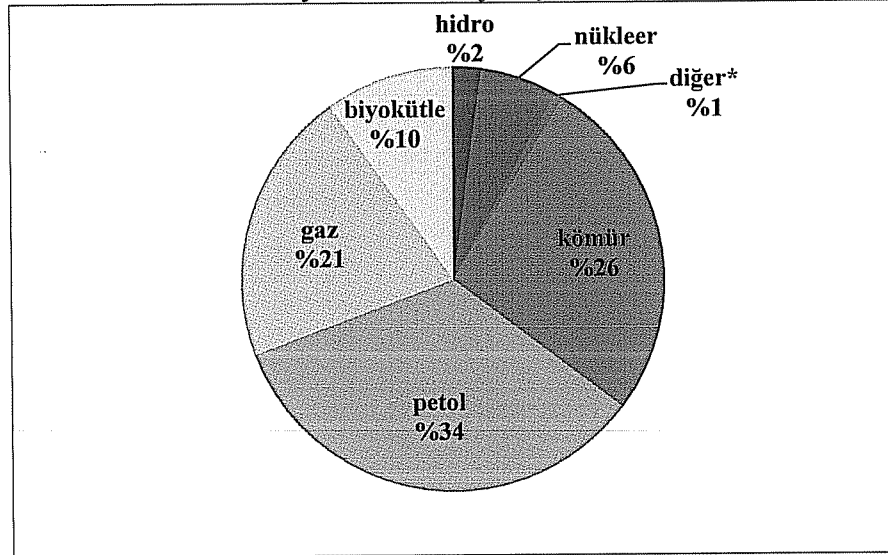
Enerji kaynaklarını sınıflandırmak birçok farklı şekilde mümkündür. Enerji kaynakları çalışılan disipline göre; enerjinin fiziksel yönlerine, dönüşüme uğrayıp uğramadığına, alternatif olup olmadığına, depolanma özelliklerine veya yenilenebilirliğine göre ayrılabilir. Bu çalışmada enerji kaynakları fosil kökenli ve yenilenebilir kaynaklar olarak ikiye ayrılmıştır. Enerjinin herhangi bir değişim ya da dönüşüm uygulanmamış biçimi birincil enerji kaynakları olarak bilinir. Başka bir deyişle, birincil enerji kaynakları niteliği değişmeden başlı başına yararlanılabilecek enerji kaynaklarıdır. Birincil enerji kaynakları; fosil kökenli yakıtlar, nükleer güç ve yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Birincil enerji kaynakları endüstri, enerji çevrimi, ulaştırma ve konutlarda oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Bu kaynakların, bir şekilde ısı, kinetik, mekanik ve elektrik enerjisi formuna dönüştürülebilmesi mümkündür. İkincil enerji kaynakları, birincil enerji kaynaklarının rafine edilerek ya da enerji istasyonlarında çevrimiyle elde edilen enerji türleri olarak tanımlanmaktadır.³ İkincil enerji kaynakları elde edilmesinde birincil enerji kaynaklarının tüketilmesi söz konusudur. Elektrik enerjisi, benzin, kok kömürü ikincil enerji kaynakları için birer örnektir.

³ Reza Toossi, **Energy and The Environment: Resources, Technologies and Impacts**, Los Angeles, Verve Publishers, 2005, s.6.

1.2. Genel Hatlarıyla Dünya Enerji Kaynakları

Üretim açısından bakıldığında dünya birincil enerji kaynakları içerisinde üretimin 2007 yılında 11940 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olduğu görülmektedir.⁴ Bu üretimin yaklaşık %80'i fosil kökenli yakıtlara dayalı gerçekleşmektedir. Petrol, yaklaşık %34'lük pay ile tüm kaynaklar içerisinde ilk sırada yer almaktadır.

Grafik 1.1. Dünya Birincil Enerji Kaynakları Üretimi 2006



* Jeotermal, Güneş, Rüzgar

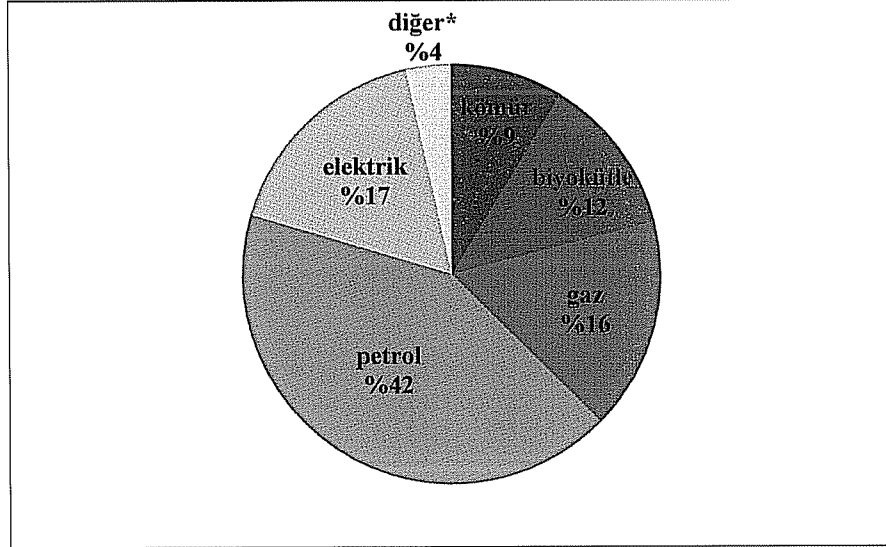
Kaynak: Key World Energy Statistics 2009

2007 yılında dünya enerji kaynaklarının toplam tüketimi 8286 Mtep'dir. 2006 yılında petrol %42 pay ile dünyada en çok tüketilen enerji kaynağıdır. Petrol tüketimini %17'lik pay ile elektrik enerjisi, %16'luk pay ile doğal gaz takip etmektedir. Elektrik enerjisi kullanımı, dünya nihai enerji tüketiminde sürekli olarak artmaktadır. 1980 yılında 6799 TWsa olan elektrik tüketimi, 2006 yılında 15665 TWsa'e ulaşırken, referans senaryolara göre bu tüketim; 2015 yılında 20757 TWsa, 2030 yılında ise 28141 TWsa olarak öngörülmektedir.⁵ Başka bir deyişle, 2006-2030 yılları arasında elektrik enerjisi kullanımının %80'e yakın bir artış gerçekleştireceği beklenmektedir.

⁴ International Energy Agency (IEA), "Key World Energy Statistics 2009" (Çevrimiçi); http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf, s.37. 25 Haziran 2010

⁵ IEA, *World Energy Outlook 2008*, Paris, Stedi Media, 2008, s. 140.

Grafik 1.2. Dünya Enerji Kaynakları Nihai Tüketimi, 2006



* Jeotermal, Güneş, Isı

Kaynak: Key World Energy Statistics 2009

Enerji kaynaklarının yıllar itibariyle toplam tüketim eğilimi sürekli artış içerisinde. Artan dünya nüfusu dolayısıyla enerji kullanımına olan gereksinim; ulaşım, tarım, sanayi ve konutlardaki enerji talebini arttıran en önemli unsurdur. Talepteki hızlı artış beraberinde enerji sorunlarına da yol açmaktadır. Bu sorunlar içerisinde en önemlileri; rezervlerin tükenmesi, enerji fiyatlarındaki artış, yoğun kullanıma bağlı çevresel tahribatlar ve son yıllarda bir enerji politikası haline gelen arz güvenliğidir. Milyonlarca yılda oluşabilen fosil yakıt rezervleri, kullanım miktarına bağlı olarak hızla azalmaktadır. 2000 yılı itibariyle fosil yakıtlı enerji kaynaklarının ömrü; mevcut rezervler ile petrol için 48, gaz için 66 ve kömür için 235 yıldan az olarak öngörülmektedir.⁶ Fosil enerji kaynaklarının, tüketimindeki payın zamanla düşüş göstererek azalması beklenmektedir.

Kişi başına düşen birincil enerji tüketiminde, bölgeler arası önemli farklılıklar mevcuttur. Nüfusun, toplam enerji tüketimine oranlanarak hesaplanan kişi başı ortalama enerji tüketimi 2005 yılı için yaklaşık 1,78 (kilogram eşdeğer petrol) olarak hesaplanmaktadır.⁷ Kişi başı enerji tüketimin; gelişmekte olan ülkelerde, gelişmiş

⁶ Ernst G. Frankel, **Oil and Security: A World Beyond Petroleum**, Dordrecht, Springer, 2007, s.28.

⁷ World Resources Institute, Earth Trends, "Energy and Resources", (Çevrimiçi); http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.php?theme=6, 17 Haziran 2010.

ülkelere göre çok daha az miktarda olduğu görülmektedir. Yıllar itibariyle dünya kişi başı ortalama enerji tüketimi artmakta, ayrıca Kuzey Amerika ve Avrupa'da kişi başına düşen tüketimin diğer bölgelere oranla oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 1.1. Dünya Kişi Başı Enerji Tüketimi (1990-2005)

BÖLGE	YILLAR	1990	2000	2005
Asya		775,8	865,2	1051,5
Orta Amerika		1243,1	1266,3	1365,9
Orta Doğu ve Kuzey Afrika		4080,4	3580,8	3773,4
Avrupa		11846	1531,5	1765,5
Kuzey Amerika		7686,3	8157,9	7942,9
Güney Amerika		970,1	1123,8	1151,2
<i>Gelişmiş Ülkeler</i>		<i>4756</i>	<i>4623</i>	<i>4720</i>
<i>Gelişmekte Olan Ülkeler</i>		<i>685</i>	<i>808</i>	<i>976</i>
DÜNYA KİŞİ BAŞI TÜKETİM		1668	1657	1778

Kaynak: World Resources Institute (Çevrimiçi); <http://earthtrends.wri.org/> 17 Haziran 2010

1.2.1. Fosil Yakıtlı Enerji Kaynakları

Fosil yakıtlar karbon içerikleri yüksek olan petrol, kömür ve doğal gazdan oluşmaktadır. Fosil yakıtlar; tarih öncesi bitki ve hayvan kalıntılarının, yer kabuğunun altındaki ısı ve basınçla milyonlarca yılda oluşan enerji kaynaklarıdır.⁸

1.2.1.1. Petrol

Ham petrolün, hayvan ve bitki fosillerinden milyonlarca yılda, yer kabuğunun altında oluştuğu kabul edilmektedir. Petrol, 1960'lardan beri yüksek enerji yoğunluğu ve taşınabilirliği sayesinde dünyadaki en önemli ticari enerji kaynağı olmuştur.⁹ Petrol kullanımı enerji çevrimi, konut, sanayi, tarım sektörlerinde oldukça yaygındır. Ancak petrol kullanımının günümüzdeki önemi özellikle ulaşım sektöründe ortaya çıkmaktadır. Petrole, ulaştırma sektöründe yakın biçimde ikame edebilecek bir enerji kaynağı bulunmamaktadır. Ham petrolün rafinerilerde artırılması ve işlenmesi sonucunda; benzin, motorin, LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) gibi petrol

⁸ Josepha Sherman, **Fossil Fuel Power**, Minnesota, Capstone Press, 2004, s.6.

⁹ Shepard Krech, John Robert McNeill, Carolyn Merchant, **Encyclopedia of World Environmental History**, 3.cilt, Routledge, 2004, s.962.

ürünleri elde edilmektedir.¹⁰ Petrol piyasası bünyesinde; ekonomik, teknolojik, siyasal etkenleri barındıran karmaşık ve dinamik bir yapıya sahiptir. Petrol piyasasında arz-talep arasında oluşan hassasiyet, yatırım politikalarındaki uluslararası ortaklık ve ülkelerin durumlarına göre değişen petrol kanunları gibi ayırt edici özelliklere sahiptir.¹¹

2009 yılı itibariyle dünya toplam petrol rezerv miktarı 1331 trilyon varil olarak görülmektedir. Görünür petrol rezervleri Orta Doğu bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Rezerv açısından en zengin ülkeler sırasıyla; Suudi Arabistan, Venezuela, İran, Irak ve Kuveyt'tir. Bu ülkelerin petrol rezervleri, dünya toplam petrol rezervlerinin yaklaşık %59'unu oluşturmaktadır.

Tablo 1.2. Dünya Petrol Rezervleri (2009)

Ülkeler	Petrol Rezervleri (Trilyon Varil)
Suudi Arabistan	264,6
Venezuela	172,3
İran	137,6
Irak	115
Kuveyt	101,5
Dünya Toplam	1331

Kaynak:BP Statistical Review of World Energy 2010, (Çevrimiçi); http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf (18 Haziran 2010)

Dünya toplam petrol üretim ve tüketiminde 1970'li yıllardan beri 10 yıllık dönemlerde sürekli bir artış eğilimi gözlemlenmektedir. Dünyada en çok petrol üreten ülkeler 2009 yılı için Rusya, Suudi Arabistan ve ABD olurken; petrol tüketiminin en fazla gerçekleştiği ülkeler sırasıyla ABD, Çin, Japonya, Hindistan ve Rusya'dır. Dünyanın en büyük petrol tüketicisi olan ABD 2008 yılında dünya tüketiminin yaklaşık %23'ünü tek başına gerçekleştirirken, özellikle Çin ve Hindistan'da son yıllarda büyük bir tüketim artışı görülmektedir. Petrol tüketimi 2000-2009 yılları arası Çin'de yaklaşık %80, Hindistan'da ise yaklaşık %40 oranında

¹⁰ İ.T.Ü. Petrol ve Doğal gaz Mühendisliği Bölümü, "Petrol, Doğal Gaz ve Jeotermal Enerji Hakkında Merak Edilenler", (Çevrimiçi); <http://www.petrol.itu.edu.tr/question/faq.html#3>, 5 Mart 2009.

¹¹ Türkiye Ekonomi Kurumu, Naci Bayraç, "Uluslar Arası Petrol Piyasasının Ekonomik Analizi" (Çevrimiçi); <http://www.tek.org.tr/dosyalar/BAYRAC-ENERGY.pdf>, s.7. , 5 Mart 2009

artmıştır. Avrupa’da ise petrol tüketimi daha istikrarlı seviyelerde seyretmekte, son yıllarda büyük bir değişim gözlenmemektedir.¹²

Tablo 1.3. Dünya Petrol Üretim ve Tüketimi (1970- 2008)

Yıllar (milyon ton)	1970	1980	1990	2000	2008
Dünya Toplam Üretim	2356,6	3089,3	3171,7	3609,0	3820,5
Dünya Toplam Tüketim	2247,0	2976,7	3150,9	3562,1	3882,1

Kaynak: Statistical Review of World Energy 2010

1.2.1.2. Doğal Gaz

Doğal gazın, petrole benzer şekilde; yer altındaki fosil artıkların değişimi ile meydana geldiği kabul edilmektedir. Doğal gaz yer kabuğunun altında petrol ile birlikte veya yalnız olarak bulunabilmektedir. Doğal gaz ilk olarak 1800’lerin sonunda ABD ve Rusya’da keşfedilerek geliştirilmiştir.¹³ Boru hatlarının inşa edilmesi ile bu yakıt türü ABD’de ticari bir mal halini almıştır.¹⁴ Doğal gazın en önemli özelliği, yüksek basınçlı boru hatları aracılığıyla uzun mesafelere iletilebilmesidir. 1973’deki petrol krizi sonrası, doğal gaz giderek önem kazanmaya başlamış ve bugünkü değerine ulaşmıştır.

2009 yılı itibariyle dünya toplam doğal gaz rezervleri, yaklaşık 187 trilyon m³tür. Tablo 1.4. görüldüğü gibi Orta Doğu ülkeleri petroldekine benzer şekilde doğal gaz rezervleri açısından da üstünlüğe sahiptir. Rusya, İran ve Katar dünya doğal gaz rezervlerinin yaklaşık %53’üne hakim durumdadır.¹⁵

¹² BP, Statistical Review of World Energy 2010, (Çevrimiçi); http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf, s.9. 18 Haziran 2010

¹³ William Shepherd, D.W. Shepherd, **Energy Studies**, London, 2. Bs, Imperial College Press, 2003 s.162.

¹⁴ Charles E. Brown, **World Energy Resources**, Hiedelberg, Springer, 2002, s.65.

¹⁵ Bp, a.g.e. s.22.

Tablo 1.4. Dünya Doğal Gaz Rezervleri (2009)

Ülkeler	Petrol Rezervleri (Trilyon Metreküp)
Rusya	44,38
İran	29,61
Katar	25,37
Türkmenistan	8,10
Suudi Arabistan	7,92
Dünya Toplam	187

Kaynak: BP Statistical Review of World Energy 2010

Doğal gaz üretim ve tüketimi yıllar itibariyle sürekli artış sergilemektedir. 2008 yılı doğal gaz üretimi 2696 Mtep, tüketimi ise 2653,1 Mtep olarak gerçekleşmiştir. Doğal gazın üretiminde yüksek paya sahip ülkeler Rusya, ABD, İran, Kanada iken; en çok tüketim sırasıyla ABD, Rusya, İran, Japonya ve Çin’de gerçekleşmiştir. Son yıllarda Azerbaycan’ın doğal gaz üretiminde hızlı artışlar dikkat çekmekte ve bu ülkenin 2008 yılı üretiminin, bir önceki yıla göre %50 oranında arttığı görülmektedir.¹⁶

Tablo 1.5. Dünya Doğal Gaz Üretim ve Tüketimi (1970-2008)

Yıllar	1970	1980	1990	2000	2008
(Mtep)					
Dünya Toplam Üretim	911,8	1298,1	1790,3	2178	2696
Dünya Toplam Tüketim	898,6	1296,8	1769,3	2175,5	2653,1

Kaynak: Statistical Review of World Energy 2010

Rusya dünya doğal gaz ticaretine yaklaşık % 28’lik payla hakim durumda olup boru hatları vasıtasıyla, çoğunlukla Avrupa ülkelerine 2009 yılında toplam 176 milyar m³, doğal gaz ihracatı gerçekleştirmiştir.¹⁷

1.2.1.3. Kömür

Kömürün, bataklık bölgelerde çürüyen bitkilerin sıcaklıkla değişim geçirmesi suretiyle; uzun yıllar içinde oluştuğu kabul edilmektedir. Kömür diğer fosil yakıtların

¹⁶ A.e.

¹⁷ A.e., s.31.

aksine, rezervleri bakımından dünyanın çeşitli coğrafyalarına dağılmış durumdadır. Taş kömürleri ve düşük kalorili kömürler en genel iki kömür türüdür. Kömür organik olgunluğuna göre linyit, alt bitümlü kömür, bitümlü kömür ve antrasit gibi çeşitlere ayrılır.¹⁸ Taş kömürü, diğer kömürlere göre daha eski oluşuma sahip, karbon miktarı yüksek ve rezervlerine daha nadir rastlanan kömür tipidir. Dolayısıyla enerji oranı daha yüksek olan taş kömürü, diğer kömür tiplerine göre daha kalitelidir. Kömür sanayi devriminde buharlı makinelerle yakıt kaynağı olmuş ve petrol kullanımı yaygınlaşmaya başlamadan önce, en değerli enerji kaynağı konumunda yer almıştır.

2009 yılı sonunda 826001 milyon ton olan dünya kömür rezervlerinin yaklaşık %60'ı ABD, Çin ve Rusya'da bulunmaktadır.

Tablo 1.6. Dünya Kömür Rezervleri (2009)

Ülkeler	Kömür Rezervleri (milyon ton)
ABD	238308
Rusya	157010
Çin	114500
Avustralya	76200
Hindistan	58600
Dünya Toplam	826001

Kaynak: BP Statistical Review of World Energy 2009

Kömür üretim ve tüketimi yıllar itibariyle artış gösterse de son yıllarda bu artış hafiflemiştir. Tablo 1.7.'de görüldüğü gibi 2009 yılı itibariyle kömür üretimi 3408,6 ton, tüketimi ise 3278,3 ton olarak gerçekleşmiştir. Kömür üretiminde önemli ülkeler Çin, ABD, Hindistan, Avustralya ve tüketim payı yüksek ülkeler sırasıyla Çin, ABD, Rusya ve Japonya'dır. Çin'de yüksek kömür tüketim miktarı oldukça dikkat çekmektedir. Bu ülke 2009 yılı itibariyle yaklaşık %46 ile dünya tüketiminin neredeyse yarısını tek başına gerçekleştirmektedir.¹⁹

¹⁸ Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, "Kömür Nedir", (Çevrimiçi); http://www.tki.gov.tr/dosyalar/komur_nedir.pdf, s.3. 7 Mart 2009.

¹⁹ Bp, a.g.e., s.34

Tablo 1.7. Dünya Kömür Üretim ve Tüketimi (1970-2009)

Yıllar (Mtep)	1970	1980	1990	2000	2009
Dünya Toplam Üretim	-	1851,6	2247,4	2246,7	3408,6
Dünya Toplam Tüketim	1527,6	1799,9	2234,0	2337,6	3278,3

Kaynak: BP Statistical Review of World Energy 2010

1.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları doğada tükenmeyen ve güneşin dünyaya ulaşan ısıma enerjisinden türemiş kaynaklardır. Bunlara hidroelektrik enerji, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi en belirgin örneklerdir. Diğer taraftan yanıcı yenilenebilir atıklar ve tahıl ürünlerinden elde edilen biyokütle yakıtlar gibi aşık olmayan örnekler de vardır.²⁰

1.2.2.1. Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji, barajlarda su türbinlerinden alınan mekanik enerjinin elektriğe çevrilmesidir. Hidroelektrik santraller yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük paya sahiptir. Hidroelektrik enerjinin kullanımı ticari ölçekte yaygın ve teknolojisi oturmuş haldedir. Elektrik üretim kapasitelerine göre hidroelektrik santralleri ölçeklendirmek mümkündür. Geleneksel yapıda büyük hidroelektrik santrallerin kullanımı uzun yıllardır gerçekleşmektedir. Küçük hidroelektrik santraller ise genellikle 1 MW kurulu güç seviyesinin altında yer almaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine, geleneksel hidroelektrik santraller çevresel sorunlara ve risklere yol açmaktadır. Bu sorunlara ekosistem değişikliği, toprak kaybı, göç, canlı çeşitliliğinin azalması gibi örnekler verilebilir. Teknolojik açıdan daha yeni ve dünyada yayılmakta olan küçük hidroelektrik santraller, çevresel sorunları ve riskleri nispeten indirgemektedir.

²⁰ Robert L. Evans, **Fueling Our Future: An Introduction To Sustainable Energy**, 2007, Cambridge University Press, s.81.

Hidroelektrik santraller 2008 yılı sonunda dünyada toplam 945 GW kurulu güce sahiptir. Çin, Kanada, Brezilya, Rusya ve ABD dünyada hidroelektrik enerji santrallerinde yüksek kurulu güce sahip ülkelerdir. Hidrolik enerji tüketiminde özellikle Çin'deki küçük hidrolik santraller dikkat çekicidir. Dünyada toplam 85 GW kurulu güce sahip küçük hidroelektrik santrallerin 65 GW kadarı Çin'de kuruludur.²¹ Dünyada kurulu tüm hidroelektrik santraller 2007 yılında toplam 3162165 GWsa elektrik üretimi gerçekleştirmiştir.²²

1.2.2.2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi farklı ısıdaki hava kütlelerinin yer değiştirmesiyle oluşan hava akımından oluşmaktadır. Rüzgar santrallerinde, rüzgar türbinleri yenilenebilir nitelikteki bu hava akımını elektrik enerjisine dönüştürmektedir.²³ Rüzgar enerjisinin kullanımı eski tarihlere dayansa da, ticari ölçekli elektrik üretim tesisleri 1990'lı yılların sonlarında yaygınlaşmaya başlamıştır. Rüzgar enerjisinden elektrik üreten santrallerin, teknolojinin gelişimi hızlanmış olup ticari ölçekli üretim aşamasına ve dünya enerji piyasasına girmiş bulunmaktadır.

2009 yılı sonunda rüzgar santrallerinin dünyada kurulu güç kapasitesi toplam 159213 MW'a ulaşmıştır. ABD, Çin, Almanya, Çin, İspanya ve Hindistan dünya rüzgar santrallerinin toplam kurulu gücünün yaklaşık %73'üne sahiptir. Rüzgar santrallerine sahip toplam 82 ülkenin 65'inde toplam kurulu güç 1000 MW'ın altındadır.²⁴ 2007 yılı itibariyle dünyada bulunan tüm rüzgar santralleri toplam 173317 GWsa elektrik üretimi gerçekleştirmiştir.²⁵

²¹ Renewable Energy Policy Network, "Renewables Global Status Report 2009 Update" (Çevrimiçi); http://www.ren21.net/pdf/RE_GSR_2009_Update.pdf, 19 Haziran 2010.

²² IEA, "Renewables and Waste in World", (Çevrimiçi); <http://www.iea.org/stats/prodresult.asp?PRODUCT=renewables>, 19 Haziran 2010.

²³ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), "Rüzgar" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/>, 13 Mart 2009.

²⁴ World Wind Energy Association, "World Wind Energy Report 2009" (Çevrimiçi); http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf, s.s. 16, 17. 19 Haziran 2010.

²⁵ IEA, a.g.e.

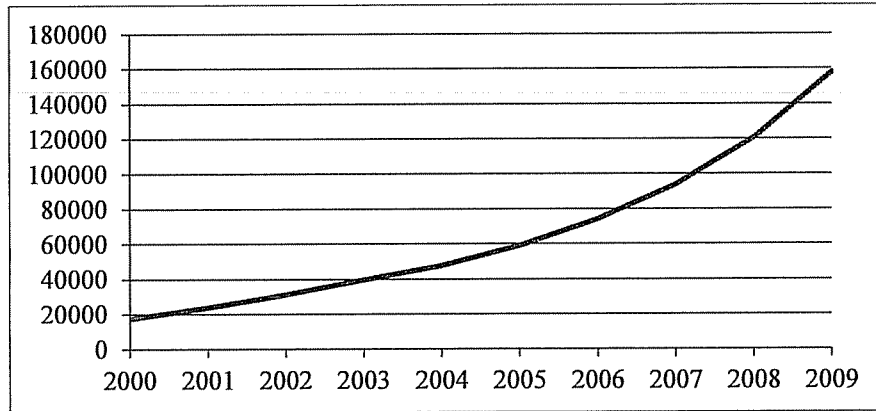
Tablo 1.8. Dünya Rüzgar Santrallerinin Toplam Kurulu Gücü (2009)

ÜLKE	TOPLAM KAPASİTE 2009 (MW)
ABD	35159
ÇİN	26010
ALMANYA	25777
İSPANYA	19149
HİNDİSTAN	10925
DÜNYA TOPLAM	159213,3

Kaynak: World Wind Energy Report 2009

Rüzgar santralleri 1996 yılından itibaren hızlı bir yayılma sürecine girmiştir. 2000 yılında 18000 MW olan kurulu güç 10 yıllık bir süreçte 2009 yılında yaklaşık 160000 MW'a ulaşmıştır.

Grafik 1.3. Dünya Rüzgar Enerjisinin Kurulu Gücü 2000-2009(MW)



Kaynak: The European Wind Energy Association, (Çevrimiçi); <http://www.ewea.org/index.php?id=1487> (20 Haziran 2010)

1.2.2.3. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, bitki ve hayvan kökenli maddelerin organik atıklarının fiziksel dönüşümleriyle elde edilmektedir. Biyokütle enerjisi kapsamında; odun, yağlı tohum bitkileri, tarım ürünleri ve atıkları, kentsel atıkları yer almaktadır. Kısa sürelerde belli miktarda biyokütle elde edilebilmesi; bu enerji türünün sürekli kullanımını mümkün kılmakta, dolayısıyla biyokütle enerjisini yenilenebilir bir enerji

kaynağı haline getirmektedir.²⁶ Biyokütle enerjisinin kullanımı odun ve kömür kullanımından daha eski olup özellikle endüstri devriminden önce birincil enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir.²⁷ Biyokütle enerjisinden elde edilen en temel biyoyakıtlar; biyogaz, biyodizel ve biyoetanoldür.²⁸ Biyoyakıtlar, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazla sektörde kullanım olanağına sahiptir. Ulaştırma, konutların ısıtılması, elektrik üretimi en yaygın kullanım alanlarıdır.

Biyokütle enerjisinin dünyada kullanımı, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde farklı sektörlerde kullanım imkanının verdiği çeşitlilikle de yüksek paylara erişmiştir. Biyokütle enerjisi; elektrik üretiminde 2008 sonunda 52000 MW kurulu güç, ulaştırma sektöründe kullanılabilecek toplam 79 milyar litre yakıt ve ısıtma amaçlı 250 GWth düzeylerine ulaşmıştır.²⁹ Biyokütle enerjisinden 2008 yılında elde edilen; biyodizel ve biyoetanol yakıtların yaklaşık %80'i Brezilya ve ABD tarafından üretilmiş; toplam kurulu gücün ise %30'u ABD, Almanya ve Çin'de bulunmaktadır.³⁰

Tablo 1.9. Biyokütle Enerjisinin 2008 yılı İtibariyle Kurulu Gücü, Isıtma Kapasitesi ve Elde Edilen Biyoyakıtlar

Biyokütle Enerjisi	Dünya Toplam
Elektrik Üretimi Kurulu Güç	52 MW
Biyoyakıtlar (biyoetanol, biyodizel)	79 milyar litre
Isınma kapasitesi	250 GWth

Kaynak: Renewables Global Status Report 2009 Update

²⁶ Zachary A. Smith, Katrina, D. Taylor, **Renewable and Alternative Energy Resources. A Reference Handbook**, ABC-CLIO, California, 2008 s.16.

²⁷ A.e., s.17.

²⁸ ETKB, "Biyoyakıt" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=biyoyakit&bn=235&hn=&nm=384&id=40698>, 7 Mart 2009.

²⁹ Renewable Energy Policy Network, a.g.e.

³⁰ A.e.

1.2.2.4. Güneş Enerjisi

Günümüzde güneş enerjisi kullanımı temel olarak iki ayrı grupta ele alınmaktadır. Bunlardan ilki, ısı güneş teknolojileri ve odaklanmış güneş enerjisi yöntemiyle konut ve sanayi sektöründe ısıнын doğrudan kullanılması ya da elektrik enerjisine çevrilmesidir.³¹ İkinci yöntem ise fotovoltaik* piller vasıtasıyla doğrudan elektrik enerjisi elde etmektir.³²

Şebekeye bağlı güneş enerji sistemleri dünyada 2004 yılından itibaren kurulmaktadır. Elektrik üretimi amaçlı kurulan fotovoltaik piller dünya genelinde yeterince yaygınlaşmamış konumdadır. Güneş enerjisi, dünya enerji ihtiyacını karşılamada büyük bir potansiyel olarak görülse de; kullanım oranı yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde oldukça düşük bir paya sahiptir. Bu teknolojilerin verimli kullanılmasında; bölgenin yıllık güneşlenme süreleri ve konumu, güneş enerji sistemlerinin tercihinde belirleyici olacaktır. Güneş enerjisinden elektrik üretiminin yaygınlaşması için deneme aşamasında olan teknolojilerin olgunluk kazanması ve seri üretimlerle malzeme maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. 2008 yılı itibariyle şebekeye bağlı fotovoltaik pillerin kurulu gücü yaklaşık 13000 MW'tır. Kurulu gücün yaklaşık %85'i Almanya, İspanya, Japonya ve ABD'de yer almaktadır. Güneş enerjisi kullanımından 2007 yılı içerisinde dünyada sadece 4104 GWsa elektrik üretimi gerçekleştirilebilmiştir.³³

Tablo 1.10. Dünya Güneş Enerjisi Kurulu Gücü (2008)

ÜLKE	TOPLAM KAPASİTE (MW)
ALMANYA	5400
İSPANYA	3300
JAPONYA	1970
ABD	730
DÜNYA TOPLAM	13000

Kaynak: World Wind Energy Report 2009

³¹ ETKB, "Güneş" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=gunes&bn=233&hn=&nm=384&id=40695>, 15 Mart 2009.

³² A.e.

* Fotovoltaik, güneşten elektrik enerjisi elde etme yöntemi ve bu konuda yapılan çalışmaların genel ismidir.

³³ IEA, a.g.e.

1.2.2.5. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji; yerkabuğunun altında birikmiş ısı sayesinde oluşan sıcak su, buhar ve gazlardan elde edilmektedir. Doğrudan ısı şeklinde veya elektrik enerjisine dönüşümüyle jeotermal enerjiden faydalanmak mümkündür. Jeotermal elektrik üretim santralleri 2008 yılı itibarıyla toplam 10000 MW kurulu güce sahiptir.³⁴ Dünyada jeotermal elektrik üretiminde önde gelen ülkeler ABD, Filipinler, Meksika ve İtalya'dır.³⁵

1.2.2.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen enerjisi, gelecekteki enerji kaynakları içerisinde pay sahibi olacak yüksek potansiyelde bir enerji kaynağı olarak görülmekte; yenilenebilir ve depolanma özelliklerine sahiptir. Başta ulaştırma olmak üzere sanayi, konut ve enerji çevrim sektörlerinde kullanılabilecek bir enerji kaynağıdır.³⁶ Hidrojen enerjisi, üretim teknikleri gelişme sürecinde olup günümüzde ticari ölçek kazanmamıştır. Dünya genelinde hidrojen enerjisi için, özellikle daha düşük maliyetle üretim ve depolanma konusunda yoğun araştırma-geliştirme çalışmaları sürmektedir.

³⁴ Renewable Energy Policy Network, **a.g.e.** s.25.

³⁵ **A.e.**, s.24.

³⁶ Kemal İder, "Hidrojen Enerji Sistemi" (Çevrimiçi);
http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi134/d134_101105.pdf, s.1.
21 Haziran 2010.

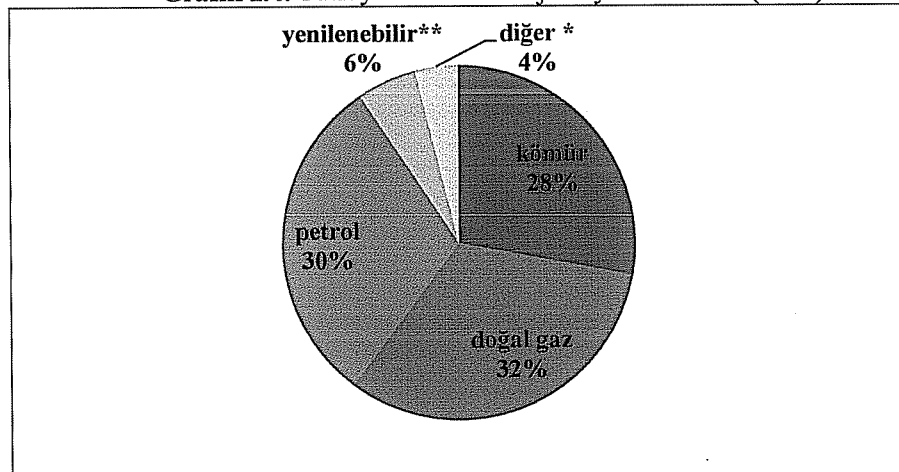
1.3. TÜRKİYE’NİN SAHİP OLDUĞU ENERJİ KAYNAKLARI

Bu bölümde Türkiye’nin birincil enerji kaynaklarının genel dengesi incelenerek; yıllar itibariyle eğilimi, yerli üretimi, ithalat değerleri ve rezervleri açısından ele alınacaktır.

1.3.1. Türkiye’de Birincil Enerji Kaynaklarının Arzı

Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının arzı; petrol, doğal gaz, taş kömürü, linyit, odun, hidrolik, jeotermal, katı ve sıvı biyoyakıtlar, güneş ve rüzgar tarafından sağlanmaktadır. 2008 yılı itibariyle Türkiye’nin birincil enerji arzı 106,338 Mtep seviyesine yükselmiştir.³⁷ Grafik 1.4.’te görüldüğü gibi, Türkiye’nin birincil enerji arzı kaynaklarına göre dağıldığında; petrol, doğal gaz, taş kömürü ve linyitten oluşan fosil kökenli yakıtların payı %90’a ulaşmaktadır. Birincil arzda yenilenebilir kaynakların payı %6 ile sınırlı kalmaktadır. Biyokütle enerjisi ve hidrolik enerji dışında; Türkiye’nin jeotermal, rüzgar ve güneş enerjisi üçlüsünden oluşan modern yenilenebilir enerji kaynaklarının; birincil enerji kaynakları içerisinde payı ise %2’den daha azdır.

Grafik 1.4. Türkiye Birincil Enerji Kaynakları Arzı (2008)



* Odun, Asfaltit, Briket

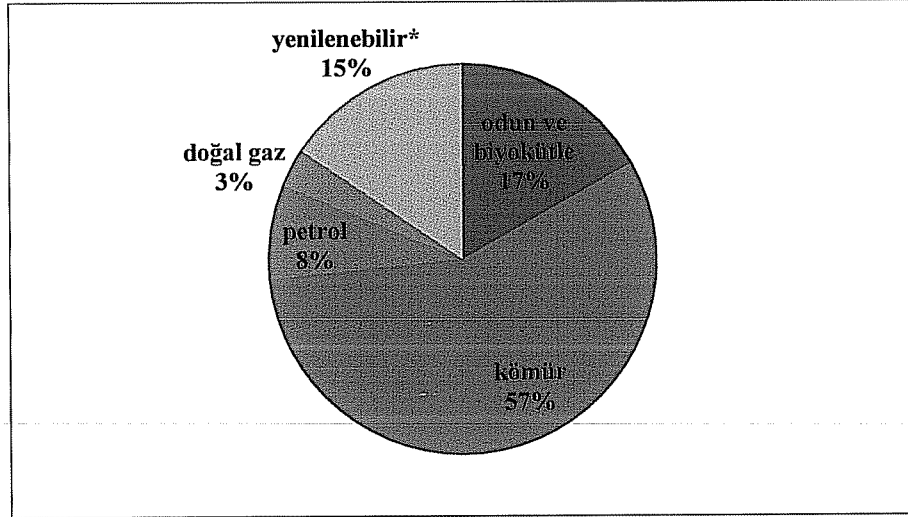
**Biyokütle, Hidrolik, Rüzgar, Jeotermal, Güneş

Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

³⁷ ETKB, İstatistik, “2008 Yılı Genel Enerji Dengesi” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=y_istatistik&bn=244&hn=244&id=398 22 Haziran 2010.

Türkiye’de birincil enerji arzının çok kısıtlı miktarı yerli üretimle karşılanabilmektedir. 2008 yılında 106,338 Mtep olan birincil enerji arzının 29257 Mtep’lik kısmı yerli üretimle karşılanabilmiştir.³⁸ Türkiye’nin gerçekleştirdiği birincil enerji üretimi, kaynaklarına göre dağıldığında yaklaşık %57’lik pay ile kömür ilk sırada yer almaktadır.

Grafik 1.5. Türkiye Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı(2008)



* Hidrolik, rüzgar, jeotermal, güneş

Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Türkiye enerji talebinin karşılanmasında fosil yakıtlı enerji kaynaklarına olan ihtiyaç oldukça fazladır. Bu ihtiyacın karşılanması, rezervler ve yerli üretim yetersizliğinden ithalat yoluyla gerçekleşmektedir. Bu sebepten, toplam ithalatın içerisinde yer alan enerji kaynaklarına yapılan ödemelerin miktarı ve ithalat içerisindeki payı artmaktadır. Buna göre Türkiye ham petrol, petrol türevleri, doğal gaz, kömür ve elektrikten oluşan enerji ithalatına; 2000 yılında 9,5 milyar ABD doları öderken, 2006 yılında bu miktar 28,9 milyar dolar, 2008 yılında ise 48,3 milyar dolara kadar ulaşmıştır. [Bkz. Tablo 1.11.]

³⁸ A.e.

Tablo 1.11. Enerjinin İthalat İçindeki Payı 2000-2008 (Milyon Dolar)

BÖLGE	YILLAR	2000	2006	2007	2008
Ham petrol		5642	10706	11784	15639
Doğal gaz		3078	8514	9999	15470
Petrol gazları*		-	1664	1857	2350
Petrol ürünleri**		-	5729	7300	10995
Kömür		676	2070	2682	3429
Elektrik		132	18	22	15
Diğer		-	117	239	384
Enerji İthalatı		9529	28859	33883	48281
Toplam İthalat		54503	139576	170063	201964
Enerji İthalatının Payı (%)		17,5	20,7	19,9	23,9

*LPG, Bütan, Propan **Benzin, Motorin, Fuel oil

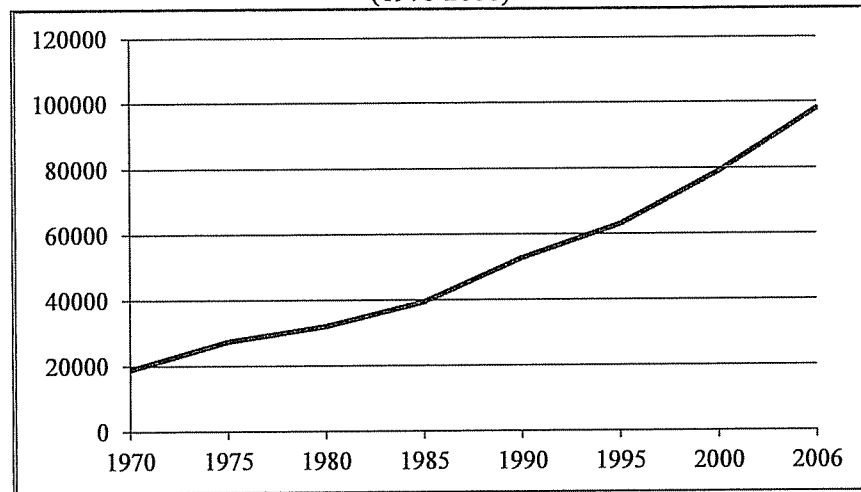
Kaynak: Dış Ticaret Müsteşarlığı, "İstatistik" (Çevrimiçi);

<http://www.dtm.gov.tr/dtmweb/index.cfm?action=detayrk&dil=TR&yayinid=1115&icerikid=1224&from=home> 23 Haziran 2010

1.3.2. Türkiye’de Birincil Enerji Kaynakları Tüketimi

Birincil enerji kaynaklarının tüketimi, dünyada olduğu gibi Türkiye’de de yıllar itibariyle artış içerisindedir. 2008 yılı itibariyle Türkiye birincil enerji kaynakları tüketimi 106,3 Mtep olarak gerçekleşmiştir.³⁹ 1980 yılından itibaren birincil enerji kaynaklarına olan talep her 5 yılda bir öncekine göre en az %20 oranında artış göstermiştir.

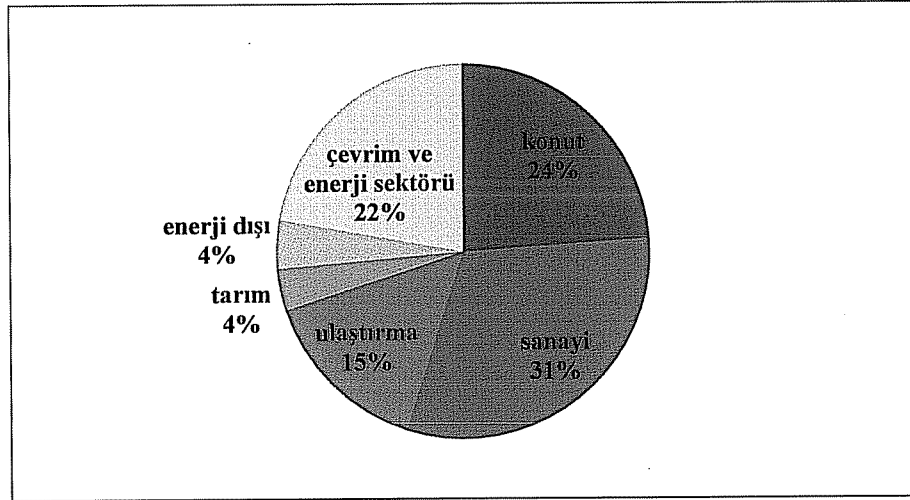
Grafik 1.6. Türkiye’de Birincil Enerji Kaynaklarının Yıllara Göre Tüketimi Mtep (1970-2006)



Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Birincil enerji kaynaklarının sektörel tüketimine bakıldığında ise 2006 yılı itibariyle ilk sırada %31'lik pay ile sanayi sektörü yer almaktadır. Sanayi sektörünü %24 pay ile konut, %22 pay ile enerji çevrim sektörü takip etmektedir.

Grafik 1.7. Birincil Enerji Kaynaklarının Sektörel Kullanımı (2006)



Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

1.3.3. Türkiye'nin Fosil Yakıt Rezervleri

2009 yılı itibariyle Türkiye'nin kalan üretilebilir petrol rezervleri 44,37 milyon ton, kalan üretilebilir doğal gaz rezervleri ise 6,22 milyar m³ olarak belirlenmiştir.⁴⁰ Türkiye'nin kömür rezervleri; 3,9 milyar tonu işletilebilir düzeyde olan toplam 12,4 milyar ton linyit ve 519 milyon ton taşkömüründen oluşmaktadır.⁴¹ Türkiye sahip olduğu fosil yakıt rezervleri ile kendi talebini karşılayamamaktadır. 2008 yılı itibariyle Türkiye'de fosil yakıt ihtiyacının; petrol için %7, doğal gaz için %2,75 ve taş kömürü için %11,5'i yerli üretimle karşılanabilmiştir. Linyit açısından

⁴⁰ Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, "İstatistik" (Çevrimiçi); <http://www.pigm.gov.tr/istatistikler.php>, 23 Haziran 2010.

⁴¹ ETKB, "Kömür" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=kömur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692>, 23 Haziran 2010

Türkiye, dünya rezervlerinin %1,6'sına sahip olup linyit rezervleri ve üretimi açısından dünya ölçeğinde orta düzeyde değerlendirilmektedir.⁴²

Tablo 1.12. Türkiye’de Fosil Yakıt Rezervleri ve Yerli Üretim (2008)

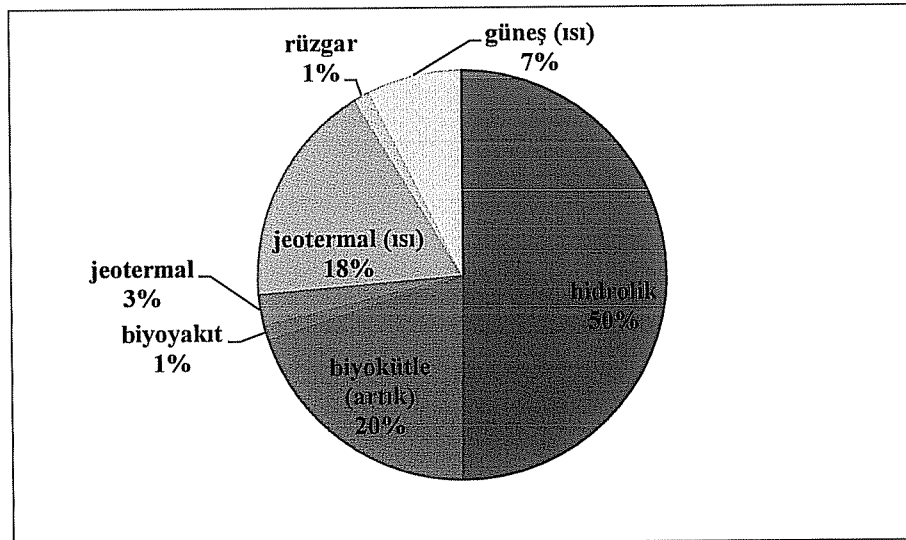
Enerji Kaynağı	Taş Kömürü (milyon ton)	Linyit (milyon ton)	Petrol (milyon ton)	Doğal gaz (Mtep)
Rezervler	519	3900	44,3	(6,3 milyar m ³)
Yerli üretim	2,60	76,17	2,16	1017
Birincil Enerji Arzı	22,72	75,26	30,76	36928

Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

1.3.4. Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Türkiye’de, hidrolik, biyokütle, jeotermal, rüzgar ve güneş birincil enerji kaynakları içerisinde yenilenebilir kaynakları oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları 2008 yılı itibariyle toplam 5,71 Mtep ile Türkiye’nin birincil enerji arzında yaklaşık %6’lık paya sahiptir. Bu kaynaklar içerisinde hidrolik enerji %50’lik payla ilk sırada yer almaktadır. Hidrolik enerjiyi, %20’lik pay ile hayvan, bitki artıklarından oluşan biyokütle, %18 ile ısıtma amaçlı kullanılan jeotermal enerji takip etmektedir.

Grafik 1.8. Birincil Enerji Arzında Yenilenebilir Kaynakların Payı (2008)



Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

Türkiye'de teknik olarak değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyeli 140 GWsa, 2009 yılında işletmede bulunan hidroelektrik santrallerinin sayısı 150 ve santrallerin toplam kurulu gücü 14417 MW'tır.⁴³

Rüzgar enerjisi 2008 yılı içerisinde yenilenebilir enerji kaynakları içinde yalnızca %1'lik paya sahiptir. Ancak son yıllarda Türkiye'de rüzgar santrallerin kurulumu, dünyadaki eğilimi izleyerek bu alanda önemli ilerlemeler kaydetmektedir. 2005 yılında 50 MW olan rüzgar santrallerinin kurulu gücü, 2009 yılında 796 MW'a yükselmiştir.⁴⁴

Isı-kaplıca uygulamaları ve elektrik üretiminde kullanılan jeotermal enerjinin yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki toplam payı %21'dir. Bu alanda dünyada ilk 5 ülke içinde yer alan Türkiye için jeotermal enerji potansiyeli 31500 MW olarak belirlenmiş, bunun 600 MW'ı elektrik üretimi için uygun görülmüştür.⁴⁵ 2009 yılı sonunda Türkiye'nin jeotermal enerjide kurulu gücü 77,2 MW'a yükselmiştir.⁴⁶

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisinin %7'lik payının tamamı ısı uygulamalarında kullanılmaktadır. Türkiye güneş enerjisinde yüksek potansiyele sahip bir ülke olup ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat, ortalama toplam ışıyım şiddeti 1311 KWsa/m² olarak belirlenmiştir.⁴⁷ Güneş enerjisinden elektrik üretimi teknolojilerinin Türkiye'de kurulu gücü 1 MW'ın altında olup araştırma ve modelleme aşamasında yer almaktadır.

Biyokütle enerjisi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının %20'sini oluşturmaktadır. Bu payın büyük kısmı; odun ya da tarım, orman ve organik şehir

⁴³ ETKB, "Hidrolik" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692>, 24 Haziran 2010.

⁴⁴ World Wind Energy Association, "World Wind Energy Report 2009" (Çevrimiçi); http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf, 24 Haziran 2010.

⁴⁵ ETKB, "Jeotermal" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692>, 24 Haziran 2010.

⁴⁶ A.e.

⁴⁷ ETKB, "Güneş" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692>, 24 Haziran 2010.

atıklarının yakılması ile elde edilmektedir. Türkiye’de biyokütle enerjisi kullanımı dünyadaki modern uygulamalardan uzak kalmaktadır. 2008 yılında dünyada 67 milyar litre biyoetanol, 12 milyar litre biyodizel üretilirken, Türkiye’de yenilenebilir kaynaklar içerisinde %1’lik paya sahip biyodizel ve biyoetanol üretimi 74 bin litredir.⁴⁸ Türkiye’nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen üretilebilecek biyogaz miktarının ise 1,5-2 Mtep olduğu tahmin edilmektedir.⁴⁹

1.3.5. Türkiye’de Elektrik Enerjisi

Türkiye’de elektrik enerjisinin kurulu gücü fosil yakıtlı termik santraller, hidroelektrik santraller, jeotermal santraller ve rüzgar santralleri tarafından oluşmaktadır. Özellikle 1984, 1987 ve 2002 yıllarında olmak üzere kurulu güç sürekli olarak artmıştır.

Tablo 1.13. Yıllar İtibariyle Kurulu Güç, Elektrik Üretimi ve Tüketimi (1975-2008)

Kurulu güç (MW)		Elektrik Üretim (GWsa)					Elektrik Tüketimi (GWsa)
Yıllar	Kapasite	Termik	Hidrolik	Jeotermal+ Rüzgar	Toplam Üretim	Artış (%)	Net Tüketim*
1975	4186,6	9719,2	5903,6	-	15622,8	-	13491,7
1980	5118,7	11927,2	11348,2	-	23275,4	48,9	20398,2
1985	9121,6	22168,0	12044,9	6,0	34218,9	47,0	29708,6
1990	16317,6	34314,9	23148,0	80,1	58543,0	71,0	46820,0
1995	20954,3	50620,5	35540,9	86,0	86247,4	47,3	67393,9
2000	27264,1	93934,2	30878,5	108,9	124921,6	44,8	98295,7
2005	38843,5	122242,3	39560,5	153,4	161956,2	29,6	130262,9
2008	41817,2	164139,3	33269,8	1008,9	198418,0	22,5	161947,6

*Net Tüketim=Brüt Tüketim-şebeke Kaybı

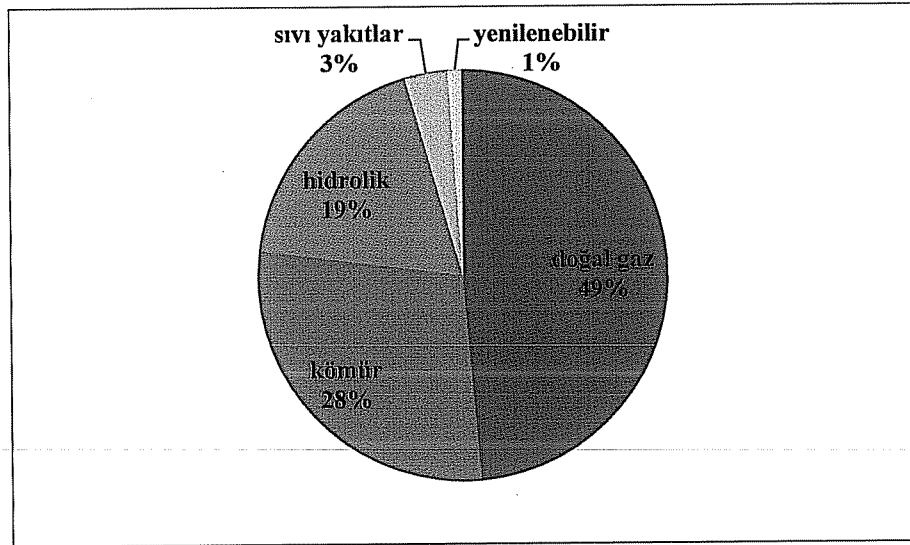
Kaynak: TEİAŞ, (Türkiye Elektrik Üretim-İletim verilerinden düzenlenmiştir.)

⁴⁸ Renewable Energy Policy Network, a.g.e.

⁴⁹ ETKB ‘‘Biyoyakıt’’ (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=korum&bn=511&hn=&nm=384&id=40692>, 24 Haziran 2010.

Grafik 1.9.'da elektrik üretiminin 2009 yılı için enerji kaynaklarına dağılımında fosil yakıtların büyük paya sahip olduğu ve %49'luk pay ile doğal gazın ilk sırada olduğu görülmektedir. Doğalgazı ardından, linyit, taş kömürü ve ithal kömür toplam %28'lik pay ile ikinci sırada gelmektedir. Hidroelektrik santraller hariç yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %1'le sınırlı olup elektrik enerjisi üretimine oldukça düşük katkı sağlamaktadır.

Grafik 1.9. Elektrik Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (2009)



Kaynak: TEİAŞ, (Türkiye Elektrik Üretim-İletim istatistikleri 2008)

Türkiye’de elektrik enerjisinin kişi başı net tüketimi yıllar itibariyle artış göstermektedir. 2008 yılı itibariyle kişi başı elektrik tüketimi 2210 KWsa olarak belirlenmiştir.⁵⁰ Türkiye’de kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi; 2752 KWsa olan dünya tüketimi ve 8477 KWsa olan OECD ülkelerinin kişi başı tüketiminden oldukça aşağı seviyelerdedir.⁵¹

⁵⁰ IEA, “Key World Energy Statistics 2009” (Çevrimiçi); http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf, s.57., 25 Haziran 2010

⁵¹ A.e, s.49.

II. BÖLÜM

NÜKLEER ENERJİ

Bu bölümde enerji kaynakları içerisinde nükleer enerjinin; tarihsel süreci, reaktör tipleri, dünyada kullanımına ilişkin veriler ve nükleer yakıtlar incelenecektir.

2.1. NÜKLEER ENERJİNİN GELİŞİMİ VE MEVCUT KULLANIM ALANLARI

2.1.1. Dünyada Nükleer Teknolojilerin Gelişimi

Nükleer teknolojilerin gelişiminin altında bilimsel buluşlar yatmaktadır. 1885-1945 yılları arasında atom ve yapısıyla ilgili önemli ilerlemeler kaydedilmiş, bilim çevresi atomun çekirdeği üzerine önemli çalışmalar yapmışlardır. İngiliz fizikçi James Chadwick'in 1932 yılında nötronun yapısını keşfetmesi ve kütlesini ölçmesi, beraberinde yeni nükleer araştırmaları getirmiştir.¹ 1939 yılında bir grup Alman fizikçi, uranyum atomunun parçalanmasını sağladıklarını ilan ederek; bu süreci fizyon olarak adlandırmıştır.² Bu gelişmenin üzerine, bir çekirdekte bölünen nötronların, başka çekirdekleri de bölebileceği fikrinden yola çıkılarak fizyon çalışmaları çalışmaların odak noktası olmuştur. Bilim adamları tarafından ortaya nükleer fizyon serileri çıkarılmaya başlanmıştır. Fizyon serisi, 1942 yılında ilk kez İtalyan asıllı fizikçi Enrico Fermi tarafından kontrol altına alınmış ve bu durum; zincirleme tepkime olarak adlandırılmıştır. Zincirleme tepkimenin denetim altında tutulmasındaki temel ilkeler, günümüzün ticari reaktörlerinde halen geçerlidir.³

Nükleer bilimlerde bu gelişmeler yaşanmaktayken, II. Dünya Savaşı da devam etmektedir. 1939-1945 yılları arası nükleer teknolojilerde gerçekleşen ilerlemelerin büyük çoğunluğu, savaşın etkisiyle, nükleer silah yapımına odaklı olmuştur. Alman tarafının nükleer bilimlerde kaydetmiş olduğu ilerlemeler ve atom bombası yapımına ilişkin yaratmış olduğu endişe, ABD'yi harekete geçirmiş ve atom bombası çalışmalarına yöneltmiştir. ABD, II. Dünya Savaşı'na katılmasından hemen

¹ Per F. Dahl, *Heavy Water and the Wartime Race For Nuclear Energy*, London, CRC Press, 1999, s.12.

² Neil Morris, *Nuclear Power*. Ed: Mary-Jane Wilkins, China, Smart Apple Media, 2007, s.8.

³ A.e., s.9.

sonra, 1942 yılında “Manhattan Project” isimli projede atom bombası çalışmalarını başlatmıştır.⁴ Bu projede, Nazi Almanyası’ndan kaçan fizikçiler de yer alarak; projenin gerçekleşmesine katkı sağlamışlardır. 1942 yılındaki bu projeye karşılık, Alman fizikçilerden O. Hahn ve F. Strassman uranyum atomunu parçalamayı başarmışlardır.⁵ Atom bombası yapımındaki yarış, Almanya’nın savaştan çekilmesinin etkisiyle ABD lehine sonuçlanmıştır. Nitekim ilk atom bombası denemesinin 1945 yılında Nevada Çölü’nde gerçekleşmesi ile “Manhattan Project” başarıya ulaşmıştır.⁶ 1949-1964 yılları arasında Sovyetler Birliği, İngiltere, Fransa ve Çin nükleer silah denemelerini gerçekleştirmiştir. Manhattan Projesi’nden hemen sonra; dünya nükleer güçle, trajik bir şekilde Japonya’da tanışmıştır. Ağustos 1945 yılında Hiroşima ve Nagasaki’de patlatılan iki atom bombasından kısa süre sonra, II. Dünya Savaşı sona ermiş ve nükleer enerji diğer alanlarda da ilerleme sürecine girmiştir.

Savaşın sona ermesinin ardından ilerlemeler askeri alanda gerçekleşmiş, özellikle nükleer denizaltı ve gemiler üzerinde yoğunlaşmıştır. ABD, dünyada ilk nükleer denizaltı olan USS Nautilus’u denize indirerek, nükleer teknolojilerin askeri alanda ilerlemeye devam ettiğini göstermektedir.⁷ Nautilus’a ait nükleer reaktör ve üretim sistemi, enerji üretimi için kurulacak olan yaygın ticari reaktörlere bir prototip olmuştur.⁸ Askeri alandaki gelişmeleri Sovyetler Birliği, İngiltere, Çin ve Fransa’daki gelişmeler izlemiş, nükleer savaş gemileri ve denizaltılar inşa edilmiştir.

1950’li yıllar nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanılmaya başlandığı zamanlardır. 1953 yılında Birleşmiş Milletler Genel Konseyi’nde “Barış İçin Atom” programı açıklanmıştır.⁹ Programda, nükleer enerji barışçıl amaçlarla kullanılması ve nükleer silahlanmanın durdurulması amaçlanmıştır. Bundan sonraki süreçte, elektrik üretimi sağlayacak ticari reaktör tasarımları üzerinde çalışmalar başlamıştır. 1956

⁴ A.e.

⁵ A.e., s.10.

⁶ Lawrence F. Drbal, **Power Plant Engineering**, Ed: Patricia G. Boston, Kayla L. Westra Springer, 1995, s.733.

⁷ Joseph A. Angelo, **Nuclear Technology**, Greenwood Press, 2004, s.369.

⁸ A.e., s.370.

⁹ OECD NEA, **Nuclear Power plant Management in Changing Business World**, Paris, OECD Publishing, 2000, s.101.

yılında İngiltere, elektrik üretimi gerçekleştiren tam donanımlı ilk ticari reaktörünü devreye sokmayı başarmıştır.¹⁰ 50 MW kurulu güçte Magnox tipi bu reaktörün kurulumunu, aynı yıl Sovyetler Birliği'nde ticari kullanıma sunulan 5 MW gücündeki Obinsk isimli prototip reaktörü izlemiştir. ABD ilk nükleer elektrik üretimini 1957 yılında, başta nükleer denizaltı ve gemiler için tasarlanan PWR tipi reaktörler vasıtasıyla gerçekleştirmiştir. Fransa ise, 70 MW gücünde ilk reaktörünü 1964 yılında konuşlandırmıştır.¹¹ 1956-1957 yıllarında konuşlandırılan bütün reaktörler, nükleer enerji santrallerinin dünya genelinde yayılmasına ve nükleer teknolojilerin hızla gelişimine vesile olmuştur.

Nükleer enerjinin dünyada kullanılmaya başlandığı ve santrallerdeki kurulu gücün yüksek artışlar gösterdiği dönem, 1973 petrol krizinin sonrasına denk gelir. Petrol fiyatlarının yüksek artışı, ithal petrole bağımlı olan ülkelerde nükleer enerji kullanımını öne çıkarmıştır.¹² 1975 yılında 72709 MW kurulu güce sahip nükleer reaktörler, 1980 yılında 135285 MW kurulu güce ulaşmıştır.¹³ Beş yıllık bu süreç içerisinde 111 ünite yeni nükleer reaktörün yapımına başlanmıştır.¹⁴

Nükleer enerjinin yakalamış olduğu bu eğilimin diğer bir önemli tarafı ise, dönemin güçlü devletlerinin siyasi ve politik güç olarak gördüğü nükleer santrallerini sergileme arzusudur. 1975-1985 yılları arası Sovyetler Birliği'nde 19, ABD'de ise 65 yeni nükleer reaktör hizmete girmiştir.¹⁵ 1985 yılından günümüze kadar nükleer santrallerin kurulu gücü, hızını keserek yükselmeye devam etmiştir. 1986'da Çernobil'de meydana nükleer santral kazası, santrallere olan yatırımları azaltmış; hatta bazı ülkelerde inşaatlar durdurularak projeler askıya alınmıştır. Kazanın ardından dünyada nükleer enerjiye karşı büyük tepkiler oluşmuştur. Buna karşılık Çernobil'deki kaza, nükleer santrallerde gerçekleşen ilk kaza değildir. Bu kaza, nükleer kazalar içinde en büyük ve ciddi sonuçları olan kaza olmasına rağmen;

¹⁰ Ferdinand E. Banks, **Energy Economics: A Modern Introduction**, Springer, 2000, s.201.

¹¹ A.e.

¹² Tübitak, "4. Nesil Nükleer Santraller", Ed: Vural Altın, **Bilim ve Teknik**, Aralık 2007. s.18.

¹³ IAEA, **Nuclear Power Reactors in The World: Reference Data Series No:2**, Vienna, IAEA Publications, 2009, s.21.

¹⁴ A.e.

¹⁵ A.e., s.12.

kronolojik olarak sonlardadır. 1986 yılında Çernobil'deki kazadan önce 13 nükleer kaza rapor edilirken, sonrasında yalnızca 2 nükleer kaza meydana gelmiştir.¹⁶

Çernobil'deki kazanın dünyada nükleer santral yatırımlarını durduracak kadar önemli oluşunun sebebi; büyük alana yayılan radyasyon ve 30 km'lik bir yarıçap içerisindeki, yaklaşık 135 bin kişinin kısa sürede bölgeden tahliye edilmesidir. Kaza, günümüzde de kullanımına devam edilen, RBMK tipinde bir reaktörde meydana gelmiştir. Kazada reaktör koru eriyerek reaktör kazanında buhar patlaması meydana gelmiştir. Parçalanan reaktör kazanı santral binasının tepesini delerek, tüm santralde yangın çıkmasına sebep olmuştur. Kazanın yaşandığı tarihlerde RBMK tipi reaktörlerde koruma binası bulunmamaktadır. Radyoaktif maddelerin, çıkan yangın sonrası, çevreye yaklaşık 10 gün süreyle yayılmasındaki en önemli etken; koruma binasının olmayışıdır. Ancak kazanın ana nedeni; talimat almadıkları halde santralde deney yapan operatörlerin hatasıdır. Deney sırasında reaktörün güvenlik sistemleri devre dışı bırakılmış ve temel nükleer güvenlik kurallarına uyulmamıştır.¹⁷

Nükleer reaktör kazaları bugüne dek, ABD ve Kanada başta olmak üzere; Arjantin, Hindistan ve Fransa'da meydana gelmiştir. ABD'de 1979 yılındaki Three Mile Island kazası, türbin bakımı sırasında yapılan hata nedeniyle gerçekleşmiştir. Çernobil'dekine benzer şekilde reaktör koru erimesi sonucu radyoaktif malzeme serbest kalmıştır. Serbest kalan radyoaktif malzemeler reaktörün korunak binası sayesinde içeride tutulsa da, az miktarı çevreye salınmıştır. Three Mile Island kazası, Çernobil kazasından sonra en büyük reaktör kazası olarak kabul edilir. Yine ABD'de 1975 Alabama, 1979 Oyster Creek ve 1980 Crystal River ticari reaktör kazaları gerçekleşmiş; ancak radyasyon salınımı olmamıştır. Hatta reaktörler kısa süre sonra tekrar devreye girmiştir. Kanada'nın yaşadığı 1952 ve 1958 tarihli nükleer kazalarda çevrede radyoaktif bir sızıntı ya da can kaybı rapor edilmemiştir. Önemli sayılabilecek bir diğer kaza ise Fransa'da 1980 yılında gerçekleşen Saint-Lurent Kazası'dır. Reaktör korunun erimesinin ardından, korunak binası sayesinde çevreye radyasyon sızmamış, can kaybı rapor edilmemiştir.¹⁸

¹⁶ Fizik Mühendisleri Odası, **Nükleer Enerji Raporu 2006**, Ankara, TMMOB, 2006, s.24.

¹⁷ A.e., s.25.

¹⁸ A.e., ss. 142, 143, 145.

Bugüne kadar, nükleer kazaların gerçekleşmesindeki en temel nokta; insan kaynaklı hatalara dayanmaktadır. Santrallerde gerekli donanımlar ve güvenlik tedbirleri olmaması, olası operatör hatalarıyla birleştiğinde nükleer kazalar gerçekleşebilmektedir. Nükleer kazalar içerisinde en tehlikeli olanı, reaktör korunum erimesidir; çünkü bu durumun kontrolü çok güçtür ve yüksek çevresel tahribat yaratabilir.¹⁹ 1950’li yıllardan itibaren artarak konuşlandırılan nükleer santrallere, güvenlik alanında iyileştirmeler ve yeni donanımlar eklenmiştir. Kurulan ilk ticari reaktörden itibaren nükleer santrallerin toplam işletmesi, 13000 tecrübe yılının üzerindedir.²⁰ Dünyada yaşanan nükleer kaza deneyimlerinden; işletilmekte olan santrallerde kazaya neden olan açıklar giderilebilmekte ve pasif güvenlik sistemleri sayesinde; insan hatalarından oluşabilecek kaza olasılıkları düşürülebilmektedir.

2.1.2. Türkiye’nin Nükleer Enerji Tarihi

Türkiye’de nükleer santral kurulumuna ilişkin çabalar yıllardır devam etmektedir. Türkiye’nin nükleer alandaki ilk faaliyeti; 1955 yılında "Barış İçin Atom" programına dahil oluşudur. Anlaşmaya taraf olan diğer ülkeler gibi Türkiye de; nükleer çalışmalarında silahlanma yoluna gitmeyeceğini, nükleer yapılandırmalarını barışçıl amaçlarla uygulayacağını taahhüt etmiştir. Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi’nde (ÇNAEM) nükleer reaktör kurulması için çalışmalara başlanmıştır. 1956’da "Atom Enerjisi Komisyonu Yasası" TBMM’de kabul edilmiş ve nükleer faaliyetleri yönetecek resmi ilk kurum oluşturulmuştur. Atom enerjisi komisyonu günümüzde halen, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) olarak nükleer faaliyetlerden sorumlu kuruluştur. Türkiye kısa zamanda gerçekleşen teşkilatlanmalar sonucunda, 1957’de "Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı" (IAEA) üyeliğini gerçekleştirmiştir. ÇNAEM’in kurulmasıyla, nükleer santral kurma çabaları 1962 yılında 1 MW gücünde bir araştırma reaktörü getirilerek devam etmiştir. Bu dönemde Türkiye’de ticari reaktörleri konuşlandırmak ve üretimi gerçekleştirmek için nükleer bilimlerde uzman mühendis ve teknisyenler yetiştirilmiştir. ÇNAEM’e benzer şekilde Türkiye’nin ikinci araştırma merkezi olarak “Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi” (ANAEM) 1966 yılında kurularak hizmete girmiştir.

¹⁹ Chris C. Park, *Chernobly the Long Shadow*, London, Routledge, 1989, s.14.

²⁰ IAEA, *a.g.e.*, s.15.

Ticari elektrik üretimi amaçlı nükleer santrallerle için ilk etütler ise, 1967-1970 yılları arasında gerçekleşmiştir.²¹

II. beş yıllık kalkınma planında Türkiye'nin ilk nükleer santralinin kurulması ve 1977'de devreye girmesi öngörülmüştür. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin (EİE) yabancı müşavirlik gruplarına hazırlattığı raporda kurulması planlanan santral; 300-400 MW gücünde tek üniteli, doğal-uranyum yakıtlı, ağır suludur. CANDU tipinde olan bu reaktör için uygun teklifler alınmasına rağmen yer seçimindeki kararsızlık, politik sıkıntılar ve ekonomik zorluklar nedeniyle çalışmalar sonuçlanamamıştır. Ardından 1971 yılında "Türkiye Elektrik Kurumu" (TEK) açılarak elektrik işleri tek elde toplanmıştır. TEK'e bağlı Nükleer Santraller Dairesi'nin faaliyete geçmesi ise 1972 yılında gerçekleşmiştir.²²

Nükleer Santraller Dairesi ilk olarak, nükleer santral kuruluşuyla ilgili çalışmaları yürütecek uzman kadrosunu kurmuş ve nükleer santral için yer seçimi çalışmalarına yönelmiştir. Buna göre en uygun yerler; Mersin-Akkuyu, Sinop-İnceburun ve Kırklareli-İğneada sahaları olarak belirlenmiştir. Akkuyu sahası için alınan yer lisansı IAEA tarafından da onaylanmıştır. 1977 yılında Türkiye ikinci defa nükleer santral girişiminde bulunarak, 600 MW gücünde nükleer santral ihalesi için İsviçre ve Fransız firmalarından oluşan konsorsiyumdan teklif istemiştir. Teklif edilen BWR tipi reaktörler uygun görülerek TEK ve firmalar arasında sözleşme görüşmelerine başlanmıştır. Ancak kredi teminatları ve inşaat finansmanlarından kaynaklanan sorunlar nedeniyle görüşmeler sonuçlandırılmamış ve nükleer santral girişimi yine başarısız olmuştur.²³

1983 yılındaki bir diğer nükleer santral girişiminde, toplam yedi firmadan alınan nükleer santral kurma teklifi üzerine Türkiye; Alman KWU, Amerikan GE ve Kanada AECL firmalarına niyet mektupları vermiştir. Bunlardan, Alman KWU ve

²¹ TAEK (Çevrimiçi); <http://www.taek.gov.tr/birimler/bagli-kuruluslar/99-cnaem.pdf> 2 Mart 2010.

²² Enerji 2023 Derneği, Ulvi Adaloğlu, "Türkiye'de Nükleer Enerjinin Tarihçesi" (Çevrimiçi); http://www.enerji2023.org/index.php?option=com_content&view=article&id=230:tuerkiye-de-nuekleer-enerjinn-tarihces&catid=6:nuekleer&Itemid=156 2 Mart 2010.

²³ Nükleer Enerji Dünyası, "Türkiye'de Nükleer Enerjinin Tarihçesi" (Çevrimiçi); <http://www.nukleer.web.tr/> 3 Mart 2010.

Kanada AECL firmalarıyla anlaşmaya varılsa da, Türkiye nükleer santrali yap-işlet-devret modeli ile kurdurmak isteyince KWU görüşmeden çekilmiş, AECL ise teklifi kabul ederek 1985 yılında ön protokol imzalamıştır. Ancak bu defa Kanada hükümeti ön protokolda yer alan, finansmanın %60'lık kısmının Kanada tarafından garanti edileceği hususunu kabul etmemiştir. Böylece Türkiye'nin üçüncü nükleer santral girişimi de başarılı olamamıştır. Sonuçsuz çalışmaların ardından TEK'e bağlı olan Nükleer Santraller Dairesi kapatılmıştır.²⁴

1986 yılında gerçekleşen Çernobil kazasının, nükleer santraller üzerindeki olumsuz etkileriyle, Türkiye'de de santrallerle ilgili çalışmalar askıya alınmıştır. Girişimlerden çıkan başarısız sonuçlar, GAP projesinin gelişmesi ve Çernobil kazasının etkileri gibi unsurlardan ötürü, nükleer enerji konusu Türkiye'nin gündeminden çıkmıştır.²⁵

1990'lı yılların başında nükleer santral seçeneği tekrar Türkiye'nin gündemine gelmiştir. Hazırlanan enerji raporlarında nükleer santraller tek alternatif olarak görülmüştür. Nükleer santral çalışmalarına TEAŞ bünyesinde devam edilerek; yeni ihale öncesi fizibilite, ihale şartnameleri gibi çalışmaları gerçekleştirmek için G.Kore'nin KAERİ ve Türkiye'nin GAMB firmaları ile 1995'de sözleşme imzalanmıştır. Akkuyu'da kurulması planlanan santral, bir yıl sonra uluslararası ihaleye çıkarılmıştır.²⁶ Böylece Türkiye nükleer santral yapımı için dördüncü defa girişimde bulunmuştur. Fransız-Alman NPI, Amerikan-Japon Westinghouse ve Kanada-Japon CANDU konsorsiyumlarından 1997 yılında ihale teklifleri alınmıştır. İhale sonucunun defalarca ertelenmiş, sonunda bakanlar kurulu kararı ile de iptal edilmiştir. TAEK 2004 yılında yaptığı açıklamada, 2012'de devreye girecek toplam kurulu gücü 5000 MW olan üç nükleer reaktörün kurulacağını duyurmuştur. TETAŞ 2008 yılında Akkuyu'da nükleer santral için satın alma ihalesine çıkmıştır. İhalede sadece Atomstroyexport-Inter Rao-Park teknik grubu VVER 1200 tipi reaktörle teklif vermiştir. Teklif edilen tasarımın nükleer santrallerin kurulması ve

²⁴ A.e.

²⁵ A.e.

²⁶ Enerji 2023 Derneği, "Türkiye Açısından Nükleer Enerjinin Yeri", (Çevrimiçi); http://www.enerji2023.org/index.php?option=com_content&view=article&id=152:tuerkiye-acisindan-nuekleer-enerjnn-yer&catid=6:nuekleer&Itemid=221 3 Mart 2010.

işletilmesine yönelik ana kıstasları karşıladığı TAEK tarafından açıklanmıştır. Sonradan tek teklif sahibi ihale grubunun elektrik satış fiyatının yüksek olduğu tartışmalara yol açarak ihale sürecinde belirsizliğe neden olmuştur. 2009 yılında Danıştay, nükleer santrallerin kurulmasına yönelik yasanın “yer tahsisi” ve “birim satış fiyatı” konularını kapsayan iki maddenin yürütmesini durdurmuştur.²⁷

Nükleer enerji santralleri, Türkiye’nin enerji üretim seçenekleri içinde yaklaşık 50 senedir yer almaktadır. 1955 yılından beri sürdürülen bilimsel, teknik ve politik alanlardaki faaliyetlere rağmen, nükleer santrallerin kurulması amacına halen ulaşamamıştır. Oysa o tarihlerde dünyada ABD, Sovyetler Birliği, İngiltere ve Fransa ile birlikte Türkiye de; enerjide nükleer santral seçeneğini değerlendirmek isteyen ülkeler arasında olmuştur. Günümüzde elektrik üretimi için nükleer santrallerden faydalanan ülke sayısı otuzun üzerine çıkmıştır. Bu ülkeler arasında G. Kore’nin nükleer programı önemli örnekler arasındadır. İlk olarak 1970’li yıllarda Westinghouse şirketine nükleer santral ısmarlayan G.Kore, nükleer tesisler için yerli katkı yapamayacak konumda yer almıştır. G.Kore teknoloji transfer ederek üç nükleer santral elde ettikten sonra; inşaat işleri, makine ve teçhizat yapımı gibi kollardan yerli katkı yaratmaya başlamıştır. İlk santralin kurulmasından on yıl sonra ise, kendi nükleer santral dizaynını geliştirmeye başlamıştır. Her türlü nükleer teknoloji ve altyapıdan yoksunken, zamanla bu alanda gelişen G.Kore sonunda nükleer santral teknolojilerini ihraç eden ülkeler arasına katılmıştır.²⁸

2.1.3. Nükleer Santrallerde Elektrik Üretimi

Nükleer santraller, bir veya daha fazla nükleer reaktör kullanarak nükleer yakıtlar aracılığıyla elektrik üreten tesislerdir. Nükleer enerji fizyon ve füzyon olmak üzere iki şekilde elde edilebilmektedir. Nükleer santrallerdeki üretim sistemleri, konvansiyonel enerji santrallerine benzer şekilde işlemektedir. Nükleer reaktörlerin temel çalışma prensibinde, radyoaktif maddeler kullanılarak reaktör kalbinde elde edilen ısı enerjisi suya aktarılır. Isının suya aktarılmasıyla buhar elde edilirken, bu buhar elektrik jeneratörüne bağlı olan türbine verilmektedir. Su buharının türbin

²⁷ Nükleer Enerji Dünyası, “Türkiye’de Nükleer Enerjinin Tarihçesi” (Çevrimiçi); <http://www.nukleer.web.tr/> 3 Mart 2010.

²⁸ Metin Münir, “Nükleerde Kore Örneği” *Milliyet*, 19 Şubat Cuma 2010, s.13.

kanatları üzerinde yarattığı mekanik dönme hareketi sonucunda, alternatörlerde elektrik enerjisi üretilebilmektedir.²⁹

Nükleer reaktörlerde ısının kaynağı nükleer fizyon sürecidir. Fizyon, bir nötronun uranyum çekirdeğine çarparak yutulması sonucu; bu atomun çekirdeğinin kararsız hale gelerek daha küçük iki veya daha fazla farklı çekirdeğe bölünmesine tepkimesidir.³⁰ Fizyon sonucunda ortaya çıkan nötronların, ortamda bulunan diğer fizyona uygun atomların çekirdekleri tarafından yutularak, onları da aynı reaksiyona sokması ve bunun ardışık olarak tekrarlanması zincirleme reaksiyondur. Bu süreç ise nükleer fizyondur. Zincirleme reaksiyonlar, nükleer santraller sayesinde kontrol altına alınabilmektedir. Günümüzde elektrik üreten nükleer reaktörlerin tamamı fizyona dayalı çalışmaktadır.³¹

Teorik bakımdan nükleer enerji elde etmenin diğer bir yöntemi füzyondur. Füzyon, farklı iki elementin çekirdeğinin birleşerek daha ağır bir atom çekirdeği oluşturması olarak tanımlanmaktadır. Bu nükleer kaynaşma sonucunda büyük miktarda enerji açığa çıkar.³² Fizyon tepkimeleri kontrol altında tutulabilmekte dolayısıyla nükleer santrallerde elektrik üretimi için kullanılabilir. Füzyonun kontrolü günümüzde tam olarak mümkün değildir.³³ Füzyon tepkimeleri deneysel aşamada olup sadece gelecekte mümkün kılınabilecek bir nükleer enerji kaynağı olarak görülmektedir. Füzyon tepkimelerinin sağladığı önemli avantajlar; yüksek seviyede nükleer atıkları barındırmaması, nükleer silah malzemesi üretimine uygun olmayışları ve sudan elde edilen döteryumu yakıt olarak kullanabilmesidir.³⁴ Günümüzde geline teknolojik noktada füzyon reaktörlerinden ticari elektrik üretiminin, 2030-2040 yıllarından önce gerçekleşmesi beklenmemektedir.

²⁹ William Shepherd, **Energy Studies**, 2nd edition, London, Imperial College Press, 2003, s.226.

³⁰ Neil Morris, **a.g.e.**, s.14.

³¹ **A.e.**

³² Volker Quaschnig, **Understanding Renewable Energy Systems**, UK, Earthscan, 2005, s.19.

³³ Charles E.Brown, **World Energy Resources**, Berlin, Springer, 2002, s.103.

³⁴ Princeton Plasma Physics Laboratory, (Çevrimiçi); http://www.pppl.gov/fusion_basics/pages/fusion_advantages.html 10 Mart 2010.

2.1.4. Nükleer Teknolojilerin Diğer Kullanım Alanları

Nükleer reaktörlerde üretilen elektrik, nükleer teknolojilerin sağladığı bir imkandır. Nükleer teknolojiler enerji üretimi haricinde de gelişimlerini sürdürmekte ve çeşitli olanaklar sunmaktadır. Endüstri, tıp ve tarımda kullanılan nükleer tekniklerin çok sayıda uygulama alanı vardır. Ayrıca enerji üretimine dayalı nükleer reaktörlerin bazılarında, gelişen teknolojinin etkisiyle çok yüksek sıcaklıklarda çalışma durumu ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak nükleer enerjinin; hidrojen üretimi, tuzdan arındırma, yerel ısıtma ve endüstriyel süreç ısısı gibi başlıca yeni ve çok önemli kullanım alanları ortaya çıkmıştır.

Nükleer teknolojilerin, enerji üretimi dışında en yaygın alanlarından biri araştırma reaktörlerinde yapılan çalışmalardır. 56 ülkede işletilmekte olan 250 kadar araştırma reaktörü bulunmaktadır.³⁵ Bu reaktörlerin öncelikli amaçları inceleme amacıyla nötron üretimidir. Araştırma reaktörlerinin ticari reaktörlere göre kurulu güçleri oldukça azdır ve yüksek sıcaklıklara ulaşamazlar. Sırasıyla Rusya’da 62, ABD’de 54 ve Japonya’da 18 araştırma reaktörü bulunurken, bu ülkeler sayı bakımından en çok araştırma reaktörüne sahip ülkelerdir.³⁶ Türkiye’de ise üç adet araştırma reaktörü bulunmakta, bunlardan ikisi ÇNAEM’de ve biri ise İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yer almaktadır.³⁷

Tarım, gıda ve tıbbi alanlarda kullanılan nükleer teknikler günlük hayatta önemli hizmetlerde yer almaktadır. Özellikle tıp, nükleer teknolojinin oldukça geliştiği alanların başındadır. Hastalıkların teşhis ve tedavilerinde yoğun olarak nükleer tıp kullanılmaktadır. Kanser tedavisinde ışınlama yapan cihazlar, nükleer teknoloji ürünü malzemeler ile çalışmaktadır.³⁸ Gıdaların korunabilmesi ve daha uzun süreli muhafaza edilebilmesinde, tarım ürünlerinin telef olmasının önüne geçilmesinde ilgili nükleer tekniklerden yararlanılabilmek mümkündür. Özellikle

³⁵ World Nuclear Association (WNA), “ Research Reactors”, (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf61.html>, 13 Mart 2010.

³⁶ A.e.

³⁷ IAEA “Reactor Lists” (Çevrimiçi); <http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/>, 13 Mart 2010.

³⁸ WNA, “Radioisotopes In Medicine”, (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf55.html>, 13 Mart 2010.

gelişmekte olan ülkelerin tarım ürünlerinin %20-25 kadarının³⁹ zararlı haşereler tarafından telef olduğu düşünüldüğünde, bu tür tekniklerin verimliliği arttırmakta büyük önem sahibi olacağı düşünülebilir. Nükleer santrallerde üretilen enerjinin bir kısmı ile elektrik üretilip bir kısmını ısı formunda kullanmak mümkündür. 300-700 MW güçte reaktörler orta ölçekli ve 700 MW'tan daha yüksek güce sahip reaktörler büyük ölçekli reaktörler olarak nitelendirilir. Bu kapasitedeki reaktörler 850 dereceden itibaren yüksek sıcaklıkta çalışabilme olanağı sunarlar. Böylesine yüksek süreç ısısı üretebilecek nükleer santral tasarımları, hidrojen üretimi için uygun teknolojiler arasındadır. Nükleer enerji hidrojeni elektroliz yolu ile üretebilmektedir; ancak daha önemlisi, yüksek ısıyla çalışan yeni reaktör dizaynlarının termokimyasal yöntemle de üretim yapabilecek olmasıdır.⁴⁰

Bir nükleer santralin sağladığı ısı enerjisiyle deniz suyunun tuzdan arındırılmasına yönelik uygulama ve tasarımlar mevcuttur. Küçük ve orta ölçekli reaktörlerin ulaştığı sıcaklıklar tuzdan arındırma teknikleri için yeterlidir. Deniz suyunun tuzdan arındırılmasında kullanılan çoğu tesis fosil yakıtlarla çalışmaktadır. Nükleer enerji, tuzdan arındırma için kullanılabilir ve kullanımın daha da artması için yüksek potansiyele sahiptir. Fosil yakıtla çalışan tuzdan arındırma tesislerinde bu tip yakıtlara bağlı olarak küresel kirlilik ve yüksek yakıt tüketimi, nükleer enerji seçeneğini önemli hale getirmektedir. Nükleer santrallerde tuzdan arındırma teknikleri, enerji üretiminin yanında bir birleşik üretimdir.* Bu alternatif kullanım alanının teknolojisi dünyada oturmuş durumdadır ve çoğu nükleer tesise entegre edilebilmektedir. Böylelikle yaşanan su kıtlığına bölgesel bir çözüm de sunulabilmektedir.⁴¹

Nükleer enerjinin sunduğu bir başka kullanım alanı da bulunduğu yere yakın alanların ısıtılabilmesidir. Reaktör ısısından oluşan sıcak su veya buhar genellikle konut bölgesi olmak üzere, ilgili alana yerin altından geçen borular ile taşınabilir. Bu

³⁹ WNA, "Non Power uses Of nuclear Technology", (Çevrimiçi); WNA, http://www.world-nuclear.org/how/nonpower_uses_of_nuclear_energy.html, 13 Mart 2010.

⁴⁰ National Research Council, **The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs**, Washington, National Academies Press, 2004, s.96.

* Birleşik üretim, elektrik üretiminde oluşan atıl sıcaklığın ısıtmada, soğutmada ve atık su arıtımında kullanılabilmesidir.

⁴¹ OECD, NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, Paris, OECD Publishing, 2008, s.385.

borular sağlam güvenlik yalıtımına sahip ve taşıdığı buhar ya da suyu geri getirebilecek özelliklere sahip olmalıdır.⁴² Tuzdan arındırma tekniğinde olduğu gibi elektrik üretimiyle birlikte elde edilen bölgesel ısıtma imkanı, yine bir birleşik üretilmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında dünyada çeşitli yerlerde rastlanabilir ve daha çok kışların uzun ve soğuk geçtiği bölgelerde tercih edilir. Rusya, Danimarka, İsveç, Finlandiya ve Çin bölgesel ısıtma ağlarına sahip başlıca ülkelerdir. Bölgesel ısıtmanın tercih edilebilirliğindeki temel faktörler; yerleşim vaziyeti, yoğunluğu ve ısı dağıtımıdır. Bölgesel ısıtmada sıcak su veya buhar, yerin altından özel borularla transfer edildiğinden; oluşacak ısı kaybı nedeniyle genellikle 10-15 km arası yakınlıklar tercih edilir.⁴³ Nükleer reaktörlerin sağladığı bu alternatif kullanım alanından yararlanmak için, uygulama bölgesinde gerekli ısı dağıtım altyapısı şarttır.

2.2. NÜKLEER REAKTÖR TIPLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

Bu bölümde nükleer reaktörler sınıflandırılarak, birbirine olan üstünlükleriyle ele alınacaktır. Dünyada nükleer santrallerin teknolojik gelişimini ne şekilde sürdürdüğü yine bu bölümde incelenecektir.

2.2.1. Nükleer Reaktör Nesilleri

Ticari reaktörleri nesillerine göre sınıflandırmak ilk olarak ABD Enerji Ajansı tarafından kullanılmıştır. Bu sınıflandırma sıklıkla, reaktör serilerini tarihlendirmek ve gelecekte beklenen yeni tasarımları bir grup içinde toplamak için ortaya konulmuştur. 1950-1960 yılları arası ortaya çıkan I. nesil nükleer reaktörler birer prototip olmuşlardır. Ardından gelen II. nesil reaktörlere kıyasla daha fazla yakıt ve atık üreten reaktörlerdir. I. nesil reaktörler kurulduğu tarihlerde çoğunlukla araştırma reaktörleri olarak çalışmışlardır. Bu reaktörlerin kurulu gücü 200MW'ın altındadır.⁴⁴ I. nesil reaktörlerin tamamına yakını, günümüzde devre dışı bırakılmıştır.

II. nesil reaktörler, sıklıkla 1960-1990 yılları arasında kurulmuştur. Reaktörlerin zaman içerisinde uğradığı teknolojik gelişimi takip etmek, nesillere

⁴² A.e., s.386.

⁴³ IAEA, *Advanced Applications of Water Cooled Nuclear Power Plants*, Austria, IAEA, 2008 s.46.

⁴⁴ David Bodansky, *Nuclear Energy: Principles, practices and prospects*, Springer, 2004, s. 444.

ayrıldığında mümkündür. Nükleer reaktör nesilleri I, II, III ve IV. nesiller olmak üzere dört safhadan oluşmaktadır. Günümüzdeki ticari nükleer santrallerin büyük çoğunluğu II. nesil reaktörler kullanmaktadır. Bu reaktörler, dünyada oldukça yaygın ve elektrik üretiminde ticari ölçekli üretime yıllardır sahip konumdadırlar. Nükleer enerji kullanan ülkelerde PWR, BWR, CANDU tiplerinde bilinen reaktör tipleri II. nesil reaktörlerdir. Bu reaktörler 1000MW kurulu güce kadar ulaşabilmektedir.⁴⁵ İngiltere’de 1950’li yıllarda ortaya çıkan MAGNOX tipi gaz soğutmalı reaktörler I. ve II. nesil reaktörler arasındaki geçiş döneminde yer almışlardır. Kurulma zamanı 1950’li yıllar olduğundan, bu reaktörler; I.nesil olarak görülmektedir. Ancak aynı MAGNOX reaktörler, araştırma reaktörleri olmak yerine ticari üretim gerçekleştirmiş ve dünyada yayılarak kabul görmüştür. Bundan ötürü MAGNOX reaktörleri, II. nesil reaktörler arasında da kabul edilebilmektedir. 1990’lardan itibaren kurulan nükleer reaktörler III. nesil olarak kabul görmektedir. III. nesil reaktörler; II. nesle göre güvenlik, ekonomik performans ve teknolojik açıdan daha üstün reaktörlerdir. III. nesil reaktörlerdeki başlıca yenilikler; yakıt teknolojisi, pasif güvenlik sistemleri, santral inşaatı maliyetlerindeki düşüşler ve verimlilik artışı şeklinde özetlenebilir.⁴⁶ En önemlisi ise, işletme ömürlerinin daha fazla olmasıdır. III. nesil reaktörlerin ömrü 50-60 yıl olarak öngörülmektedir.⁴⁷ III. nesil reaktörlerin ilk örneği, 1996 yılında Japonya’da ortaya çıkan ABWR tipi reaktördür.⁴⁸ III. nesil reaktörleri geliştirme yönünde çalışmalar, günümüzde de yoğun olarak devam etmektedir. Reaktörlerin II. ve III. nesilleri arasında belirgin özellik farklılıkları yoktur ve reaktörlerin tarihsel gelişimlerine açıklık kazandırmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Ancak IV. nesil reaktörler dizaynları ve yenilikçi özellikleriyle diğer nesillerden oldukça farklıdır.

Nükleer reaktörlerin gelişiminde en önemli unsurlar olan güvenlik ve ekonomik performansın dışında IV. nesil reaktörlerde; sürdürülebilirlik, güvenilirlik, fiziksel koruma ve nükleer silahlanmayı önlemeye yönelik uluslararası hedefler

⁴⁵ A.e.

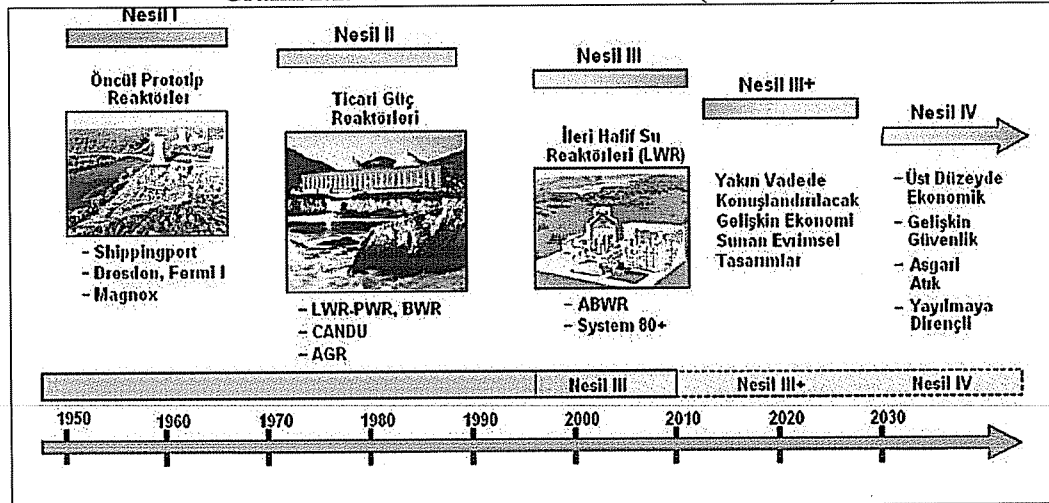
⁴⁶ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.375.

⁴⁷ A.e.

⁴⁸ Tübitak, “4. Nesil Nükleer Santraller”, Ed: Vural Altın, **Bilim ve Teknik**, Aralık 2007. s.18.

mevcuttur.⁴⁹ IV. nesil reaktörler günümüzde teorik tasarımlardan ibaret olup henüz araştırma aşamasında bulunmaktadır. IV. nesil reaktörlerin bazılarında ise, füzyon tepkimeleri ile üretim öngörülmektedir. IV. nesil nükleer santrallerin ticari faaliyete başlamaları, en erken 2030 yılı olarak öngörülmektedir. Dünya genelinde çok sayıda yeni tipte reaktör tasarlanmaktadır ve araştırma kaynaklarının çıkısını maksimize etmek için uluslararası bir dayanışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.⁵⁰ Bu nedenlerle IV. nesil reaktörler için uluslararası işbirliği süreçleri gerçekleştirilmektedir.

Grafik 2.1. Nükleer Santrallerin Nesilleri (1950-2030)



Kaynak: Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems

Nükleer reaktörler teknolojik gelişmelerini 1950'li yıllardan beri sürdürmektedir. Enerji sistemleri içinde gelecekte yer alacak IV. nesil reaktörlerin radikal dizayn değişimleri ve global ortak çalışmalarından ötürü farklı bir gelişim sürecine girebileceği beklenebilir.

2.2.2. Ticari Reaktör Tipleri

Nükleer reaktörler; tepkimelerin gerçekleştiği, kontrol edildiği ve sürdürülerek nükleer enerjiyi elde etmek amacıyla kurulmuş düzeneklerdir. Herhangi bir nükleer enerji santralinin temel birimi, bulundurduğu reaktör ve içindeki reaktör

⁴⁹ Tübitak, "4. Nesil Nükleer Santraller", Ed: Vural Altın, **Bilim ve Teknik**, Aralık 2007, s.s. 7, 8.

⁵⁰ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.375.

korudur.⁵¹ Elektrik üretiminde kullanılan ticari nükleer reaktörler, farklı ülkeler tarafından çeşitli tiplerde üretilmektedir. Nükleer reaktör tipleri; kullanılan yakıt, soğutucusuna, nötron yavaşlatıcısına(moderatör) veya nötronların enerjilerine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır.⁵² Sınıflandırmalar sıklıkla reaktörlerin soğutucusuna göre olmaktadır. Soğutucu tipine göre sınıflandırılan reaktörler; hafif su, ağır su, gaz ve sıvı metal soğutmalı olarak ayrılmaktadır.

Nükleer enerji vasıtasıyla elektrik üretiminde farklı reaktör tipleri bulunmasına rağmen enerjinin üretildiği bölüm aynı ya da benzer ana bileşenlerden meydana gelmektedir. Bu ana bileşenler; yakıt, kontrol çubukları, soğutucu ve yavaşlatıcıdan oluşmaktadır.⁵³ Günümüzde kullanılmakta olan ticari reaktörlerin tamamında uranyum veya uranyum karışımı yakıtlar kullanılır. Bir başka önemli birleşen olan kontrol çubukları, reaktörlerde enerji üretimin hızını ayarlamak için kullanılmaktadırlar.⁵⁴ Gerektiğinde enerji üretimini tamamen durdurmak, bu çubuklar sayesinde mümkün olur. Soğutucu, yakıt bölgesindeki ısıyı çekmek; yavaşlatıcı ise, nötronların hızını keserek bölünme tepkimelerini arttırmak için kullanılır.⁵⁵

Günümüzde ticari elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılan 6 tip nükleer reaktör bulunmaktadır. Bu reaktörler şunlardır.⁵⁶

- 1-) Basınçlı Su Reaktörleri; PWR (Pressurized Water Reactor)
- 2-) Kaynar Su Reaktörleri; BWR (Boiling Water Reactor)
- 3-) Basınçlı Ağır Su Reaktörleri; PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor)
- 4-) Gaz Soğutmalı Reaktörler; GGR (Gas Cooled Reactor)
- 5-) Hafif Sulu Grafit Moderatörlü Reaktörler; LWGR (Light Water Cooled Graphite Moderated Reactor)

⁵¹ Neil Morris, **a.g.e.**, s.14.

⁵² Fizik Mühendisleri Odası, **Nükleer Enerji Raporu 2006**, Ankara, 2006, s.25.

⁵³ Joseph A. Angelo, **a.g.e.**, s.272.

⁵⁴ **A.e.**

⁵⁵ **A.e.**

⁵⁶ WNA "Information Papers" (Çevrimiçi); WNA, <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>, 24 Nisan 2009.

6-) Hızlı Üretken Reaktörler; FBR (Fast Breeder Reactor)

Bu reaktörlerden ilki olan II. nesil PWR'ler dünyada kullanılan en yaygın reaktördür. Nükleer enerjiye sahip ülkelerin 24'ünde toplam 265 ünite PWR bulunmaktadır ve bu reaktörlerin toplam kurulu gücü 2008 itibariyle 243421 MW güce ulaşmıştır.⁵⁷ PWR tipi reaktör tasarımı ilk olarak ABD'de, nükleer denizaltı yapım programı sırasında düşünülmüştür. Sivil uygulamalarda ticari amaçlı ilk PWR ise 1957 Yılında, 68 MW kurulu güçle işletmeye alınmıştır.⁵⁸ Basınçlı su reaktörleri serisinde, eski Sovyetler Birliği tarafından geliştirilen dizayn; VVER reaktörlerdir. Bu reaktörlerin halen Rusya ve diğer birçok ülkede kullanımı devam etmektedir. VVER reaktörleri Batı patentli reaktörlere paralel şekilde gelişmiş ve I. nesil prototip reaktörlerden beri bu gelişimlerini sürdürmüşlerdir.⁵⁹ PWR tipinde reaktörlerin önemli avantajları şunlardır:⁶⁰

- Uzun süreli toplam çalıştırılma tecrübesi,
- Moderatör olarak kullanılan hafif suyun düşük maliyetli olması ve suyun özelliklerinin iyi bilinmesi,
- Fosil yakıtlı santrallere karşı üretim maliyetlerinde rekabetçi yapıda olmasıdır.

Zenginleştirilmiş uranyum gereksinimi ve sistemde yüksek basıncın neden olduğu bazı çatlama olasılıklarının mevcut olması ise, PWR tipinde reaktörlerin sahip olduğu bazı dezavantajlardandır.⁶¹ Güvenlik açısından bakıldığında, PWR'lerin reaktör korunda, kritik seviyenin üstünde fizyon ürünü yer almadığından reaktörün kontrolden çıkma olasılığı nispeten az ve ağır kazalara karşı daha güvenlidir. PWR'lerin karakteristik diğer bir özelliği ise, yakıt yenileme sırasında şart olan reaktör durdurulmasıdır. Yakıt yenilemesi esnasında güç üretimine birkaç

⁵⁷ IAEA, **Nuclear Power Reactors in the World**, Vienna, IAEA, 2008, s.12.

⁵⁸ Joseph A. Angelo, **a.g.e.**, s.372.

⁵⁹ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.447.

⁶⁰ Peter R. Mounfield, **World Nuclear Power**, Routledge, 1991, s.9.

⁶¹ **A.e.**

hafta ara verilmektedir.⁶² Bu sürenin azaltılması nükleer enerji santrallerinde kapasite faktörlerini* yükseltebilecek önemli unsurlardan biridir.⁶³

Hafif su kullanan diğer bir reaktör tipi olan BWR'ler dünya genelinde, PWR'lerden sonra gelen en yaygın tiptir. 9 ülkede toplam 94 ünite BWR'nin kurulu gücü, 2008 itibariyle 85275 MW seviyesine ulaşmıştır.⁶⁴ BWR'lerin %72'si ABD ve Japonya'da toplanmıştır. Günümüzde yaygın şekilde işlemekte olan II. nesil BWR'lerin tasarımı, Amerikalı GE şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir. BWR'lerin ilk elektrik üretimi; PWR tipi reaktörlerin ardından, 1961 yılında başlamıştır. Eski Sovyetler Birliği ve Doğu Bloğu ülkelerinde bu tipte reaktörler yer almamaktadır. PWR'lerde olduğu gibi, yakıt yenileme esnasında güç üretimine ara verilmesi gerekmektedir. Bu işlem yaklaşık 4-6 hafta kadar sürmekte ve üretim stratejisine bağlı olarak 12-18 ayda bir defa yapılmaktadır.⁶⁵ BWR'lerin başlıca avantajları; uzun süreli çalıştırılma tecrübesi, hafif su kullanımı, fosil yakıtlı santrallere karşı üretimde rekabetçi yapıda olmasıdır.⁶⁶ PWR'lere kıyasla düşük basınçlı sistemi sayesinde zamanla risk oluşturan çatlama ve kırılma ihtimalleri yoktur. Zenginleştirilmiş uranyum yakıtı, daha büyük kaynama kazanı ihtiyacı paralelinde yüksek bazı maliyetler ve PWR'lere kıyasla daha küçük soğutma sistemi; dezavantajları arasındadır. Başka bir ifadeyle BWR'ler, enerji talebindeki ani artışları karşılamakta duyarsızdır.⁶⁷

PHWR tipi reaktörler dünya genelinde 7 ülkede kullanılmakla birlikte, toplam 44 ünite ile en yaygın üçüncü reaktör tipidir.⁶⁸ Toplam kurulu gücü 2008 itibariyle 22384 MW seviyesine ulaşmıştır. PHWR tipi reaktörlerin en yaygın dizaynı olan CANDU reaktörleri, ilk olarak Kanada tarafından tasarlanmış ve geliştirilmiştir.

⁶² Alexander S.Leyzerovich, **Wet Steam Turbines For Nuclear Power Plants**, Oklahoma, First Edition, 2005, s.20.

* Kapasite faktörü bir santralin ne kadar verimli kullanıldığını gösteren bir parametredir. Santralin nominal gücü ile bir yılda sağladığı enerji miktarı arasında ilişki kurar. Kapasite faktörü= Ortalama güç/Nominal Güç şeklinde ifade edilir.

⁶³ A.e.

⁶⁴ IAEA, **Nuclear Power Reactors in the World**, s.12.

⁶⁵ Fizik Mühendisleri Odası, **a.g.e.**, s.32.

⁶⁶ Peter R. Mounfield, **a.g.e.**

⁶⁷ S.K. Agarwal, **Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects**, A.P.H. Publishing Corporation India, 2003, s.49.

⁶⁸ IAEA, **Nuclear Power Reactors in the World**, s.12.

Kanada 1945 yılında kendi tasarımı olan ve aynı zamanda ABD dışındaki ilk reaktör olan I. nesil ZEEP araştırma reaktörünü, II. nesil CANDU reaktörlerini geliştirmekte kullanmışlardır.⁶⁹ PHWR reaktörlerinin diğer reaktörlerden ayıran en önemli iki özellik; doğal uranyum yakıtı ve ağır su kullanmasıdır. Yakıt olarak doğal uranyumun tedarik edilmesi nispeten kolay ve maliyeti daha düşüktür. PHWR'lerin yakıt yenileme işlemi sırasında durdurulmasına gerek yoktur. Buna karşılık soğutucu ve moderatör görevindeki ağır su oldukça maliyetlidir.⁷⁰ PWR ve BWR tipi reaktörlere kıyasla PHWR santrallerinin inşaat süresinin daha kısa olması, yatırımlar maliyetleri açısından önemli bir diğer avantajdır.⁷¹

Ticari reaktörlerin ilk kullanım yıllarında ABD ve Kanada su soğutmalı dizaynların üzerinde gelişimlerini sürdürürken; İngiltere ve Fransa gaz soğutmalı, grafit moderatör reaktörleri üzerinde çalışmışlardır. Sonrasında Fransa gaz soğutmalı reaktörlerin(GCR) yerine PWR'ler üzerine yoğunlaşsa da, GCR tipi reaktörler üzerinde çalışmalar İngiltere'de devam etmiştir. GCR'ler; Magnox, AGR ve HTGR modellerinden oluşmaktadır. Magnox reaktörlerinin günümüzde çoğu sökülmiş olmasına rağmen, hala çalışmaya devam edenler bulunmaktadır. Magnoxlar yerini daha yüksek sıcaklıkta ve daha verimli çalışan II. nesil ileri gaz soğutmalı reaktörlere (AGR) bırakmıştır.⁷² Magnox reaktörleri yakıt olarak doğal uranyum kullanırken, AGR'ler zenginleştirilmiş uranyum ile çalışmaktadır.⁷³ CGR tipi reaktörlerin kullanımına günümüzde sadece İngiltere'de rastlanmaktadır. Elektrik üretimine devam eden 18 ünite gaz soğutmalı reaktörün; 4'ü I. nesil Magnox ve kalanı AGR olmak üzere tamamı İngiltere'de yer alırken, kurulu gücü toplam 9034 MW'tır.⁷⁴ AGR'ler rakipleri PWR, BWR ve PHWR'ler ile ekonomik rekabet sergileyememiş ve dünya genelinde yayılamamıştır.⁷⁵ AGR'lerin daha ileri tasarımları ise III. nesil yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörlerdir(HTGR). Ticari bir örneği henüz bulunmayan HTGR'lerin; soğutucu olarak helyum, yakıt olarak toryum çevrimine

⁶⁹ Fizik Mühendisleri Odası, **a.g.e.**, s.34.

⁷⁰ Agarwal, **Nuclear Energy**, s.53.

⁷¹ **A.e.**

⁷² Peter R. Mounfield, **a.g.e.**, s.11.

⁷³ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.449.

⁷⁴ IAEA, **Nuclear Power Reactors in the World**, s.41.

⁷⁵ Alexander S.Leyzerovich, **Wet Steam Turbines For Nuclear Power Plants**, s.25.

dayalı çalıştırılması planlanmaktadır.⁷⁶ Bu konuda Rusya, Japonya, Çin ve Güney Afrika önemli çalışmalar yapmaktadır. Gaz soğutmalı reaktörlerin tümünde düşük güç yoğunluğundan dolayı geniş kazan gereksinimi, yakıt yüklemenin teknik zorluğu, gaz olarak helyum kullanıldığından tehlikeli kaçak risklerinin bulunması belirgin dezavantajlardandır.⁷⁷

LWGR'ler soğutucu olarak su, moderatör olarak ise grafit kullanan reaktörlerdir. Bu reaktörler RBMK ismiyle yalnızca eski Sovyetler Birliği tarafından tasarlanarak inşa edilmiştir. 1986'da Çernobil'de meydana gelen dünyanın en ağır nükleer kazası RBMK tipi bir reaktörde meydana gelmiştir. 1'i Litvanya'da, 15'i Rusya'da olmak üzere halen işletilmekte olan toplam 16 tane RBMK reaktörünün toplam kurulu gücü; 11404 MW seviyesindedir.⁷⁸ CGR ve CANDU tipi reaktörlere benzer şekilde yakıt yenilemesi, reaktör durdurulmadan yapılabilir. Kullanımına devam edilen II. nesil RBMK reaktörlerine bazı güvenlik sistemleri eklenmiş durumdadır. Bunlardan en önemlisi acil soğutma sistemleri ile donatılmasıdır.⁷⁹

Hızlı üretken reaktörler (FBR); diğer reaktör tiplerinin aksine moderatör kullanmayan, başka bir deyişle, hızlı nötronları yavaşlatmayan reaktörlerdir. Soğutucu görevini ise, ağır bir metal olan sodyum üstlenir. FBR'lerde uranyum ve plütonyum karışımı yakıtlar kullanılmaktadır. FBR'lerde kullanılmış olan uranyum tekrar zenginleştirilerek yakıt olarak kullanılabilir.⁸⁰ FBR'ler ABD Rusya, İngiltere, Fransa, Japonya ve Hindistan'da kurulmuş ve çalıştırılmıştır. Almanya 1985'te tamamlanan santrali, politik baskılar nedeniyle hiç çalıştırmamıştır. Günümüzde kullanılan 4 ünite FBR, toplam 960 MW kurulu güce sahiptir.⁸¹ Bunlardan ikisi Rusya'da, diğerleri ise; Fransa ve Hindistan'da bulunmaktadır. FBR'lerin önemli diğer avantajları; nispeten küçük reaktör boyutu, soğutucu olan sodyumun basınç altında tutulmaması ve güç üretiminde maliyet üstünlükleri olmasıdır.

⁷⁶ Fizik Mühendisleri Odası, **a.g.e.**, s.38.

⁷⁷ S.K. Agarwal, **a.g.e.**, s.55.

⁷⁸ IAEA, **Nuclear Power Reactors in the World**, s.12.

⁷⁹ Geoffrey F. Hewitt, Jonh G. Collier, **Intrduction to Nuclear Power**, New York, 2nd Edition, Taylor&Francis, s.55.

⁸⁰ **A.e.**

⁸¹ WNA, "Fast Neutron Reactors", (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf98.html>, 2 Haziran 2009.

2.2.3. Uluslararası Ortak Oluşumlar Ve Yeni Nesil Reaktörler

Yeni nesil reaktör tasarımları için ilk ortak oluşum ‘‘IV. Nesil Nükleer Reaktörler Uluslararası Forumu’’ (GIF) adı altında Ocak 2000 yılında gerçekleşmiştir. Nükleer teknolojiye önde gelen toplam 12 ülkenin ortak çalışmaları, günümüzde de devam etmektedir. Nükleer teknolojiye önemli güce ulaşmış Hindistan, bu oluşuma katılmadan, kendi nükleer programı çerçevesinde yeni nesil reaktör tasarımları üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmektedir. GIF, IV. nesil reaktörleri tanımlamak ve araştırma çalışmalarını planlamak adına bir ‘‘Teknoloji Tol Haritası’’ belirlemiştir. Bu yol haritasında IV. nesil reaktörler için 4 hedef alanı ve 6 reaktör tipi seçilmiştir. Sürdürülebilirlik, ekonomiklik, güvenilirlik ve fiziksel koruma hedef alanları çerçevesinde IV. nesil reaktörlerin 8 hedefi aşağıda verilmiştir:⁸²

- 1-) İklim hedefleri ve verimli yakıt kullanımı,
- 2-) Radyoaktif atıkları minimize etmek ve uzun dönemli yönetimini sağlamak,
- 3-) Üretim maliyetlerinde avantaj sağlamak,
- 4-) Sermaye maliyetinden oluşan riskleri indirmek,
- 5-) İşletme güvenliği ve güvenilirliğini arttırmak,
- 6-) Reaktör koru hasarı ihtimalini minimize etmek,
- 7-) Saha dışı acil durum yardımını bertaraf etmek,
- 8-) Amaç dışı kullanıma karşı güvence sağlamak ve fiziksel korumayı arttırmak.

Uluslararası çapta bir diğer oluşum 2006 Yılında ABD tarafından kurulmuştur. Artan elektrik talebini, nükleer reaktörler ve nükleer enerjiyle karşılarken, nükleer silahlanmayı da engellemeyi hedefleyen oluşum ‘‘Global

⁸² Gen IV International Forum, ‘‘A Technology Roadmap For generation IV Nuclear Energy Systems’’ (Çevrimiçi); http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf 20 Mayıs 2009.

Nükleer Enerji Ortaklığı” (GNEP) ismiyle başlatılmıştır. Günümüzde 25 ülke, bu ortaklığın içinde yer almaktadır. GNEP oluşumunun hedefleri;⁸³

- 1-) Büyüyen enerji talebini; sürdürülebilir ve güvenilir olacak bir şekilde, nükleer enerjiyi dünyada genişleterek sağlamak,
- 2-) Nükleer enerji sistemlerinin sadece barışçıl amaçlarla çalışmasını sağlamak,
- 3-) Kullanılmış yakıtı değerlendirecek hızlı üretken reaktörleri geliştirip dünya genelinde yaymak,
- 4-) Fiyat ve arz güvenliğine sahip yakıtları sağlamak adına uluslararası ortaklığı tanıtmak,
- 5-) En verimli enerji ve doğal kaynakların kullanımı için uygun yakıt döngüsü yaklaşımını gerçekleştirmek şeklindedir.

GNEP ve GIF hedefleri arasında benzerlikler görülmektedir. Birleşik Devletler Enerji Ajansı’na göre GNEP, uzun dönem sürdürülebilirlik ve ekonomiklikten daha ziyade, atık yönetimi ve nükleer silahsızlanmaya daha fazla önem vermektedir.⁸⁴ GNEP oluşum hedefleri yönünden bazı eleştirilere maruz kalmaktadır. GNEP oluşumunun kurucusu olan ABD’de, yasama organları tarafından; kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesinin, uzun vadede imha edilmesine göre daha maliyetli olacağını açıklamıştır.⁸⁵ Bununla birlikte başka bir eleştiri, bizzat oluşumun içeride yer alan devletlerden gelmektedir. Buna göre; nükleer silahsızlanma adına ortaya konulan, birkaç tedarikçi ve çok alıcılı bir yakıt döngüsü sisteminin ayrımcı yapısıdır. Dolayısıyla nükleer yakıt güvencesinin gelecekte ayrı bir politik konu olabileceği endişesi yatmaktadır.

IAEA himayesinde gerçekleşen uluslararası projelerden ‘Yenilikçi Nükleer Reaktörler ve Yakıt Çevrimleri Projesi” (INPRO) 2001 yılında kurulmuştur. Türkiye de, bu oluşuma üye olan 28 ülkeden biridir. INPRO’nun amacı; sürdürülebilir

⁸³ Global Nuclear Energy Partnership, “Statement of Principles” (Çevrimiçi); http://gneppartnership.org/docs/GNEP_SOP.pdf, 21 Mayıs 2009.

⁸⁴ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.379.

⁸⁵ CBO Testimoty, “Cost of Reprocessing Versus Directly Disposing of Spent Fuel” (Çevrimiçi); <http://www.cbo.gov/ftpdocs/88xx/doc8808/11-14-NuclearFuel.htm> 22 Mayıs 2009.

biçimde enerji ihtiyacını karşılamak ve nükleer enerji kullanan ülkeleri bir araya toplayarak, reaktörler ve yakıt döngülerinde istenilen yeniliklere ulaşmaktır.⁸⁶ INPRO'nun temel ilkeleri; ekonomiklik, sürdürülebilirlik, güvenlik, atık yönetimi ve nükleer silahların yayılmasını önlemek üzerine kurulmuştur.

Uluslararası ortak oluşumların içerisinde uzun vadede devreye girmesi planlanan yeni nesil nükleer reaktörler GIF tarafından belirlenmiştir. IV. nesil reaktör programının hedeflerini karşılayacak şekilde seçilen 6 aday tasarım aşağıdaki gibidir.⁸⁷

- Gaz soğutmalı hızlı reaktör; GFR (gas cooled fast reactor)
- Kurşun soğutmalı hızlı reaktör; LFR (lead cooled fast reactor)
- Eriyik tuz reaktörü; MSR (molten salt reactor)
- Sodyum soğutmalı hızlı reaktör; SFR (sodium cooled fast reactor)
- Süper kritik su soğutmalı reaktör; SCWR (supercritical water cooled reactor)
- Çok yüksek sıcaklıklı reaktör; VHTR (very high temperature reactor)

Bu reaktörlerden GFR, LFR ve SFR hızlı üretken reaktörler; diğerleri ise, termal reaktörlerdir. Bu reaktörler önceki nesillerden belirgin şekilde ayrılmaktadır. Sürdürülebilirlik, güvenlik, güvenilirlik, ekonomiklik, fiziksel koruma ve nükleer silahlanma açısından belirgin üstünlükler sunmaktadır.⁸⁸ Yeni nesil reaktörler yüksek kapasitelerin yanında, küçük ve orta kapasiteli ünite seçeneklerini de sunmaktadır. IAEA'e göre 300 MW kapasiteye kadar olan reaktörleri küçük, 300-700 MW arası reaktörleri ise orta büyüklükte sınıflandırmaktadır.⁸⁹ Böylece gelişmekte olan bazı ülkeler için elektrik şebekesi kapasitesi, küçük ve orta büyüklükte sistemleri taşıyabilecek hale gelecektir. IV. nesil tasarımlardan SFR, VHTR ve GFR reaktörleri

⁸⁶ IAEA, "INPRO 2008 Progress Report", (Çevrimiçi); <http://www.iaea.org/INPRO/> 22 Mayıs 2009.

⁸⁷ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.376.

⁸⁸ Gen IV Forum, "A Technology Roadmap For generation IV Nuclear Energy Systems" (Çevrimiçi); http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf 23 Mayıs 2009.

⁸⁹ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.380.

150-1500 MW arasında değişen kapasitede, geniş bir seçeneğe sahiptir.⁹⁰ Küçük ve orta ölçekli reaktörlerin gelişmekte olan ülkelere sağladığı avantajlar; sermaye maliyetlerinin daha az olması ve inşaat süresinin kısaltılmış olmasıdır.⁹¹ Yeni nesil reaktörlere seçilen 6 aday sistemin çoğu kapalı yakıt çevrimine sahiptir. [Bkz. 2.4.1.] Kapalı yakıt çevrimi sayesinde, yüksek seviyeli atıkların miktarı ve depolanma süresi minimize edilebilmektedir.

Geleceğin nükleer reaktörleri elektrik üretimi dışında alternatif kullanım alanlarına sahiptir [Bkz. 2.1.4]. Yeni nesil sistemler, mevcut reaktörlere göre çok daha yüksek ısı değerlerine ulaşabilmektedirler. Kullanılmakta olan II. nesil reaktörler 330°C sıcaklıklara ulaşırken, yeni nesil sistemler 700°C seviyesinin üzerine çıkabilmektedir.⁹² Böylelikle yeni sistemler, gelecekte önemli bir enerji kaynağı olma potansiyeli taşıyan hidrojeni termokimyasal süreçte üretebilecektir.⁹³

2.3. NÜKLEER SANTRALLERİN MEVCUT KULLANIMI

2.3.1. Nükleer Santrallere Sahip Ülkeler ve Santrallerin Elektrik Üretimi

2010 yılı itibariyle dünyada elektrik üretimi gerçekleştiren 437 ünite nükleer reaktör bulunmaktadır ve bu reaktörler toplam 370705 MW kurulu güce sahiptir. ABD, Fransa, Japonya ve Rusya sayı bakımından en fazla nükleer reaktöre sahip ülkeler olup dünyadaki 437 nükleer reaktörden 248'i bu ülkelerde konuşlandırılmıştır. Nükleer reaktörlerin tasarımcısı konumunda olan ülkelerde, santrallerin yüksek kurulu güce sahip olduğu görülmektedir. Özellikle ABD, Fransa, Rusya, Japonya, Kanada'nın geliştirdikleri farklı tiplerde reaktörler; diğer ülkeler tarafından da kullanılmaktadır. Nükleer reaktörlerin toplam kurulu gücünün %62'si yine bu ülkelere aittir. 2010 yılı itibariyle nükleer reaktörler toplam 2558,08 TWsa elektrik üretimi gerçekleştirmiştir. 2008 yılında, nükleer santraller dünya elektrik

⁹⁰ Dan Gabriel Cacuci, *Sustainable Energy Technologies Options and Prospects*, Dordrecht, Ed: K. Hanjalic, R. Van de Krol, A.Lekic, Springer, 2008, s.166.

⁹¹ OECD NEA, *Nuclear Energy Outlook 2008*, s.380.

⁹² National Research Council, *The Hydrogen Economy*, Washington, National Academies Press, 2004, s.95.

⁹³ A.e.

üretiminin %15'ini karşılamaktadır.⁹⁴ Nükleer reaktörlerin kullanıldığı 29 ülkenin 17'sinde, elektrik üretiminin %20'sinden fazlası nükleer enerji ile gerçekleşmiştir. Özellikle Fransa'da yer alan 59 adet nükleer reaktör, ülke elektriğinin %75'ini üretmektedir.⁹⁵

Tablo 2.1. Nükleer Reaktörlerin Kurulu Gücü ve Elektrik Üretimi (2010)

ÜLKE	REAKTÖR SAYISI (ünite)	KURULU GÜÇ (MW)	ELEKTRİK ÜRETİMİ (TWsa)	ELEKTRİK ÜRETİMİNİN KARŞILANMA PAYI (%)
Dünya Toplam	437	370705	2558,08	-
ABD	104	100747	796,89	20,2
Fransa	59	63260	391,75	75,2
Japonya	54	46823	263,07	28,9
Rusya	31	21743	152,78	17,8
Almanya	17	20480	127,72	26,1
G. Kore	20	17705	141,12	34,8
Ukrayna	15	13107	77,95	48,6
Kanada	18	12569	85,13	14,8
İngiltere	19	10137	62,86	17,9
İsveç	10	9036	50,04	37,4
Çin	11	8438	65,71	1,9
İspanya	8	7450	50,58	17,5
Belçika	7	5902	44,96	51,7
Hindistan	18	3987	14,75	2,2
Çek Cum.	6	3678	25,66	33,8
İsviçre	5	3238	26,27	39,5
Finlandiya	4	2696	22,6	32,9
Bulgaristan	2	1906	14,22	35,9
Macaristan	4	1889	14,3	43
Brezilya	2	1884	12,22	2,9
G. Afrika	2	1800	11,57	4,8

⁹⁴ US Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2008" (Çevrimiçi); <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html> 13 Mayıs 2009.

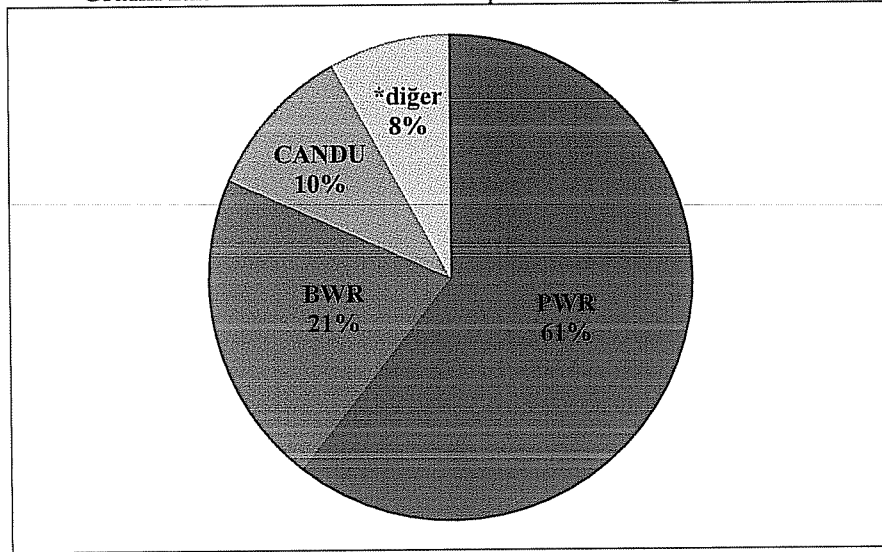
⁹⁵ IAEA "Nuclear Power Reactors in the World 2010" (Çevrimiçi); http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf 29 Haziran 2010 .

Slovakya	4	1762	13,08	53,5
Meksika	2	1300	10,1	4,8
Romanya	2	1300	10,82	20,6
Arjantin	2	935	7,59	7
Slovenya	1	666	5,46	37,8
Hollanda	1	487	4,02	3,7
Pakistan	2	425	2,64	2,7
Ermenistan	1	375	2,29	45

Kaynak: IAEA, (Nuclear Power Reactors in the World 2010 verilerinden düzenlenmiştir.)

Dünyada en çok kullanılan reaktör tiplerinde PWR ilk sırada yer almaktadır. 265 ünite PWR reaktörünü, 92 BWR ve 45 ünite CANDU takip etmektedir.

Grafik 2.2. Nükleer Reaktörlerin Tiplerine Göre Dağılımı (2010)



*GCR, LWGR, FBR

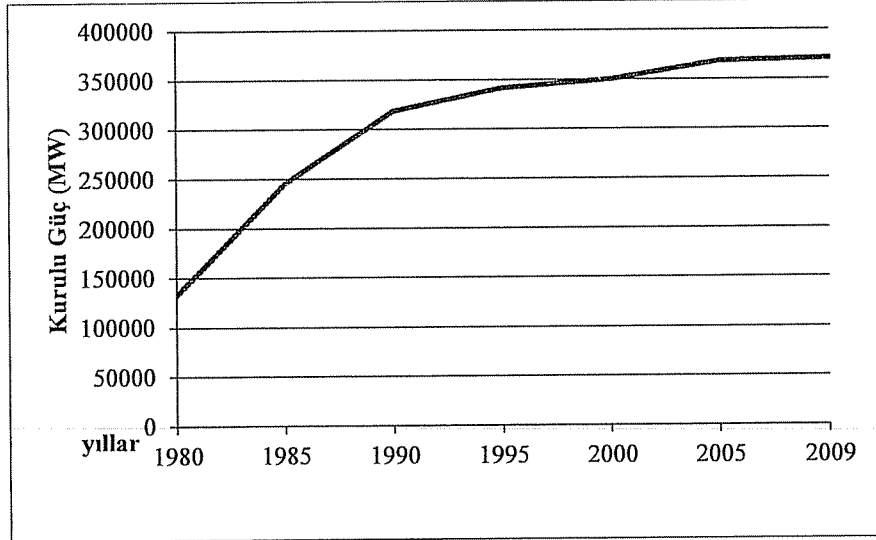
Kaynak: IAEA, Nuclear Power Reactors in the World 2010

2.3.2. Nükleer Santrallerin Yapılanmalarında Eğilim

Nükleer santrallerin kullanımının yaygınlaşması, 1960'lı yıllardan itibaren II. nesil ticari reaktörler ile sağlanmıştır. 1960-1990 yılları arasında konuşlandırılan bu reaktörlerin çoğunun kullanımına günümüzde devam edilmektedir. Nükleer santraller, ilk yatırımları yüksek; ancak uzun ömürlü elektrik üretim tesisleri olup işletme ömürleri 40-60 yıl olarak öngörülmektedir. 1980 yılında kurulu gücü 133017 MW olan nükleer santraller; kapatılan reaktörler ve nükleer enerji üretimini

sistemlerinden çıkaran ülkelere rağmen, 2009 yılında 370705 MW kurulu güç seviyesine ulaşmıştır. [Bkz. Grafik 2.3.] 1986 yılında Çernobil’de meydana gelen kaza sonrasında nükleer santrallerin yapımı, dünyanın bazı bölgelerinde durdurulmuş ve projeler iptal edilmiştir. Buna rağmen nükleer enerjinin kurulu gücü en çok 1980-1990 yılları arasında yükselmiştir. Santrallerin kurulu gücündeki artış son yıllarda azalsa da; günümüzde inşaatı devam eden ve kurulması öngörülen santrallerin, nükleer enerjinin payını gelecekte de yükselteceğini göstermektedir.

Grafik 2.3. Nükleer Santrallerin yıllar İtibariyle Kurulu Güç Gelişimi (MW)



Kaynak: IAEA, Nuclear Power Reactors in the World 2010

2000 yılından itibaren, dünyada 34 ünite nükleer reaktörün kapatılması gerçekleşmiştir. Bu reaktörlerden 16’sı, İngiltere’de yer alan I. ve II. nesil arasında kalmış MAGNOX tipi gaz soğutmalı reaktörlerdir. Reaktörlerin tamamı en az 44 yıl işletilmiş olup her birinin kapasitesi 400 MW’ın altında yer almaktadır.⁹⁶

2010 yılı itibariyle dünyada inşaatına devam edilen toplam 50929 MW kurulu güce sahip 55 nükleer reaktör yer almaktadır. Bu reaktörlerin yapımı 20’si Çin’de, 9’u ise Rusya’da hizmete girecektir.⁹⁷ Kurulması planlanan veya sipariş edilmiş durumda olan 151 nükleer reaktör bulunurken, bunlardan çoğunluğu PWR

⁹⁶ WNA, “Reactor Database” (Çevrimiçi); <http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/Advanced.aspx?id=27246> 30 Haziran 2010.

⁹⁷ IAEA “Nuclear Power Reactors in the World 2010” (Çevrimiçi); http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf 30 Haziran 2010.

tipindedir.⁹⁸ Türkiye’de de 2019 yılında Mersin Akkuyu’da devreye girecek 4 ünitelik bir nükleer santral planlanmaktadır. Nükleer santral inşa etmeyi planlayan ülkeler arasında Tayland, Malezya, Birleşik Arap Emirlikleri ve Vietnam gibi dünyanın çeşitli coğrafyalarında yer alan ülkeler bulunmaktadır. İtalya nükleer santrallerinin tamamını kapatmış, ancak gelecekte yeniden kurmayı planlamaktadır. Dünyada, uzun vadede devreden çıkarılması öngörülen 5 ünite toplam 2972 MW gücünde reaktör bulunmakta; bunlar Çin ve Japonya’da yer almaktadır.⁹⁹

Tablo 2.2. İnşaatı Devam Eden ve kapatılması Planlanan Reaktörler (2010)

KAPATILMASI PLANLANAN REAKTÖRLER		İNŞAATI DEVAM EDEN REAKTÖRLER		KURULMASI PLANLANAN REAKTÖRLER	
Ünite sayısı	Kurlu Güç (MW)	Ünite sayısı	Kurlu Güç (MW)	Ünite sayısı	Kurlu Güç (MW)
5	2972	55	50929	151	165699

Kaynak: IAEA, Nuclear Power Reactors in the World 2010, WNA, World Nuclear Power Reactors

Nükleer santrallerin, dünya genelinde kurulu gücü ve buna bağlı olarak gerçekleştirdiği elektrik üretimi artarken, coğrafi açıdan da daha fazla ülkede kullanımının yaygınlaştığını söylemek mümkündür. Güvenlik, düşük üretim, yatırım maliyetleri ve silahsızlanma gibi alanlarda yapılan uluslararası işbirliklerinin yanı sıra; yeni nesil tasarımlar, inşaat halinde olan santraller ve ülkelerin kurmayı planladığı tesisler; nükleer enerjide artan yönde bir yapılanmanın varlığını ve enerji kaynakları içerisindeki payını koruyarak yükselteceğini göstermektedir.

2.4. NÜKLEER HAMMADDE VE YAKIT ÇEVİRİMİ

Bu bölümde uranyum ve toryumun; üretim tüketim ve rezervleri ele alınacaktır. Bununla birlikte bu hammaddelerin nükleer birer yakıt olabilmeleri için gerekli evreler açıklanacaktır.

⁹⁸ WNA, “Reactor Database” (Çevrimiçi); <http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/Advanced.aspx?id=27246> 30 Haziran 2010.

⁹⁹ IAEA “Nuclear Power Reactors in the World 2010” (Çevrimiçi); http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf 30 Haziran 2010.

2.4.1. Uranyum

Nükleer santrallerde kullanılan nükleer enerji hammaddeleri uranyum ve toryumdur. Nükleer hammaddeler, nükleer reaktörlerde enerji üretimi için yakıt haline getirilmektedir. Bu yakıtlar, hammaddelerin işlenerek yakıt halini alması veya tepkimeye girerek doğada bulunmayan maddelerin ortaya çıkması sonucu elde edilir. Günümüzde ticari reaktörlerin tamamı uranyum ve uranyumun türevleri olarak ortaya çıkan yakıtlar ile çalışır. Doğal uranyumun nükleer yakıt haline gelmesi için bazı evrelerden geçmesi gerekir. Bunlar:¹⁰⁰

- 1- Uranyumun madenden çıkartılması
- 2- Çıkarılan madenin işlenerek sarı pasta üretilmesi (Uranyum Oksit U_3O_8)
- 3- Uranyum zenginleştirmesini mümkün kılacak arındırma ve dönüştürme (Uranyum Heksaflorür UF_6)
- 4- Uranyum zenginleştirme
- 5- UF_6 'nın uranyum dioksite dönüştürülerek reaktör için yakıt tableti halini almasıdır.

Doğal uranyumun hafif sulu reaktörlerde yakıt olarak kullanılması için zenginleştirilmesi gerekmektedir. Reaktörlerin kullandıkları teknolojiye bağlı olarak yine zenginleştirme işleminin derecesi değişebilir.¹⁰¹ Uluslararası piyasalarda uranyumun satışı, sarı pasta evresinde gerçekleşmektedir. Sektörde faaliyet gösteren en önemli kuruluş Uluslararası Atom Enerji Ajansı'dır (IAEA). Ayrıca diğer bir organizasyon olan Nükleer Enerji Ajansı (NEA) ülkeler arası bilgi alışverişi ve işbirliğini sağlamaktadır. Uranyumu zenginleştirip piyasaya sunan teknolojiye sahip başlıca ülkeler ABD, Japonya, Fransa, Almanya, Hollanda, Rusya ve İngiltere'dir. Brezilya, Çin, Kuzey Kore ve İran gibi ülkelerin de uranyum zenginleştirme faaliyetlerinde bulunduğu tahmin edilmektedir.

¹⁰⁰ Erwann O. Michel, Debra K. Decker, "The Economics of Nuclear Energy Markets and the Future of International Security" (Çevrimiçi); http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP2008-01-08.EMK.DD_ENEM.pdf s.4, 24 Mayıs 2009.

¹⁰¹ Jeff W. Eerks, *The Nuclear Imperative: A Critical Look at the Approaching Energy Crisis*, Dordrecht, Springer, 2006, s.84.

Yakıt çevrimleri, ülkelerin nükleer güç üretim seçeneğinde önemli etkilere sahiptir. Nükleer yakıt çevrimi; enerji üretiminde hammaddelerin madenden çıkarılmasından, kullanılmış yakıt halini alması ve işlenmesine kadar geçen aşamaları belirtmek amacıyla kullanılmaktadır. Uranyumun yakıt çevrimleri için iki seçenek mevcuttur. Bunlar:¹⁰²

1-Açık (tek geçişli) çevrim,

2-Kapalı çevrimdir.

Açık yakıt çevriminde, uranyum yakıt olarak kullanıldıktan sonra nükleer atık olarak kabul edilmekte ve bir süre bekletildikten sonra nihai atık depolama tesislerine gönderilmektedir.¹⁰³ Açık çevrim, yeniden işleme tesisi gibi ileri teknoloji ürünü gerektirmedikinden ve işletme maliyetleri nispeten düşük olduğundan çoğu nükleer tesisin tercih sebebidir.

Kapalı çevrime sahip olan tesisler ise kullanılmış yakıtı yeniden işlemektedir. Kullanılmış yakıtın bir kısmı, içerisinde yeniden yakıt imalatında kullanılabilecek tepkimeye girmemiş uranyum ve plütonyum içermektedir.¹⁰⁴ Reaktörlerden çıkan kullanılmış yakıt tabletleri; nihai depolama yerine, yeniden işleme tesisine gönderilerek içindeki uranyum ve plütonyum gibi maddeler ayrıştırılmaktadır.¹⁰⁵ Böylelikle kapalı çevrimde, nükleer oksit yakıt olan MOX (mixed oxide fuel) elde edilir. Yapay yakıt niteliğinde olan bu yakıt türünü kullanan reaktörlere özellikle Fransa, Almaya ve Japonya'daki nükleer santrallerin LWR tipi reaktörlerinde rastlanmaktadır. MOX yakıtlarının nihai depolanmada sunduğu en büyük avantaj atık hacminin oldukça küçük olmasıdır.

Nükleer santral kurulum tercihlerinde ülkelerin esas hedefleri; çevrimi basit şekilde gerçekleştirmek, çevrim maliyetlerini düşük tutmak, çevresel risk faktörlerini en aza indirmek ve bütün bunlar gerçekleşirken kamuoyu desteğini sağlamaktır. Her ne kadar açık çevrim başlangıçta nispeten daha az maliyetli ve teknolojik açıdan

¹⁰² Fizik Mühendisleri Odası, **a.g.e.** s.51.

¹⁰³ **A.e.**

¹⁰⁴ Erwann O. Michel, Debra K. Decker, **a.g.e.**, s.5.

¹⁰⁵ Fizik Mühendisleri Odası, **a.g.e.**

daha basit görünse de, uzun vadede kapalı çevrimin önemli avantajları ortaya çıkmaktadır. Kapalı çevrimde elde edilen yapay yakıt, bir enerji kaynağı olarak görülebilir. Yine benzer şekilde kapalı çevrimle elde edilen yapay yakıttan dolayı, santrallerin işletme ömürleri boyunca uranyum gereksinimleri daha az olur ve yakıt maliyetleri açısından önemli bir avantaj sağlayabilirler. Nihai depolamada kapalı çevrimin radyoaktif atıklarının hacimleri daha az olduğundan, açık çevrime sahip tesislere göre atık yönetimi nispeten daha güvenlidir.¹⁰⁶ Kapalı çevrim tesisleri ilk bakışta yüksek maliyet ve yüksek teknoloji gereksinimi gibi zorluklara sahip olsa da, sürdürülebilirlik açısından açık çevrime sahip tesislere göre daha üstündür.

Arz yönünden uranyum, diğer enerji kaynaklarına göre belirgin ayırıcı özelliklere sahiptir. Öncelikle dünyada geniş bir coğrafyaya yayılmış ve bol miktarda bulunmaktadır. Uranyum arzını, birincil arz ve ikincil arz şeklinde ayırmak mümkündür. Açık çevrimde tek kullanımlık uranyum ve kapalı döngüde elde edilen MOX yakıtının miktarı da uranyum arzının belirleyicilerindendir. Benzer şekilde gelecekte toryumun yakıt olarak kullanılmaya başlanması ihtimali, yine uranyum arzı üzerinde belirleyici olacaktır. Uranyum arzının çoğunluğunu oluşturan birincil uranyum arzı, madenlerden gelmektedir. İkincil uranyum arzı ise stoklardan, sökülen nükleer savaş başlıklarından ve yeniden işlenmiş yakıtlardan gelmektedir.¹⁰⁷ Günümüzde gerçekleşen uranyum arzının yaklaşık %60'ı madenlerden çıkartılan uranyumdan oluşmaktadır.¹⁰⁸ Günümüzde uranyum üreticisi konumunda 19 ülke göstermektedir.¹⁰⁹ Üretimde başı çeken ülkeler sırasıyla Kanada, Kazakistan ve Avustralya'dır. Bu üç ülkenin toplam üretimi dünya birincil uranyum arzının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır.

¹⁰⁶ K. W. Hesketh, **The Nuclear Fuel Cycle. From Ore to Wastes**, New York, Ed: P. D. Wilson, Oxford University Press, 1996, s.82.

¹⁰⁷ OECD NEA, IAEA, **Uranium 2005: Resources, Production and Demand**, Paris, OECD Publishing, 2006, s.60.

¹⁰⁸ A.e.

¹⁰⁹ WNA, "Uranium Production" (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>, 1 Nisan 2010.

Tablo 2.3. Dünya Uranyum Üretimi 1998-2008 (ton)

Ülkeler \ Yıllar	1998	2003	2008
Kanada	10924	10457	9000
Kazakistan	1074	3300	8521
Avustralya	4885	7572	8430
Namibya	2762	2036	4366
Rusya	2000	3150	3521
Diğer Ülkeler	12074	9061	13536
DÜNYA TOPLAM	33719	35576	43853

Kaynak: WNA, Çevrimiçi; <http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html> 1 Nisan 2010

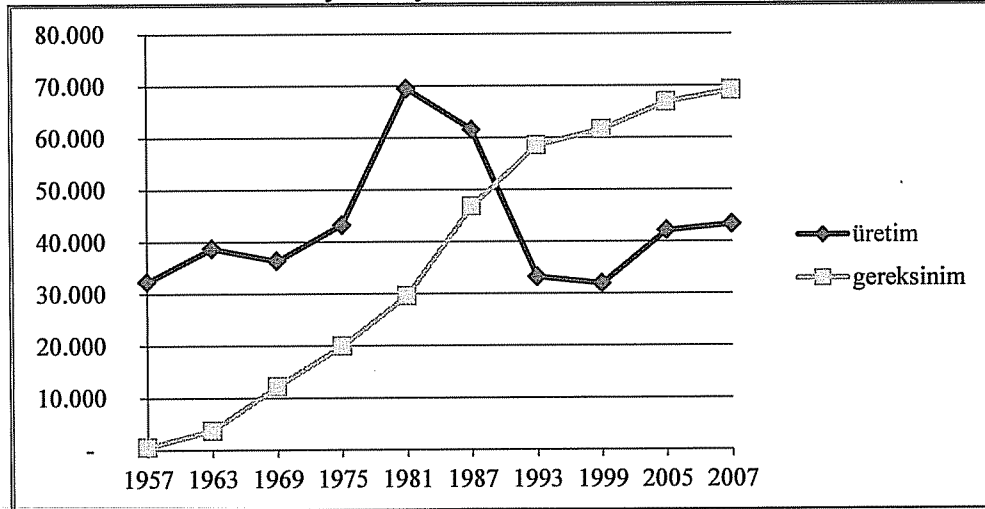
ABD nükleer güç üretimi bakımından dünyada ilk sırada yer almasına rağmen, dünya toplam uranyum üretiminde payı yaklaşık %4'tür.¹¹⁰ 1980 sonrası uranyum üretimi bu ülkede keskin bir düşüş göstermiştir. Bu durum ABD'nin uranyum gereksinimini ikincil uranyum arzından karşıladığını göstermektedir. ABD'de nükleer santrallerin tamamı PWR veya BWR olmak üzere ağır sulu reaktörlerden oluşmaktadır. Dolayısıyla ikincil arzın bir kısmını oluşturan MOX veya benzeri yapay yakıtların bu tip reaktörlerde kullanılması mümkün değildir. Ancak ikincil arzın bu ülkede ön plana çıkması, özellikle soğuk savaş döneminde stokladığı büyük miktarda uranyum ve bir kısmı sökülmekte olan savaş başlıklarının içerdiği yüksek zenginleştirilmiş uranyum ve plütonyumdan dolayı olmuştur.

Dünya uranyum talebi 1950'li yıllardan beri sürekli artış eğilimi içerisinde. Askeri amaçlı uranyum talebinin yerini ticari amaçlı elektrik üretimine bırakmasının etkisiyle 1960'lı yıllardan itibaren uranyum talebinde yüksek artışlar görülmektedir. Özellikle 1975-1981 yılları talep artışının en çok gerçekleştiği yıllardır. Uranyum talebi son yıllarda hız keserek artma eğilimini sürdürmektedir. İkincil uranyum arzının yarattığı etki, grafik 2,3.'te arz ve talebin kesiştiği noktadan sonraki yıllarda görülmektedir. Dünya uranyum gereksiniminin, 1980'li yılların sonundan itibaren arzından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu gereksinim ise; daha önce belirtildiği gibi atık yakıtların kullanılması, stoklar ve sökülen nükleer silahların oluşturduğu ikincil uranyum arzından karşılanmaktadır. Yıllar itibariyle uranyum

¹¹⁰ Erwann O. Michel, Debra K. Decker, a.g.e., s.10.

talebinde gerçekleşen artış, nükleer santrallerin üretim kapasitesinin artmasına bağlı olup dünya genelinde ticari nükleer reaktörlerin kurlu güç artışını da doğrulayan göstergelerden biridir. Sayı bakımından nükleer reaktörlerin en çok bulunduğu ülkeler olan ABD, Fransa ve Japonya dünya toplam uranyum tüketiminin %60'ını gerçekleştirmektedir.¹¹¹

Grafik 2.4. Dünya Uranyum Arz ve Talebi 1957-2007 (bin ton)



Kaynak: OECD NEA&IAEA, Uranium 2007: Resources, Production and Demand

Rezervler yönünden bakıldığında dünyanın en zengin uranyum ülkeleri sırasıyla Avustralya, Kazakistan, Kanada, Güney Afrika ve Rusya'dır. Bu beş ülke dünyada kg'ı 80 ABD doları altında maliyetle çıkarılabilen görünür uranyum kaynaklarının yaklaşık %70'ine sahiptir. Uranyum rezervleri, NEA ve IAEA tarafından maliyeti kg'ı 40 ABD dolarının altında, kg'ı 80 ABD dolarının altında ve kg'ı 80-130 ABD doları arasında biçimde ayrılmıştır. Dünyadaki uranyum rezervlerinin, görünür kaynakların oldukça üzerinde olduğu bilinmektedir. Bilinen rezervlere, muhtemel rezervler eklendiğinde dünya uranyum kaynakları toplam 4456400 ton olarak tahmin edilmektedir.¹¹²

Uranyum rezervlerinin keşfi; 1945-1958 arasında askeri talebi karşılamak ve 1974-1983 yıllarında ise ticari elektrik üretimini karşılamak için yüksek miktarlarda olduğu düşünülebilir.

¹¹¹ A.e., s.8.

¹¹² OECD NEA&IAEA, Uranium 2007: Resources, Production and Demand, Paris, OECD Publishing, 2008 s.16.

Tablo 2.4. Dünya Uranyum Rezervleri 2007 (ton)

ÜLKELER	BİLİNER KAYNAKLAR (80\$/KgU maliyeti altında rezervler)
Avustralya	714000
Kazakistan	344200
Kanada	329200
G. Afrika	205900
Rusya	172400
Namibya	145100
Ukrayna	126500
ABD	99000
Türkiye	9130
Diğer Ülkeler	452570
Dünya Toplam	2598000

Kaynak: OECD, NEA&IAEA, *Resources, Production and Demand: A Joint Report*

2003-2009 yılları arasında uranyum rezerv aramaları, tekrar büyük bir ivme kazanmıştır. Nitekim dünyada bilinen uranyum kaynakları, 2005 yılından 2007 yılına kadar %15 oranında maden keşfine dayalı olarak artış göstermiştir.¹¹³

Türkiye’de teknolojik açıdan uranyum aramalarına ilk 1966 yılında başlanmıştır. Bugüne kadar yapılan aramalar sonucunda, çoğunluğu Yozgat-Sorgun ve Manisa-Köprübaşı’nda olmak üzere toplam 9129 ton uranyum günümüzde bilinen rezervlerdir.¹¹⁴ Türkiye’de 1991 yılında uranyum aramaları için yapılan harcama durdurulmuş, dolayısıyla uranyum aramaları son bulmuştur. Bu rezervler aranıp bulundukları yıllara göre, dünyaca kabul gören ekonomik sınırın içinde yer almalarına rağmen; günümüzde bu sınırın dışında kalmaktadırlar.¹¹⁵ Son yıllarda Türkiye uranyum arama faaliyetlerine tekrar başlamış ve 2005-2006 yıllarında 7000 km²’lik alanda taramalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda özellikle Batı Anadolu’da çok sayıda radyoaktif anomalinin* varlığına saptanmıştır.¹¹⁶ Bu durum bölgede uranyum ve toryum yataklarının varlığının göstergesidir. Bugüne kadar

¹¹³ A.e.

¹¹⁴ Fizik Mühendisleri Odası, *a.g.e.*, s.52.

¹¹⁵ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Uranyum ve Toryum” (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr> 5 Nisan 2010.

* aykırılık, belli bir ölçüye, belli bir kurala uymama durumu

¹¹⁶ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Uranyum ve Toryum” (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr> 5 Nisan 2010.

yapılan uranyum arama faaliyetleri incelendiğinde, belirlenmiş olan rezervlerin Türkiye'nin potansiyelini ifade etmediği ve daha büyük yatakların bulunmasının mümkün olduğu kabul görmektedir.

Nükleer enerjinin uzun süre, güvenli bir şekilde enerji üretimine devam edebilmesi stratejik bir yakıt halini alan uranyuma bağlıdır. Uranyum taşınabilirlik, işlenebilirlik, depolanma özellikleri ve dünyada geniş bir coğrafyaya yayılmış olmasından ötürü özel konuma sahip bir hammadDEDİR. Enerji tercihlerinde, nükleer güç üretimini kullanan ve nükleer güç kullanımına geçiş yapmayı planlayan ülkelerin, uranyum rezervlerinden ziyade yakıtlarını nasıl imal edecekleri ve hangi tip yakıt çevrimlerini seçecekleri daha önemlidir. Zira uranyum rezervleri bol bir ülke, uranyum zenginleştirme teknolojisine veya doğal uranyumdan yakıt elde edecek tesislere sahip değilse, nükleer yakıtlarını ithal etmek zorunda kalacaktır. Uranyum piyasaları sahip olduğu bu tür ayırıcı özelliklerinden dolayı kuvvetli kamu gereksinimine ihtiyaç duymaktadır.

2.4.2. Toryum

Toryum, dünya üzerinde uranyumdan miktar olarak daha bol bulunan diğer bir nükleer yakıt hammadDESİDİR. Toryum nükleer reaktörlerde uranyum gibi doğrudan yakıt olarak kullanılmamakla birlikte, günümüzde toryuma dayalı ticari ölçekli nükleer santral bulunmamaktadır. Toryumu nükleer reaktörlerde bir yakıt olarak kullanmanın zor yanı, öncelikle enerji elde edilmeden önce kendisinin üreme sürecinin gerçekleşmesidir.¹¹⁷ (U_{233} 'e dönüştürme). Teorik olarak toryum ve uranyum karışımli bir yakıt kullanıldığında, oluşacak nükleer atık miktarı, geleneksel bir reaktörden oluşan atıklara göre çok daha az olacaktır.¹¹⁸ Ayrıca deneysel aşamada olan bu tip karışım yakıt reaktörlerde daha uzun süre dayandığından, yakıt yükleme sürecini uzatabilmekte ve böylece santralin kapasite faktörü yükselebilmektedir.

Kurulması planlanan III. ve IV. nesil reaktörlerin bir kısmı toryum yakıt çevrimine dayalı tasarlanmaktadır. Uluslararası oluşumlardan GIF hedeflerinin gerçekleşmesinde, toryum yakıtlı reaktörler de yerini almaktadır. Dünyada toryum

¹¹⁷ Tübitak, "Toryuma Yöneliş mi?" Ed: Vural Altın, **Bilim ve Teknik**, Ağustos 2004, s.8.

¹¹⁸ A.e.

konusunda özellikle Hindistan büyük gelişme sergilemektedir. Bu ülkede toryum üretimi için, uranyum üretimine göre daha büyük çaba harcanmaktadır. Hindistan'daki büyük miktarda toryum yatakları, bu teknolojiye yoğunlaşmalarındaki en büyük etkidir.¹¹⁹

Toryumla çalışan reaktörler henüz faaliyete geçmediğinden toryum aramalarına yönelik çalışmalar yeterince yoğunluk kazanmamıştır. Dünya toplam toryum rezervleri 6 milyon ton olarak tahmin edilirken, 80 ABD doları maliyetin altında bilinen toryum rezervleri 1.173 milyon ton kadardır.¹²⁰

Tablo 2.5. Dünya Toryum Rezervleri 2007 (ton)

ÜLKELER	GÖRÜNÜR KAYNAKLAR (80\$/Kg maliyetin altında)
TÜRKİYE	344000
HİNDİSTAN	319000
BREZİLYA	172000
ABD	122000
RUSYA	75000
DİĞER ÜLKELER	141000
DÜNYA TOPLAM	1173000

Kaynak: OECD, NEA&IAEA, *Resources, Production and Demand: A Joint Report*

Türkiye'nin sahip olduğu yüksek miktarda toryum rezervi 1970'li yıllarda Eskişehir-Sivrihisar'da keşfedilmiştir. TAEK bünyesinde "Nükleer Yakıt Teknolojisi Geliştirilmesi" projesi kapsamında 2003 yılından beri toryum çalışmaları ayrıştırma, saflaştırma ve enerji sektöründe kullanılabilirlik açısından yürütülmektedir.¹²¹

Gerek toryum, gerek uranyum açısından Türkiye'nin sahip olduğu rezervler, nükleer teknolojilerin transferi için günümüzde yeterli değildir. Dünyada kullanılan nükleer yakıt üretim teknolojileri göz önünde bulundurulduğunda; Türkiye'de

¹¹⁹ Government of India, Department of Atomic Energy, "Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme" (Çevrimiçi): <http://www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf> 7 Nisan 2010.

¹²⁰ OECD NEA&IAEA, a.g.e., s.28.

¹²¹ Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Uranyum ve Toryum" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr>, 7 Nisan 2010.

nükleer hammaddelerden yakıt tedariki gerek rezervlerin kalitesi, gerek yetersiz teknolojilerden ötürü ekonomik olma sınırının altında kalmaktadır.¹²² Ayrıca, nükleer santral teknolojilerinin transferinde yakıt çevrim politikaları reaktörün tipine uygun biçimde yapılmalıdır. Daha önemlisi; nükleer tesislerden elde edilecek elektrik üretim maliyetleri içerisinde yakıtlar, nispeten düşük pay oluşturmaktadır. Bütün bunlara rağmen geçmişte keşfedilmiş rezervler, daha yüksek kalitede ve miktarda toryum ve uranyumun bulunabileceğine işarettir. Bu rezervlerin varlığı gelecekte nükleer enerji kullanılması durumunda Türkiye için yüksek bir potansiyeeldir.

¹²² Kadir Temurçin, Alpaslan Aliagaoglu, "Nükleer Enerji ve Tartışmalar Işığında Türkiye'de Nükleer Enerji Gerçeği" **Coğrafi Bilimler Dergisi**, Ocak 2003, s.33.

III. BÖLÜM

NÜKLEER SANTRALLERİNİN ÜRETİM MALİYETLERİ, ÇEVRESEL ETKİLERİ VE TÜRKİYE’NİN ENERJİ İHTİYACINDAKİ YERİ

Bu bölümde nükleer santrallerin elektrik üretim maliyetleri diğer santraller ile kıyaslanacak, çevresel etkileri ele alınacak ve Türkiye’de kurulması olası santrallerin enerji arz güvenliğini sağlaması yönünde katkısı incelenecektir.

3.1. NÜKLEER SANTRALLERDE ÜRETİM MALİYETLERİ

Bir nükleer santralin kurulumunda sabit ve değişken maliyetler yer almaktadır. Sabit maliyetler; nükleer santral binasının inşa edilmesi, reaktörün kurulumu, santralin yol, su, şebeke bağlantısı gibi altyapı maliyetleri, güvenlik maliyetleri ve santraldeki ek yapılar gibi ilk yatırımlar ve bunların finansmanından doğan sermaye maliyetlerinden oluşmaktadır. Değişken maliyetler ise santralin işletme ömrü boyunca yaptığı harcamalar ve yakıt maliyetlerinden oluşmaktadır. Bütün sabit ve değişken maliyetler, santralin kurulma kararı ve devreden çıkartılmasına kadar olan süreyi de kapsayarak elektrik üretim maliyetlerini belirlemektedir.

3.1.1. Yatırım Maliyetleri

Yatırım maliyetleri yeni bir nükleer santral yapımında gerekli maliyetlerdir. Kurulması planlanan enerji santrallerinin tümünde yatırım maliyetleri sabit ve zorunlu maliyetlerdir. Bir nükleer santralin yatırım maliyetinin önemli kalemleri aşağıdaki gibidir:¹

- İnşaat Maliyeti,
- Tasarım ve Mühendislik Maliyetleri,
- Başlıca yenileme maliyeti,

¹ OECD Nuclear Energy Agency, **Nuclear Energy Today**, Paris, OECD Publishing, 2003, s.60.

- Santralin devreden çıkarılma maliyeti, (sökme maliyeti)

Yatırım maliyeti büyük ölçüde yeni kurulacak bir nükleer santralin teknolojik donanımlarına bağlıdır. Nükleer enerji santrallerinin yapısı itibariyle, yatırım maliyetleri toplam maliyetlerin en büyük bileşenidir ve toplam elektrik üretim maliyetinin %60-%75'lik kısmını oluşturmaktadır.² Ayrıca, nükleer santraller, yüksek yatırım bedellerinin finansmanından kaynaklanan faiz ödemelerine maruz kalmaktadırlar.³ Dolayısıyla borçlanma faizinin geri ödemeleri de elektrik üretim maliyetinin bir parçası olmaktadır. Nükleer santrallerde KWsa başına elektrik üretim maliyeti, gecelik inşaat maliyetine ve faizlerini kapsayan yatırım maliyetine; başka bir deyişle sermaye maliyetine karşı oldukça duyarlıdır.

Yeni bir nükleer santral yapımında yatırım maliyeti, seçilen reaktör tipine göre farklılıklar gösterecektir. Reaktör tipinin sermaye maliyetindeki payı; kurulu gücüne, güvenlik donanımlarına ve içerdikleri yapı malzemelerine göre belirlenmektedir. Reaktör tiplerinin tasarımcılarının ve coğrafi yaygınlıklarının farklı olması sonucu yatırım maliyetleri geniş bir aralıkta yer almaktadır. Bu yaklaşım basit bir örnekle açıklanabilir. Kanada'da bulunan reaktörlerin tamamı kendi üretimi olan CANDU tipi reaktörlerden, İngiltere'deki reaktörlerin tamamına yakını GCR reaktörlerinden ve benzer şekilde Hindistan'da yer alan reaktörlerin büyük çoğunluğu yine kendi üretimi olan reaktörlerden oluşmaktadır. Dünyada nükleer santrallerin bulunduğu ülkelerin tamamına yakınında en yaygın reaktör tipi olan PWR'lerin bu ülkelerde kurulmadığı görülmektedir. Bu durum yerli patentli reaktörlerin bulunduğu ülkelerde, teknoloji transferi ile kurulan reaktörlere tercih edildiğini göstermekte ve haliyle farklı teknoloji transferinin ilk yatırım maliyetlerini yüksek olduğu sinyali vermektedir.

Günümüzde kullanılmakta olan 1200 MW kurulu güce sahip III. nesil bir nükleer reaktör için yatırım bedeli yaklaşık 3000-4000 \$/KW arasında gerçekleşmektedir.⁴ Başka bir deyişle ilk yatırım toplam 3-4 milyar ABD dolarına

² A.e.

³ A.e., s.61.

⁴ OECD NEA, IEA, **Projected Cost of Generating Electricity**, 2010 Edition, Paris, OECD Publishing, s.48.

ulaşmaktadır. Santralin finansmanı ile birlikte ortaya çıkan ve faiz oranına da önemli ölçüde bağlı olan yatırımın maliyeti, faiz ödemeleriyle birlikte 4500-6000 \$/KW'ı bulmaktadır.⁵ Çin ve G.Kore'de CPR1000, APR1400 gibi III. nesil reaktörlerin yatırım maliyetleri 1750-2500 \$/KW arasında değişmektedir. Nükleer santralin inşaatındaki gecikmeler, lisanslama gecikmeleri veya başka nedenlerden ötürü santralin hizmete girmesinin ertelenmesi yatırım maliyetini yükseltecektir.⁶ Ayrıca, eğer santral dış borçlanma ile finanse edilmişse, devalüasyona bağlı olarak da sermaye maliyetleri artabilir.⁷

Yatırım maliyetleri içerisinde yer alan başlıca yenileme maliyeti, belli bir zamanda nükleer santrallerde üretim stratejisine bağlı veya zorunlu olarak yapılabilir. Yeni nesil reaktörlerin ömrünün 50-60 yıl kadar olduğu düşünüldüğünde santralin ömrü boyunca herhangi bir yenileme maliyetiyle karşılaşması olasıdır. Yenileme maliyetleri nükleer santrallerde çoğu zaman yeni teknoloji ve performansı yükseltici bir unsura bağlı olan, santralin verimliliğini arttıracak bir durumdan kaynaklanmaktadır. Ortalama olarak 35. yılında değişen buhar türbini buna örnek olarak gösterilebilir.

Yatırım maliyetini oluşturan bir başka bileşen nükleer santralin söküm maliyetidir. Eğer santral faaliyete girmeden önce sökümün finansmanı planlanmışsa, söküm maliyeti yatırım maliyeti içinde yer alır. Santralin işletme ömrü boyunca fon oluşturularak karşılanan söküm maliyeti ise işletme ve bakım maliyetleri içerisinde yer almaktadır. ABD'de nükleer santrallerin sökümü bu duruma belirgin bir örnek teşkil etmektedir. ABD'de nükleer santral işletmecileri, söküm masraflarının karşılanması için elektrik tüketicilerinden KWsa başına 0,1 c\$ tahsil etmektedir.⁸ Tüketicilere neredeyse yansımayan bu bedel, santralin uzun ömrü sonunda birikerek yüksek bir mali kaynak haline gelmektedir. Santrallerin söküm maliyetleri; nükleer santraller ömrünü doldurduğunda tamamen devreden çıkarılması, radyoaktivitenin

⁵ A.e. s.59.

⁶ Erkan Erdoğan, "Nuclear power in open energy markets: A case study of Turkey", **Energy Policy**, Elsevier, 2007, s.4.

⁷ A.e.

⁸ US Nuclear Regulatory Commission, "Status of the Decommissioning Program" (Çevrimiçi); <http://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/decommissioning> 13 Nisan 2010.

temizlenmesi ve son olarak yıkımıyla şekillenmektedir. Nükleer santrallerde söküm maliyetinin, diğer enerji santrallerine göre en önemli farkı; yıkım sırasında muhtemel radyoaktif sızıntı tehlikesine karşı alınacak ek güvenlik önlemleridir. Ancak probleme neden olan yüksek radyoaktifiteyi kısım sadece reaktörün kalbinin belli bölümlerinde bulunmaktadır ve bununla beraber; santraldeki metal maddeler geri dönüşümde de kullanılabilir. ⁹ Nükleer santrallerin devreden çıkartılarak sökülmesi için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. İşletme ömrü dolan santrallerde sökme işlemi hemen başlayabilir, çevresi kuşatılarak uzun süre sonra içerdiği radyoaktiviteyi kaybedince söküme başlanabilir veya çevresi iyice daraltılıp küçük bir kısmı bırakılır ve hiç sökülmez. Söküm maliyetlerinin yaklaşık değerleri, PWR tipi bir reaktör için 200-500 \$/KW, BWR'ler için 300-550 \$/KW ve CANDU içine 270-435 \$/KW olarak öngörülmektedir. ¹⁰ Nükleer santralin söküm maliyetini; reaktörün tipi, ölçüsü, ünite sayısı ve söküm stratejisi belirlemektedir. Çoğu ülkede, söküm maliyetlerinin karşılanmasından santral işletmesi veya kurucusu sorumludur. Nükleer santrallerde söküm maliyetlerine ilişkin asıl zorluklar, nükleer santralin işletme ömründen önce devreden çıkarılması gerektiği durumlarda oluşmaktadır.

3.1.2. Değişken Maliyetler

Değişken maliyetler nükleer enerji santrallerinin işletme ömrü boyunca sürekli karşılaşılan, zamana bağlı olarak ekonomik yapıdan ve bulunduğu bölgenin şartlarından etkilenecek değişim gösterebilen maliyetlerdir. Santralin işletilmesine ilişkin masraflar ve enerji üretimi için yakıt gereksinimleri değişken maliyetleri oluşturmaktadır.

⁹ WNA, "Decommissioning Nuclear Facilities 2010", (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf19.html>, 13 Nisan 2010.

¹⁰ OECD Nuclear Energy Agency, **Decommissioning Nuclear Power Plants: Strategies and Costs**, OECD Publishing, Paris, 2003, ss.60-61.

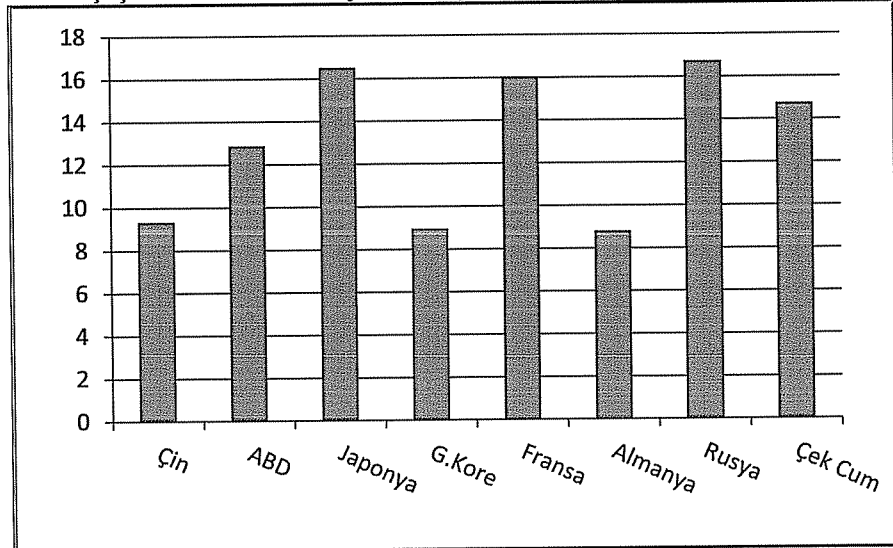
3.1.2.1. İşletme ve Bakım Maliyetleri

Bir nükleer santralde temel işletme ve bakım maliyetleri aşağıdaki harcamalardan oluşmaktadır:¹¹

- Mühendislik ve personel ücretleri,
- Bakım-Onarım-Yenileme,
- Tesisin atık yönetimi,
- Tesisin fiziksel koruması ve güvenliği,
- Sigorta primleri,
- Tesisin diğer işletme harcamaları.

Nükleer santrallerde yatırım harcamaları ve yakıt masrafları dışında kalan diğer bütün maliyetlerin, işletme ve bakım maliyetlerine dahil olduğu düşünülebilir. Aşağıda grafikte bazı ülkelerin MWsa başına bakım ve işletme maliyetleri verilmiştir.

Grafik 3.1. Çeşitli Ülkelerde 2010 yılı itibariyle İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$/MWsa)



Kaynak: OECD, Projected Costs of Generating Electricity

¹¹ OECD, Nuclear Energy Today, s.60

Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi MWsa başına düşen en düşük işletme ve bakım maliyeti 9\$ ile G. Kore ve Almanya'dadır. En yüksek işletme ve bakım maliyeti ise yaklaşık 16\$ ile Rusya ve Japonya'dadır. Ülkeler arası değişimi gözlenen bakım ve onarım maliyetleri; söz konusu ülkede istihdam, ücretler, üretim gibi ekonomik unsurlara bağlı olduğu kadar; iklim koşulları, deprem kuşağı ve bölgenin güvenliği gibi coğrafi konumu ile de ilgilidir.

İşletme ve bakım maliyetlerine konu olan yenileme maliyetleri, sabit maliyetler altında alınan başlıca yenileme maliyetinden farklıdır. Buna göre ana yenilemede, santralin herhangi bir biriminde yapılacak değişim veya eklenti önceden bilinmektedir; dolayısıyla sabit bir maliyettir. Ancak işletme ve bakım maliyetleri içerisinde yer almakta olan yenilemeye ilişkin maliyetler, beklenmeyen durumdan ötürü veya planlanmamış harcamaları kapsar.

Nükleer santraller işletme ve bakım maliyetlerini azaltarak, elektrik üretim maliyetlerini düşürebilmektedirler.¹² Günümüzde faaliyette olan nükleer santrallerde özellikle son yıllarda işletme ve bakım maliyetlerinde düşüşler görülmektedir. Buna karşılık nükleer santrallerin yaşı arttıkça işletme ve bakım maliyetleri de artmaktadır.

3.1.2.2. Yakıt Maliyetleri

Nükleer santrallerde yıllık yakıt harcamaları yakıt maliyetlerini oluşturur. Yakıt maliyetleri nükleer santrallerde toplam elektrik üretim maliyetinin yaklaşık %20'lik kısmını oluşturmaktadır.¹³ Yakıt maliyetlerini aşağıdaki harcamalar belirlemektedir:¹⁴

- Uranyum alımı
- Uranyum dönüştürme
- Uranyum zenginleştirme
- Yakıt fabrikasyonu
- Kullanılmış yakıtı yeniden işleme (Eğer reaktör kullanabiliyorsa)

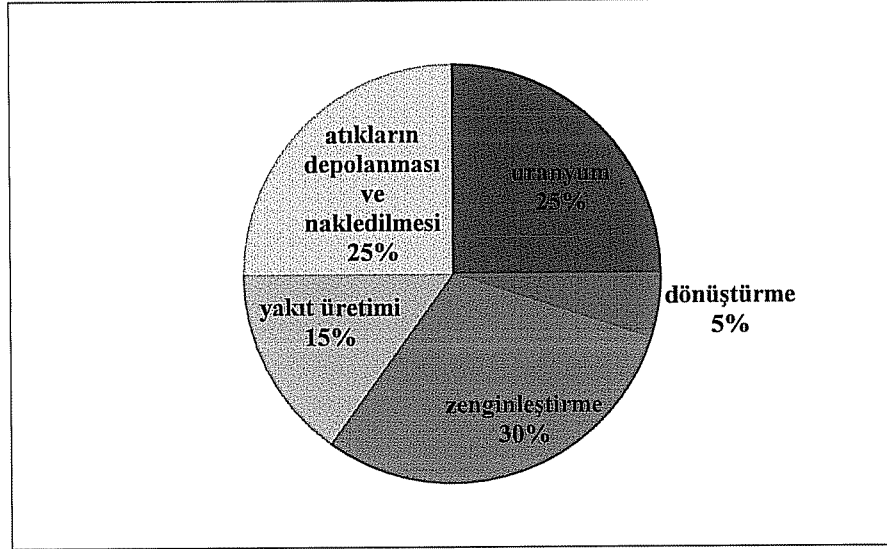
¹² OECD, NEA, *Trends in Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects*, OECD Publishing, Paris, 2001, s.22.

¹³ A.e., s.24.

¹⁴ OECD, NEA, *Nuclear Energy Today*, s.61.

- Atıkların depolanması ve nakledilmesi

Grafik 3.2. Nükleer Santrallerde Yakıt Maliyetinin Kendi İçerisinde Dağılımı



Kaynak: NEA, Trends in Nuclear Fuel Cycle

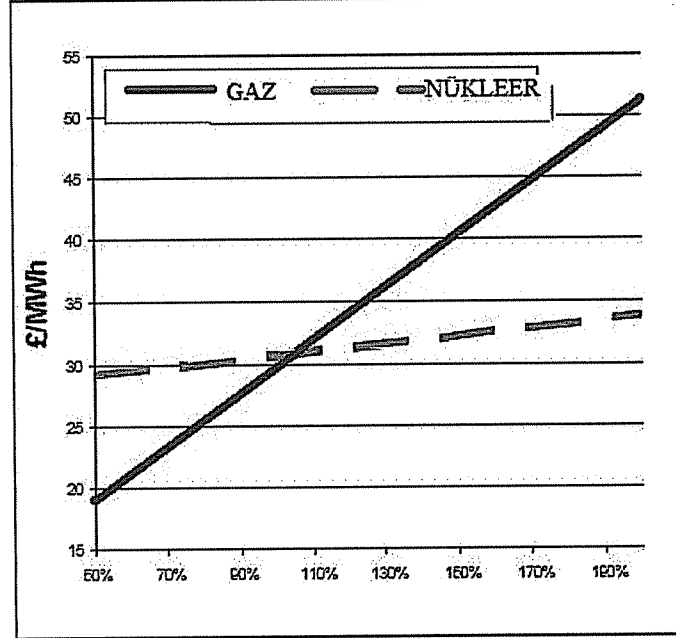
İlk bakışta yakıt maliyetlerinin oluşumunda uranyum fiyatlarının önemli bir belirleyici olduğu düşünülebilir. Ancak uranyum fiyatları, toplam yakıt maliyetlerinin belirlenmesinde yaklaşık %5'lik bir paya sahiptir.¹⁵ Yakıt maliyetleri içinde atıkların depolanması ve zenginleştirme süreçlerinin de payının büyük olmasından dolayı, uranyum fiyatı yakıt maliyetini tek başına belirlemekte kısıtlı kalmaktadır. Bu nedenle elektrik üretimindeki toplam maliyet, uranyum fiyatlarındaki şoklara karşı oldukça dirençlidir.¹⁶ Başka bir deyişle KWsa başına elektrik üretim maliyetlerinin, uranyumdaki fiyat artışlarına karşı duyarlılığı oldukça düşüktür. Aşağıdaki grafikte nükleer ve doğal gaz santrallerinin yakıt fiyatlarındaki değişimlerine karşı duyarlılığı verilmiştir.¹⁷

¹⁵ WNA, "The New Economics Of Nuclear Power" s.17 (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/reference/pdf/economics.pdf>, 18 Nisan 2010.

¹⁶ OECD NEA, **Risks and Benefits of Nuclear Energy**, OECD Publishing, 2007, s.40.

¹⁷ UK Energy Research Centre, "A Review of Electricity Unit Cost Estimates", (Çevrimiçi); http://www.ukerc.ac.uk/Downloads/PDF/07/0706_TPA_A_Review_of_Electricity.pdf, 18 Nisan 2010.

Grafik 3.3. Nükleer ve Doğal Gaz Santrallerinin Yakıt Fiyatlarındaki Değişime Duyarlılığı



Kaynak: UK Energy Research Centre, A Review of Electricity Unit Cost Estimates

Nükleer santrallerde elektrik üretim maliyetlerinin, yakıt maliyetlerine karşı duyarlılığının düşük olması, teorik olarak uzun vadede elektrik fiyatlarının istikrar kazanmasında ve tüketicilere yansımada etkili olacaktır.¹⁸

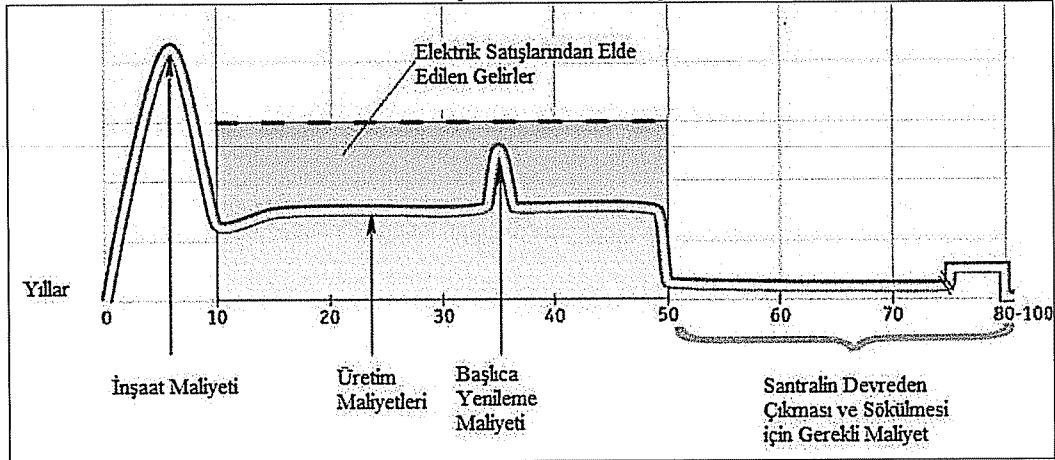
Yakıt maliyetleri santralin üretim stratejisi ve reaktörün teknolojisine bağlı olarak yakıt çevrim maliyetlerinden de etkilenmektedir. Nükleer santralde gerçekleşen açık ya da kapalı yakıt çevrimlerinin maliyetleri farklı olmaktadır. Kapalı yakıt çevrim için, ihtiyaç duyulan yeniden işleme tesislerinin ileri teknoloji içerdiği ve bu tesise sahip nükleer santrallerde yakıt maliyetlerinin daha çok olduğu açıktır. Kapalı çevrim sayesinde elde edilen yeni yakıtların içerdiği plütonyuma bağlı olarak, reaktörlerde ne kadar verimli kullanıldığı o santralin yakıt maliyetine etki etmektedir. Ayrıca yeniden işlenmiş yakıtların atık hacminin küçüleceği, dolayısıyla atık depolanması ve nakledilmesi aşamalarında maliyetleri düşürücü etkiye sahip olduğu bilinmektedir.[Bkz bölüm 2.4.].

¹⁸ Ferdinand E. Banks, *The Political Economy of World Energy: An Introductory Textbook*, 2.Cilt, Singapore, World Scientific, 2007, s.266.

3.1.3. Nükleer Enerji Santrallerinde Elektrik Üretim Maliyetleri ve Diğer Enerji Santralleri ile Karşılaştırılması

Nükleer santraller karakteristik özellikleri bakımından; yüksek yatırım bedeli olan, düşük üretim maliyetine sahip, yakıt fiyatlarındaki değişimlerden etkilenmeyen ve ekonomik ömrü uzun olan enerji üretim santralleridir. II. nesil reaktörlerin ekonomik ömürleri yaklaşık 40 yıl kadar olurken, 1990'lerden itibaren konuşlandırılan yeni nesil reaktörlerde bu süre 60 yıl olarak öngörülmektedir. Santrallerin işletme ömründe %50'ye ulaşan bu artış, üretim maliyetlerindeki istikrarla birlikte gelecekte yeni santral kurulumunu tetikleyebilecek bir unsur olmaktadır.

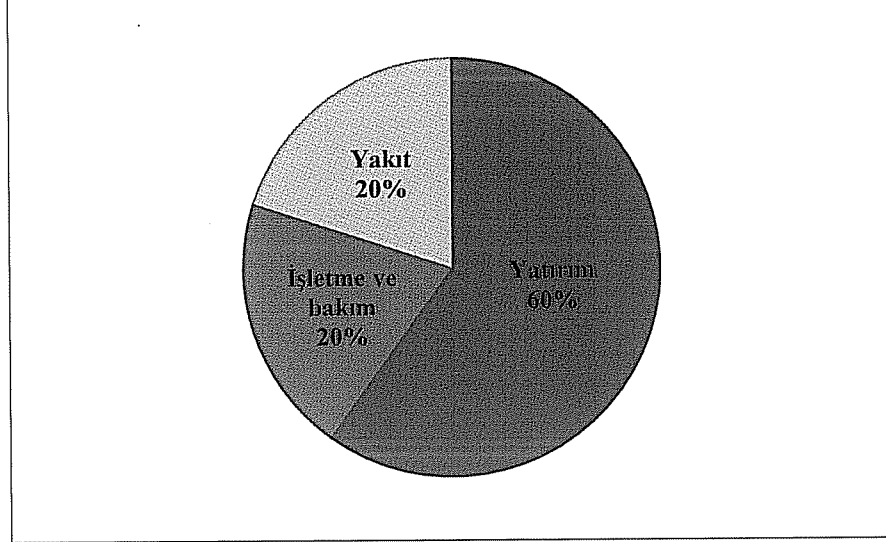
Grafik 3.4. Bir Nükleer Santralde İşletme Ömrü Boyunca Gerçekleşen Nakit Akışı



Kaynak: OECD, Nuclear Energy Today

Günümüzde kullanılmakta olan nükleer santrallerde elektrik üretim maliyetlerinin %60'ını yatırım, %20'sini yakıt ve kalan %20'sini ise işletme ve bakım maliyetleri oluşturmaktadır.

Grafik 3.5. Nükleer Santrallerde Maliyetlerin Toplam Üretimdeki Pay Dağılımı (%)



Kaynak: OECD, Trends in Nuclear Fuel Cycle

Nükleer santrallerde elektrik üretim maliyeti ölçütü KWsa veya MWsa başına düşen harcamalarla ifade edilmektedir. Enerji santrallerinde birim maliyeti hesaplamada ve üretim maliyetlerini karşılaştırmada yaygın yaklaşım olan düzleştirilmiş maliyet yöntemi "Levelised Cost" kullanılmaktadır. Bu yöntem ile maliyetlere ilişkin sayısal değerler aynı seviyeye getirilmekte ve santraller arası mukayese edilebilmektedir. Düzleştirilmiş maliyet yönteminde bir iskonto oranı ile zaman içindeki harcamaların bugüne indirgenmiş değeri hesaplanır. Seçilen iskonto oranı ülkeden ülkeye göre değişmekte, hatta aynı ülkede dahi farklı değerlerde olabilmektedir. Seçilen iskonto oranı, paranın zaman içindeki değeri hesaba katılarak sermaye getirisinde belirleyici olmaktadır. Teknolojik riskler ve enerji piyasalarındaki belirsizliklerden ötürü, düzleştirilmiş elektrik üretim maliyetleri ve yatırımcının katlandığı gerçek finansal maliyetler arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Bu nedenle devlet tekeline olan, devlet tarafından satın alma garantisi sunulan; yani düzenlenmiş elektrik piyasalarında düzleştirilmiş maliyet tahminleri gerçek yatırım maliyetlerine daha yakın olmaktadır.¹⁹ Enerji santralleri

¹⁹ OECD NEA IEA, Projected Cost of generating Electricity 2010 Edition, s.34.

için düzleştirilmiş maliyet yöntemi ile elektrik üretim maliyetleri şu şekilde formüle edilmektedir:²⁰

$$LEC = \frac{\sum[(I_t + M_t + F_t)(1 + r)^{-t}]}{\sum[E_t(1 + r)^{-t}]}$$

Burada;

- LEC; düzleştirilmiş elektrik üretim maliyeti KWsa
- I_t = t yılında gerçekleşen yatırım masrafları
- M_t = t yılında gerçekleşen işletme ve bakım masrafları
- F_t = t yılında gerçekleşen yakıt masrafları
- E_t = t yılında gerçekleşen elektrik üretimi
- r = iskonto oranını ifade etmektedir.

Bir santralin ekonomik ömrü boyunca gerçekleşen tüm harcamaların, toplam çıktıya oranı; bugünkü değeriyle düzleştirilmiş elektrik üretim maliyeti ile açıklanmaktadır.

Çeşitli kuruluşlar yaptıkları elektrik üretim maliyet tahminlerinde, bir iskonto oranı ile sermaye maliyeti belirlemek durumundadır. Yüksek yatırım bedeli olan santrallerin üretim maliyet tahminlerinde, iskonto oranı ve sermaye maliyeti ne kadar yüksekse, birim elektrik üretim maliyeti de o denli yüksek çıkmaktadır. Tahminlerin hemen hepsinde nükleer santrallerin fosil yakıtlı santraller ve yenilenebilir santraller ile rekabet edebilir olduğu ortaya çıkmaktadır. Enerji santrallerinde maliyetler, tek ülkede veya birden fazla ülke için aynı anda ele alınarak tahmin edilebilir. Farklı tipte enerji santrallerinin maliyet tahminleri, söz konusu projeksiyonun kullandığı varsayımlara göre geniş aralıklarda yer almaktadır. Ancak projeksiyonların tümü temelde bazı ana varsayımlar içermektedir. Bu varsayımlar şunlardır:

- Enerji santrallerinin üretim teknolojileri için gerçekleştirdikleri ve gerçekleştirmeye devam ettikleri araştırma-geliştirme harcamaları maliyetlere katılmamıştır.

²⁰ A.e.

- Santrallerin yarattığı çevresel tahribat ve insan sağlığı üzerindeki kalıcı etkileri ele alınmamıştır.
- Elektrik iletim ve dağıtım hatlarının mevcut durumları dikkate alınmamıştır.
- Nükleer santral kurulumunun sağlayacağı dışsal faydalar içselleştirilerek maliyetlerden düşürülmemiştir.

OECD-NEA ve IEA (2010) ;

IAEA ve OECD NEA ajansı tarafından 2010 yılında yapılan, çeşitli enerji santrallerinden elektrik üretim maliyetleri projeksiyonunda (*The Projected Cost of Generating Electricity*) 190 enerji santrali gözlemlenmiştir. Projeksiyonda kullanılan varsayımlar ve %5, %10 iskonto oranları ile maliyetler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.²¹

OECD-NEA ve IEA tarafından gerçekleşen önemli varsayımlar;

- İskonto oranı %5 ve %10 olarak alınmaktadır ve projenin ekonomik ömrü boyunca değişmez.
- Her bir santral için beklenen ekonomik ömürler; hidroelektrik için 80, nükleer için 60, kömür 40, doğal gaz 30, rüzgar ve güneş için 25 yıl olarak alınmıştır.
- Santrallerin tamamlanma süreleri; nükleer için 7, kömür için 4, doğal gaz için 2, güneş ve rüzgar enerji santralleri için ise 1 yıldır.
- Nükleer, doğal gaz ve kömür santralleri için yükleme faktörü %85; yenilenebilir enerji kaynakları için ise, bulundukları ülke konumuna göre seçilmiştir.

²¹ OECD NEA, IEA, *Projected Cost of generating Electricity 2010 Edition*, s.s. 59-62.

Tablo 3.1. Çeşitli Enerji Santrallerinde %5 ve %10 İskonto Oranı ile Üretim Maliyetlerinin Karşılaştırılması(2010)

Santral Tipi	%5 ile Toplam Maliyet (\$/MWsa)	%10 ile Toplam Maliyet (\$/MWsa)
Kömür	76,88	102,20
Doğal Gaz	53,81	92,26
Hidroelektrik	75,57	139,94
Nükleer	52,37	83,92
Solar PV	316,73	473,73
Rüzgar**	110,39	157,45

*Her bir enerji santrali için, tüm ülkelerde bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

**Kara ve denizde rüzgar santralleri birlikte yer almıştır.

Kaynak:IAEA, OECD NEA, (The Projected Cost of Generating Electricity verilerinden düzenlenmiştir.)

Özetlenen tabloda nükleer santrallerin %5 ve %10 iskonto oranında üretim maliyetlerinin, diğer enerji santrallerinden daha düşük olduğu görülmektedir. NEA ve IEA nükleer santrallerin diğer tüm santraller ile ekonomik yönden rekabet edebileceği, özellikle gelecekte fosil yakıtlı santrallerin yarattığı karbon emisyonlarının fiyatlandırılması durumunda belirgin şekilde avantajlı konumda olabileceği saptanmıştır. Uzun vadede, fosil yakıt kullanan santraller için, yakıt fiyatlarının beklenen artışına karşın, nükleer santrallerde üretim maliyetindeki istikrarlı yapısı MWsa başına üretim maliyetini düşük seviyede tutmaya devam edecektir. Fosil yakıtlı santrallerin, yenilenebilir enerji santrallerine karşı maliyet bakımından üstün olduğu sonucu da göze çarpmaktadır.

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (2009) ;

2003 yılındaki nükleer santrallerde maliyetlere ilişkin geniş çaplı çalışmasını (*The Future of Nuclear Power*) 2009 yılında güncelleyen Massachusetts Teknoloji Enstitüsü; ABD’de kömür, doğal gaz ve nükleer enerji santrallerinin ekonomik yönden rekabetini; düzleştirilmiş maliyet yöntemini temel alarak karşılaştırmıştır. Çalışmanın içerdiği önemli varsayımlar şu şekildedir:²²

- Doğal gaz, kömür ve nükleer santrallerin her biri için kapasite faktörü %85, ekonomik ömürleri ise 40 yıldır.

²² Massachusetts Institute of Technology, “Future of Nuclear Power: Update of the MIT 2003” (Çevrimiçi); <http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-update2009.pdf> s.6., 3 Mayıs 2010.

- Santrallerin inşaat tamamlama süreleri; nükleer için 5 yıl, kömür için 4 yıl ve doğal gaz için 2 yıl olarak seçilmiştir.
- Santral gelirlerinden alınan vergi oranı %37, enflasyon oranı ise %3 olarak seçilmiştir.
- Kömür ve gaz santrallerinin finansmanı %60 borçlanma ile sağlanmış olup sermaye maliyetlerinde borçlanma için %8, öz sermaye içinse %15'lik oranlar uygulanmıştır.

Çalışmada elde edilen üretim maliyetleri şu şekildedir:²³

Tablo 3.2. Nükleer Santrallerin Üretim Maliyetlerinin Kömür ve Gaz Santralleri ile Karşılaştırılması (2009)

Enerji Santral Tipi	Gecelik Sermaye Maliyeti (\$/KW)	Yakıt maliyeti (\$/BTU)	Elektrik Üretim Maliyeti (c\$/KWsa)	Karbon Emisyon Ücretleriyle Üretim maliyeti (c\$/KWsa)	Tüm Santrallerde Aynı Sermaye Maliyeti ile Üretim Maliyeti (c\$/KWsa)
Nükleer	4000	0,67	8,4	8,4	6,6
Kömür	2300	2,60	6,2	8,3	8,3
Gaz	850	7,00	6,5	7,4	7,4

Kaynak: MIT, Future of Nuclear Power

Karbon emisyon maliyetleri olmadan ve çalışmanın santrallere özgü seçtiği gecelik sermaye maliyetleriyle, nükleer santrallerin elektrik üretim maliyeti kömür ve gaza göre daha yüksektir. Ancak hükümet tarafından karbon emisyonları ücretlendirildiğinde, nükleer santrallerin aradaki farkı kapatacağı görülmektedir. Santral finansmanı üç santral için de aynı borçlanma oranı ve aynı oranda borçlanma maliyetleri ile yeniden hesaplandığında, nükleer santrallerin üretim maliyetleri santrallerin içinde en düşük değerlere sahip olmaktadır. MIT dünyada yaşanan mevcut ekonomik darboğaza bağlı olarak nükleer santrallerin inşaat maliyetlerinin 2003 yılına oranla %15 arttığını belirtmiştir.²⁴ Aynı şekilde gaz ve kömür santrallerinde de ekonomik şartlara bağlı olarak artış gösterdiği, ancak nükleer

²³ A.e. s.7.

²⁴ Massachusetts Institute of Technology, "Future of Nuclear Power" (Çevrimiçi); <http://web.mit.edu/nuclearpower/>, 3 Mayıs 2010.

santrallerin sermaye yoğun yapısı nedeniyle bu durumdan daha çok etkilendiği çalışmada gözlemlenmiştir.²⁵

Lappeenranta Teknoloji Üniversitesi (2008);

Çeşitli enerji santrallerinden elektrik üretim maliyetlerinin rekabetini açıklamaya çalışan başka bir projeksiyon 2008'de Finlandiya'da Lappeenranta Teknoloji Üniversitesi tarafından gerçekleştirilmiştir. (Comparision of Electriciy Generation Costs). Nükleer, kömür, turba kömürü,* doğal gaz ve rüzgar enerjisi ile elektrik üretim maliyetleri, karbon emisyonlarının ücretlendirildiği durumda da hesaplanarak düzleştirilmiş maliyet yöntemi ile tahmin edilmiştir. Projeksiyonda kullanılan önemli varsayımlar ve tahmin edilen maliyetler aşağıda yer almaktadır:²⁶

- Kapasite faktörleri; nükleer, gaz, kömür santralleri için %91,3 ve rüzgar santralleri için %25,1 olarak seçilmiştir.
- Santrallerin ekonomik ömürleri; nükleer santraller için 40, diğer santraller için 25 yıl olarak öngörülmüştür.
- Santrallerin finansmanının tamamı borçlanma ile gerçekleşmiş ve %5 iskonto oranı uygulanmıştır.
- İnşaat süresi nükleer santraller için 6 yıl, diğer santraller için daha az sürede tamamlanmaktadır.

²⁵ A.e.

* Turba kömürü karbon oranı linyit ve taş kömüründen daha düşük olan, nispeten daha düşük kalitede bir kömürdür, Finlandiya geniş turba kömürü yataklarına sahiptir.

²⁶ Lappeenranta University of Technology, "Comparision of Electriciy generation Costs", (Çevrimiçi); <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/39685/isbn9789522145888.pdf> 4 Mayıs 2010.

Tablo 3.3.: Nükleer Santrallerin Üretim Maliyetlerinin Diğer Enerji Santralleri ile Karşılaştırılması (2008)

<i>Enerji Santrali Tipi</i>	<i>Sermaye Maliyeti (€/MWsa)</i>	<i>İşletme ve Bakım Maliyeti (€/MWsa)</i>	<i>Yakıt Maliyeti (€/MWsa)</i>	<i>Toplam Maliyet (€/MWsa)</i>	<i>23€/ton CO₂ Karbon Emisyon ücretleriyle Toplam Üretim Maliyeti (€/MWsa)</i>
Nükleer	20,0	10,0	5,0	35,0	35,0
Gaz	6,2	5,0	40	51,2	59,2
Kömür	11,5	8,0	26,2	45,7	64,4
Turba Kömürü	13,3	8,0	22,3	43,6	65,5
Rüzgar	41,9	11,0	0	52,9	53,9

Kaynak: Lappeenranta University of Technology

Maliyet tahminlerine göre, nükleer enerji ile üretim 35 €/KWsa ile çeşitli üretim seçenekleri arasında en düşük maliyetli olanıdır. Karbon emisyonları hükümet tarafından ücretlendirildiği varsayıldığında, nükleer enerji ile üretim seçeneği maliyet yönünden çok daha avantajlı durumda olmaktadır.

Kraliyet Mühendislik Akademisi (2004);

Çeşitli santrallerden birim elektrik üretim maliyetlerine ilişkin başka bir projeksiyon 2004 yılında, Kraliyet Teknoloji Akademisi tarafından gerçekleştirilmiştir. Düzleştirilmiş maliyet yönteminde kullanılan varsayımlar ile elde edilen tahminler şu şekildedir:²⁷

- İskonto oranı %7,5 olarak uygulanmıştır.
- Santrallerin ekonomik ömürleri; nükleer santraller için 40, diğer santraller için 25 yıl olarak öngörülmüştür.
- Kapasite faktörleri; nükleer, gaz, kömür için %90 ve rüzgar santralleri için %35 olarak seçilmiştir.
- Nükleer, kömür ve gaz santralleri için sermaye maliyetleri sırasıyla; 1150, 730 ve 300 £/KWsa olarak seçilmiştir.

²⁷ Royal Academy of Engineering, "The Cost of Generating Electricity". (Çevrimiçi); http://www.raeng.org.uk/news/publications/list/reports/Cost_of_Generating_Electricity.pdf 8 Mayıs 2010.

Tablo 3.4. Nükleer Santrallerinin Üretim Maliyetlerinin Kömür, Gaz ve Rüzgar santralleri ile karşılaştırılması (2004)

<i>Enerji Santrali Tipi</i>	Toplam Maliyet (c£/KWsa)
Nükleer	2,2
Gaz	2,3
Kömür	2,5-3,2
Rüzgar	3,7

Kaynak: Royal Academy of Engineering, The Cost of Generating Electricity

Kraliyet Mühendislik Akademisi'ne göre santrallerin üretim maliyetleri birbirine yakın değerlerdedir. Karbon emisyonları ücretlendirildiğinde kömür ve gaz santrallerinin birim maliyetleri artarak rekabet gücünü kaybedeceklerdir ve haliyle nükleer enerji santralleri en ucuz üretim seçeneği olacaktır.

Bir enerji santrali kurulumunda karar alma açısından en önemli belirleyici, ekonomik olma unsurudur. Nükleer santraller yüksek yatırım maliyetlerine rağmen, üretim maliyetlerini dengeleyebilmektedir. Bir enerji santralinin üretime başlaması ne kadar hızlı gerçekleşirse, sermaye maliyetleri o kadar azalacak ve birim maliyetlerin miktarı düşecektir. Günümüzde nükleer santrallerden elde edilen elektriğin maliyet açısından diğer enerji santrallerinden daha düşük veya en azından rekabet edebilir düzeyde olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca projeksiyonların hepsinde, fosil yakıtlı enerji santrallerinin karbon emisyonları hükümetlerce ücretlendirildiğinde üretim maliyetleri önemli ölçüde artmaktadır. Nükleer santraller ve yenilenebilir kaynaklardan oluşan santraller atmosfere zararlı gazlar salmadığından [Bkz 3.2.2.] böyle bir maliyet artışı bu santraller için söz konusu olmamaktadır. Fosil yakıtlı santraller, yakıt fiyatlarında yaşanacak olası şoklar sonrası yüksek üretim maliyetlerine katlanmak durumundadır. Nükleer santrallerde ise uranyumun fiyatlarındaki artış daha önce belirtildiği gibi, üretim maliyetlerine çok düşük oranlarda yansımaktadır. Bu sayede nükleer santrallerin üretim maliyetlerinde istikrar yakalanabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise üretim maliyetleri açısından nükleer enerji ve fosil yakıtlı santraller ile rekabet

edebilir düzeyde değildir. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları ile üretim maliyetleri zamanla azalmakta ve teknolojileri hızla ilerlemektedir.

3.2. NÜKLEER SANTRALLERDE DIŞSALLIKLAR

Enerji sektöründe dışsallık arz veya talep ile belirlenemeyen, enerji piyasasında fiyatlandırılmamış fayda veya maliyet etkilerinden oluşmaktadır. Dışsallıklar ancak ekonomik bir faaliyetle; üçüncü tarafların maruz kaldığı bir etkiyle, ortaya çıkmaktadır.²⁸

3.2.1. Santralde Hasara veya Radyoaktif Atıklara Bağlı Muhtemel Radyasyon Sızıntısı

Nükleer santraller yüksek güvenlik standartlarına rağmen reaktörde oluşması muhtemel bir hasara bağlı tehlike arz etmektedir. Olası hasarın gerçekleşmesine neden olan, bir şekilde nükleer santralin veya reaktör ünitelerinin bütünlüğünü bozacak durumlar; reaktörün rutin işletimi sırasındaki kazalar, doğal afetler, sabotaj ve terör saldırıları gibi durumlardan kaynaklanabilir. Nükleer santrallerde oluşabilecek hasarlardan kaynaklanan radyoaktif sızıntı şu sonuçlara yol açar:²⁹

- Radyasyona bağlı sağlık etkileri,
- Psikolojik etkiler,
- Bölgenin tahliyesi,
- Ekonomik kayıplar,
- Ekolojik bozulma.

Nükleer santrallerde radyasyondan kaynaklanan olası tahribatlar reaktörden ilişkisiz olup kullanılmış yakıtlardan da kaynaklanabilmektedir. Tükenmiş yakıtların yüksek radyoaktivitesi bir şekilde hava, su veya toprağa karıştığında ağır çevresel tahribatlar meydana gelebilir. Radyoaktif atıklar kanserojen ve yüksek dozlarda

²⁸ OECD NEA, "Nuclear Electricity Generation:What are the External Costs", (Çevrimiçi); <http://www.nea.fr/ndd/reports/2003/nea4372-generation.pdf> 11 Mayıs 2010.

²⁹ Fizik Mühendisleri Odası, **Nükleer Enerji Raporu 2006**, TMMOB, Ankara, 2006, s.120.

öldürücü nitelikte olduklarından özel yöntemler kullanılarak bertaraf edilmelidir.³⁰ Nükleer santrallerde atık yönetiminin hedefi, düşük-orta ve yüksek seviyeli atıkların tehlike arz etmeyecek şekilde tecrit edilmesidir. Radyoaktif atıkların nihai depolama öncesinde, çevresel temasının engellenmesi için detaylı işlemler gerçekleştirilmektedir. Atıklar öncelikle ara depolama tesislerinde bekletilerek ısınma miktarları azaltılmaktadır. Özellikle yüksek seviyeli atıklar sıvı şeklindedir ve bu sıvı atıkların katı hale dönüştürülmesine ‘‘camlaştırma’’ işlemi denir. Camlaştırılan yüksek seviyeli atıklar beton ve çelikten oluşan yapıların içine hapsedilerek kalıcı, sağlam ve uzun süreli bir şekilde yer altındaki sığınaklarda muhafaza edilmektedir.³¹

Nükleer santraller, radyoaktif atıkları ve kaza durumunda oluşacak radyasyon sızıntısını engelleyecek katı tedbirlerle faaliyet göstermektedir. Nükleer santrallerin güvenlik tasarımında dışarıya radyoaktivite sızması için en kötü senaryolar üzerinde durulmaktadır. Bu tip bir durumun engellenmesi için santrallerde yer alan bazı donanımlar ve önlemler şu şekildedir:³²

- Paslanmaz çelik ve zirkonyum alaşımlı çelik yakıt zarfları,
- En az 25 cm kalınlıkta olan yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı basınç kabı,
- Reaktör binasının tümünü kapsayan en az 2 cm kalınlığında çelik zırh,
- 2-5 metre arasında değişen beton-çelik yapıdan oluşan koruma kabuğu.

En ağır şekilde uyarlanmış kazalarda bile, nükleer santral yakınında yaşayan bir kişinin, tehlikeli doz almayacağı yasak bölge sınırı yaklaşık 1 km² civarındadır.³³

Nükleer santrallerde alınan bu önlemler yüksek maliyetler içermektedir. Gerek atıklara, gerek reaktörden oluşacak radyoaktif sızıntılara karşı alınan yüksek maliyetli güvenlik tedbirleri, nükleer santrallerin sabit ve değişken maliyetleri içerisinde içselleştirilmiştir. Yatırım maliyetlerinin altında; koruma binası, pasif

³⁰ Arzu Çiçek, *Çevre Sağlığı*, Ed:Arzu Çiçek, Eskişehir, 1. Baskı, Anadolu Üniversitesi, 2006 s.209.

³¹ James Doyle, *Nuclear Safeguards, Security and Nonproliferation: Achieving Security With Technology and policy*, Burlington, Elsevier, 2008, s.390.

³² Osman K. Kadiroğlu, ‘‘Türkiye’ye Nükleer Enerji Girmelidir’’, (Çevrimiçi); <http://www.tisk.org.tr>, 13 Mayıs 2010.

³³ A.e.

durdurma sistemi, deprem dayanıklılığı, otomatik yangın söndürme sistemi, soğutma sistemi gibi tedbirler riskleri en aza indirmek üzere III. nesil santral teknolojilerinde mevcuttur. İşletme ve bakım maliyetleri ile yakıt maliyetleri ise, yine atık sızıntı riskini minimum düzeyde tutmak için gerekli ek maliyetleri kapsamaktadır. Çok düşük olasılığa sahip olsa da, ağır kazalara bağlı hasardan santral işletmesi sorumlu tutulmakta ve oluşacak dışsal maliyetlere yatırımcı katlanmaktadır.

3.2.2. Nükleer Silahlanma Potansiyeli

Nükleer santrallerin yaygınlaşması, dolaylı yoldan nükleer silahların üretimine zemin hazırlayabilecek bir unsurdur. Nükleer patlayıcılar, nükleer reaksiyon ve fizyonu birlikte kullanarak yüksek tahribat gücüne sahiptir. Dünyadaki bu potansiyel tehlike nükleer enerjinin sivil kullanımını ve yaygınlaşmasını da engelleyecek bir nitelik taşımaktadır. Nükleer silahların yapımı genellikle zenginleştirilmiş uranyum ve plütonyuma veya her ikisinin birlikte kullanımına bağlı olmaktadır. Nükleer silahlar için gerekli olan maddeler yakıt zenginleştirme aşamasında ya da kullanılmış yakıttan plütonyumun ayrıştırılması sırasında elde edilebilmektedir. Nükleer reaktörlerde kullanılan uranyum en fazla %20 oranına kadar zenginleştirilirken, tipik bir nükleer başlıktaki uranyumun %80-90 oranına kadar zenginleştirilmesi gerekmektedir.³⁴ Günümüzde nükleer silahlanmayı engellemeye yönelik anlaşmalar ve bunun için faaliyet gösteren kuruluşlar mevcuttur. Bunlar arasında IAEA önemli ve etkin bir konumdadır. Uranyum zenginleştirme tesislerindeki sıkı denetimler, nükleer silahların yarattığı potansiyel tehlikeyi yok edememektedir. Yüksek oranda zenginleştirilmiş uranyum ve plütonyumun gizli tesislerde, araştırma reaktörlerinde, üretilmesi mümkün olduğu gibi; yasadışı örgütler tarafından ele geçirilmesi de nükleer güvenlik bakımından tehlike arz etmektedir. Nitekim Nisan 2010'da gerçekleşen; 47 ülke, AB, IAEA ve BM'nin katıldığı "Küresel Nükleer Güvenlik Zirvesi" toplantısının ana hedefi, nükleer terörizmi önlemek ve nükleer maddelerin çalınmasını engellemek olmuştur.

³⁴ Erwann O. Michel, Debra K. Decker, "The Economics of Nuclear Energy Markets and the Future of International Security" (Çevrimiçi); http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP2008-01-08,EMK,DD_ENEM.pdf 14 Mayıs 2010.

Zenginleştirilmiş uranyum ve plütonyumun sıkı fiziksel koruması da bu hedef kapsamında yer almaktadır.

Günümüzde nükleer silahlara sahip olduğu bilinen ve aynı zamanda bu silahları denemiş olan ülkeler; ABD, Rusya, İngiltere, Fransa, Çin, Hindistan, Pakistan ve Kuzey Kore'dir. Nükleer güvenlik konusu 1950'li yıllardan bu yana sürekli gündemde olsa da, nükleer silahlanma eğilimi bazı ülkelerde halen devam etmektedir. Sovyet Rusya ve ABD arasında soğuk savaş yıllarında oluşan nükleer silahlanma yarışı, Hindistan ve Pakistan'ın hızla yayılan nükleer silahlanma eğilimleri ve K. Kore'nin nükleer denemeleri birer örnektir. Nükleer silahların içerdiği maddelerin, ticari nükleer santrallerde üretimi mümkün olsa da; kuruluş amaçları enerji üretimi içindir ve bu nedenle kapatılmaları söz konusu değildir. Dünya elektriğinin %17'sini karşılayan nükleer santraller, bu santrallere yapılan yüksek bedelli yatırımlar ve uzun süreli projelerden vazgeçilmesi nükleer silahlanma konusunu yine durdurmayacaktır. Nükleer silahların yayılmasını engelleyecek yöntemler, nükleer santrallerin engellenmesinden ziyade küresel politik uygulamalara bağlı olup uluslararası işbirlikleriyle mümkündür.

3.3. NÜKLEER SANTRALLERİN ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bu bölümde çeşitli enerji santrallerinin çevre üzerindeki olumsuz etkileri nükleer santraller ile karşılaştırılacaktır. Nükleer enerjinin en çok tartışılan yönü olan çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri yine bu bölümde ele alınacaktır.

3.3.1. Nükleer Enerji ve Diğer Enerji Santrallerinin Çevre Üzerindeki Potansiyel Etkileri

Elektrik enerjisine olan talep sürekli artmakta ve üretimi için daha çeşitli kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji üretim santrallerin tamamı, doğrudan veya dolaylı olarak insan sağlığı ve çevre üzerinde tahribat yaratıcı etkilere sahiptir. Çevreye zararsız olarak gösterilen rüzgar ve güneş kaynaklı enerji üretim santralleri

bile geniş arazi kullanımı, gürültü kirliliği ve fabrikasyon sürecinde kirliliğe sebep olmaktadır. Güneş enerjisinde kullanılan fotovoltaik pillerin üretiminde oluşan kirlenici gaz emisyonları buna bir örnektir.

Enerji üretim santrallerinin yarattığı en ağır tahribat atmosfer üzerinde görülmektedir. Tatlı su kaynakları, denizler ve toprak üzerindeki kirlilik etkileri bunu takip etmektedir. Çevresel tahribatların boyutu enerji santralının yakıtlarına ve kaynaklarına göre farklılıklar göstermektedir. Enerji üretimiyle oluşan çevresel tahribatların boyutu, santrallerin kaynağına ve muhtemel kazalara göre; yerel, bölgesel ve küresel olarak ölçeklendirilmektedir.³⁵ Santrallerin tiplerine göre taşıdıkları potansiyel çevre etkileri ve riskleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.³⁶

Tablo 3.5. Enerji Santrallerinin Çevre Üzerinde Potansiyel Etkisi

Fosil Yakıtlar (Kömür, petrol, gaz)	• İklim Değişikliği • Göl, nehir ve denizlerin asitlenmesi ve ormanların hasar görmesi • Zehirli atıklardan kirlenme • Kıyı kirlenmesi • Yer altı sularının kirlenmesi • Arazinin bozulması • Büyük miktarda yakıt taşıma gereksinimi
Hidroelektrik Santraller	• Nüfusun yer değiştirmesi • Toprak kaybı ve kullanımında değişiklik • Ekolojik değişiklikler ve sağlık etkileri • Canlı çeşitliliğinin kaybolması • Barajda yıkılma riski
Yenilenebilir Enerji Santralleri (Güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle)	• Hava kalitesinin bozulması • Yüksek miktarda arazi kullanımı • Ekosistem değişiklikleri • Fabrikasyona bağlı kirlenme • Gürültü kirliliği • Hayvan türlerinin ölümü
Nükleer santraller	• Kaza riskine bağlı radyoaktivite salınımı • Atık depolamadan kaynaklanan radyasyon • Söküm sırasında belirebilecek çevre riskleri • Uranyum madenciliğinin çevre etkileri

Kaynak: Fizik Mühendisleri Odası, Nükleer Enerji Raporu 2006

Yerel ve bölgesel olarak fosil yakıtlı termik santraller başta hava kirliliğine sebep olmaktadır. Kömür, petrol ve gaz santrallerinin küresel ölçekte yarattığı en

³⁵ Michael B. McElroy, **The Atmospheric Environment: Effects of Human Activity**, New Jersey Princeton University Press, 2002, s.3.

³⁶ Fizik Mühendisleri Odası, **a.g.e.**, s.124.

önemli çevresel etki ise küresel ısınmaya sebep olmalarıdır. Fosil yakıtlar yandığında ortaya çıkan gaz atıklar sera gazları olarak isimlendirilmektedir. Sera gazları dünyayı ısıtan güneş ışınlarının yeryüzünden geri yansımaları güçleştirir ve ısının atmosferde tutulmasını sağlayarak iklim değişikliğine yol açmaktadır.³⁷ Fosil yakıtlı santrallerin bacalarından çıkan kirletici gaz ve küller zamanla suların üzerine çökerek; su kaynaklarının doğal dengesinin bozulması, kalitesinin düşmesi, su canlılarının ölümlerine yol açmaktadırlar. Kömür santrallerinin yol açtığı başka bir çevresel tahribat da asit yağmurlarıdır. Kömür santrallerinde yanma işlemiyle atmosfere karışan kükürt dioksit (SO₂) ve azot dioksit (NO₂) gazları, maruz kaldıkları yüksek ısı nedeniyle; zehirli etkilerini arttırarak asit yağmurlarına yol açmaktadır.³⁸

3.3.2. Sera Gazları Emisyonu ve Küresel Isınma Açısından Nükleer Santraller

Enerji santrallerinde küresel ısınmaya yol açan başlıca sera gazları “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçevesi” tarafından şöyle belirtilmiştir:³⁹

- CO₂ (karbondioksit),
- CH₄ (metan),
- N₂O (nitroz oksit),
- HFC (hidroflorokarbon),
- PFC (perflorokarbon)
- SF₆ (sülfür hekzaflorid)

Sera gazları, atmosfere bırakılan kül benzeri parçacıklar ve diğer kirleticiler, sadece enerji üretimi sırasında değil; enerji kaynağının madenciliği, enerji santrallerinin malzeme üretimi, santralin sökümü, hammaddenin yakıt haline getirilmesi gibi aşamalarda da ortaya çıkmaktadır. Böylelikle çevreye tamamen olumsuz yönde etkisi olmayan bir enerji kaynağından bahsetmek mümkün değildir.

³⁷ Spencer R. Weart, *The Discovery of Global Warming*, USA, Harvard University Press, 2008, ss. 7-8.

³⁸ Denise Walker, *Fuels and the Environment*, Ed: Katie Harker, London, Evans Brothers, 2007, s.32.

³⁹ OECD, *OECD Environmental Outlook*, OECD Publishing, Paris, 2008, s.158.

Enerji üretimine bağlı kirlenme; söz konusu enerji santralının yapımına başlanmasından, sökümü bitinceye kadar olan süreci kapsamaktadır. Buna göre, çeşitli enerji santrallerinin işletme ömrü boyunca yol açtığı bazı sera gazları salınımı aşağıdaki tabloda verilmiştir.⁴⁰

Tablo 3.6.: Çeşitli Enerji Santrallerinin İşletme Ömrü Boyunca Sera Gazları Emisyonu (2002)

Enerji Kaynağı	CO ₂ (g/KWsa)	SO ₂ (g/KWsa)	NO _x (g/KWsa)
Taş Kömürü	951	351	696
Linyit	1072	402	810
Doğal gaz (karbon tutuşlu)	410	125	351
Nükleer	20	73	48
Güneş (Fotovoltaik)	216	433	321
Rüzgar	41	68	49
Hidroelektrik	31	42	45

Kaynak: OECD, Nuclear Energy Agency

Nükleer santrallerde enerji üretimi sırasında yanma gerçekleşmediğinden, sera gazlarının salınımı da gerçekleşmez. Aynı durum yenilenebilir enerji kaynakları için de geçerlidir. Fosil yakıtlı enerji santralleri tabloda görüldüğü üzere atmosfere yüksek miktarda sera gazları bırakmaktadır. Nükleer enerji santralleri üretim zinciri bütünüyle ele alındığında, mevcut enerji seçenekleri içerisinde en temiz olanlardan biridir. Nükleer santraller, enerji üretimi esnasında kirlilik yaratıcı etkiler yaratmamaktadır. Sera gazları, hidrokarbonlar ve küller nükleer reaktörlerin güç üretiminde ortaya çıkmazlar. Küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açan sera gazlarının dünya üzerindeki miktarının azaltılmasını sağlamak, nükleer santraller ile mümkündür.

Sera gazlarının etkisiyle küresel ısınma olarak ortaya çıkan iklim değişikliği, dünya üzerinde felaketlere neden olacak etkilere sahiptir. Sel, fırtına, kasırga gibi meteorolojik olayların sıklaşması; kuraklık, tarım alanlarındaki kayıplar, kutup denizi buzullarının erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi bunlara örnek olarak

⁴⁰ OECD NEA, **Externalities and Energy Policy: The life Cycle Analysis Approach**, OECD Publishing, Paris, 2002, s.220.

gösterilebilir.⁴¹ Deniz seviyesinin yükselmesinin daha derin ve ciddi bir muhtemel sorunu, ada ülkelerinin ve ülkelerin kıyı hatlarının sular altında kalabilme ihtimalidir. Sera gazlarının yol açtığı bu tehditlere karşılık BM öncülüğünde “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi” (BMİDÇS) imzalanmıştır. BMİDÇS küresel ısınmaya karşı ilk uluslararası sözleşme niteliğindedir. Bu sözleşme 191 ülke tarafından imzalanmış, sera gazlarının küresel ısınmaya yol açtığı kabul edilmiş ve bu gazların azaltılması öngörülmüştür.

Dünyanın küresel ısınma karşısında daha sıkı tedbirlere gereksinimi olduğu ve ülkelerin daha somut yaptırımlara gitmesi gerektiği kararlaştırılarak, 1997 yılında BMİDÇS içerisinde “Kyoto Protokolü” imzalanmıştır. Kyoto Protokolü ancak Rusya’nın katılımıyla 2005 yılında yürürlüğe girebilmiştir. Bu gecikmenin nedeni, taraf ülkelerin gaz emisyonlarının, yeryüzündeki toplam emisyonların %55’i kadar olması gerekliliğidir.⁴² Protokole göre, sözleşmede yer alan bazı ülkelere sera gazlarını azaltma yükümlülükleri getirilmiştir. Yükümlülükler uymayan ülkelere ise sonraki dönemlerde daha ağır yükümlülükler verilmektedir. Kyoto protokolü beraberinde sera gazlarının salınımı azaltacak teşvikler de getirmiştir. Öngörülen miktarların üzerinde yakıt tüketen ve sera gazlarının emisyonlarına yol açan ülkelere ağır vergiler alınacak, miktarın altında kalan ülkelere ise kaynak sağlanacak sistemler protokolde yer almaktadır. Temiz kalkınma, ortak yürütme ve karbon ticareti gibi mekanizmalar bunlara örnektir.⁴³ Bunlar arasında karbon ticareti, piyasa bazlı bir mekanizma olup ülkelerin enerji politikalarının geleceğini belirleyebilecek niteliktedir. Karbon ticareti uygulamasıyla, piyasa kurallarına göre işleyen bir karbon pazarı ve ticarete konu olan karbondioksitin bir fiyatının olması emisyonları azaltmada önemli bir etken olarak görülmektedir.⁴⁴ Kendilerine öngörülen karbon salınım miktarını aşmayan ülkeler, sahip oldukları karbon kotalarını diğer ülkelere satabilme olanağına sahip olmuşlardır. Başka bir deyişle bu

⁴¹ Bonnier, **Popular Science**, Ağustos 2007, s.s. 48, 50, 53.

⁴² Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, “Kyoto Protokolü”, (Çevrimiçi); http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php 2 Haziran 2010.

⁴³ Çevre ve Orman Bakanlığı, “Kyoto Protokolü Esneklik Mekanizmaları ve Diğer Uluslararası Emisyon Ticareti Sistemleri”, (Çevrimiçi); <http://www.iklim.cevreorman.gov.tr/belgeler/03.pdf> 3 Haziran 2010.

⁴⁴ A.e.

mekanizma, fazla emisyon gerçekleştiren ülkelerin, az emisyon gerçekleştiren ülkelere bu hakkını satın almasına yol açmaktadır. Karbon ticareti piyasası, CO₂ ve CO₂ eşdeğeri olarak işlem görmektedir. Karbon ticaretinin toplam hacmi son yıllarda büyük artış sergileyerek 2009 yılı sonunda 140 milyar ABD dolarına kadar çıkmıştır.⁴⁵

Kyoto Protokolü Türkiye’de 2009 yılında yasalaşarak yürürlüğe girmiştir. Protokole göre Türkiye kritik ülke konumundadır ve bu durum 2012 yılına kadar bir yükümlülüğü bulunmadığı anlamını taşır. 2012 dönemi sonrası için ise, Türkiye’nin yükümlülükleri hala net değildir. Türkiye’de yıllar itibariyle sera gazlarının emisyonu artış eğilimindedir ve 2007 yılında yaklaşık 270 bin ton ile dünyada 24. sırada yer almaktadır.⁴⁶ Türkiye’de kişi başı karbon emisyonu, dünya ortalamasının altında yer alırken; yıllar itibariyle de karbon emisyonları artmaktadır.

Türkiye, karbon ticaretinden yüksek gelir elde edebilecek potansiyel bir ülke konumundadır. Bu potansiyel, enerjide yatırımların nükleer santraller ya da yenilenebilir kaynaklı enerji santrallerine kaymasıyla gerçekleşebilir. Üretim esnasında sera gazları emisyonu gerçekleştirmeyen enerji santrallerine yapılan yatırımlar, kişi başına düşen CO₂ ve CO₂ eşdeğerlerinin miktarını azaltırken, beraberinde Türkiye’nin karbon kotasını satabilecek konumda olmasını sağlayacaktır.

3.3.3. Nükleer Enerjiye Bağlı Radyasyonun İnsan Sağlığı Üzerinde Etkisi

Nükleer santrallerde fizyon ürünleri olan radyoaktif elementlerin yayılmasıyla, çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler gözlemlenebilir. Bu radyoaktivite salınımı, kullanılmış nükleer yakıtların tasfiyesinde ya da reaktörün rutin enerji üretimi sırasında gerçekleşebilme olasılığı taşımaktadır. Radyoaktif atıklar çeşitli teknolojilerle, çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmayacak şekilde

⁴⁵ European Commission Environment, “Emission Trading System”, (Çevrimiçi); http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/index_en.htm 3 Haziran 2010.

⁴⁶ Carbondioxide Information Analysis Center (Çevrimiçi); http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_coun.html#T, 4 Haziran 2010.

muhafaza edilebilmektedir. [Bkz. 3.2.1.] Yer altı galerilerinde nihai depolaması gerçekleşmiş atıkların, radyoaktivite sızıntısı yalnızca bir risktir ve zararlı etkiler yaratması sadece bu riske bağlı olup olağan dışı bir durumda söz konusudur. Başka bir ifadeyle radyoaktif atıklar nihai olarak depolandığında, çevresel bir tahribat gerçekleştirmez; yalnızca bu tahribatın risklerini taşır.

Nükleer reaktörlerin enerji üretiminde ortaya çıkan radyoaktivite ise; insan sağlığı üzerinde zamana, miktara ve mesafeye bağlı olarak değişen etkilere sahip yapay bir radyoaktivitedir. Radyasyonun insanlar üzerinde erken görülen bazı etkileri; gözlerde katarakt, cilt yanıkları ve ölümlerdir. Gecikmiş etkileri ise çeşitli kanserler, kısırlık ve genetik bozukluklardır. Radyasyonun insan sağlığı üzerinde bedensel ya da kalıtsal etkiler bırakması; alınan radyasyonun miktarına, doz alım süresine ve alınan dozun hızına bağlıdır.

Nükleer santrallerde üretimden kaynaklanan radyasyon miktarının çok daha fazlası, insanlar tarafından doğal ve yapay yollarla alınmaktadır. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına; güneş ışınlarına bağlı kozmik radyasyon, yüksek rakımlarda yaşamak, çeşitli yiyecek ve içecekler, baz istasyonlarına yakın olmak, televizyon vericileri, cep telefonları, sigara, uçak yolculukları, mikrodalga fırınlar, kömür santrallerinden kaynaklanan atıklar, kanser tedavi ilaçları, tıbbi görüntüleme uygulamaları gibi örnekler verilebilir.⁴⁷ Radyasyonun insan vücudunda kalma birimi “rem” veya Sievert (Sv) olarak ölçümlenmektedir. Bir yıllık süre zarfında sivil halkın maruz kalabileceği maksimum radyasyon doz sınırı ICRP (International Commission on Radiological Protection) tarafından 1 mSv olarak saptanmıştır.⁴⁸ Nükleer santral sahasına yakın konumda yaşadığı varsayılan bir kişinin bu santralden ötürü maruz kaldığı radyasyon dozu yıllık 0,05 mSv olarak tahmin edilmektedir.⁴⁹ Bu miktar mesafe uzadıkça düşmektedir. Nükleer santrallerin rutin işletme sürecinde bir insanın maruz kalacağı doz miktarı, sağlık açısından önemsenemeyecek ölçüde

⁴⁷ OECD NEA, *Transparency of Nuclear Regulatory Activities*, Tokyo, OECD Publishing, 2007, s.242.

⁴⁸ Fizik Mühendisleri Odası, *a.g.e.*, s.136.

⁴⁹ Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, (Çevrimiçi); http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/Guncelbelgeler/Radyasyon_olcum_sunum.pdf 5 Haziran 2010.

azdır. Göğüs filmi çekimi ile 0.10 mSv, uzun süreli bir uçak yolculuğunda ise 0,04 mSv doz alınmaktadır.⁵⁰

3.4. TÜRKİYE'DE NÜKLEER ENERJİ KURULUMUNUN ENERJİDE DIŞA BAĞIMLILIK VE ARZ GÜVENLİĞİNE ETKİSİ

Enerjide arz güvenliği; 1970'li yıllardan beri, hükümetlerin enerji politikaları içinde en önemli hedeftir. Enerji güvenliği, birincil enerji kaynaklarıyla birlikte elektrik enerjisinin fiziki olarak korunması ile sağlanabilir. Bu güvenlik enerjinin üretimi, taşınması, dağıtımı ve tüketiminde olan süreçleri kapsar. Ancak daha da önemlisi enerjide arz güvenliğidir ve arz güvenliği sürdürülebilir enerji ile yakından ilgilidir.

Enerji arz güvenliğinin birleşenleri; ekonomik, sosyal ve çevresel ölçütlerdir. Enerjide arz güvenliğine ulaşmak; ekonomik yönden fiyat istikrarı olan ve düşük maliyetli enerji, sosyal yönden güvenilir yani kesintisiz tedarik, çevresel yönden ise en az tahribat ile mümkündür.⁵¹ Enerji kaynaklarına ilişkin tercihlerin önemli dışsal faydalarından olan enerji arz güvenliğinin içselleştirilerek ölçülmesi oldukça güçtür. Özellikle jeopolitik yönden hassas konumda olan ülkeler için sağlanacak arz güvenliği, enerji kaynakları seçimi için en önemli karar alma mekanizmasıdır.

Enerji arz güvenliğini sağlamaya yönelik çeşitli teknikler kabul edilmektedir. Bunlar:⁵²

- Enerji kaynakların çeşitliliği,
- Enerji tedarikçilerinin çeşitliliği,
- Mümkün düzeyde enerji depolanması,
- Yedek enerji altyapısı,
- Santrallerin birden fazla yakıt tipiyle çalışabileceği esnek sistemlerdir.

⁵⁰ A.e.

⁵¹ OECD NEA, *Risks and Benefits of Nuclear Energy*, s.41.

⁵² Brenda Shaffer, *Energy Politics*, Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 2009, s.93.

Enerji arz güvenliklerini sağlama hedefleri ülkeler için temel politika olsa da; ülkeler, arz güvenliklerine ulaşmak için farklı bileşenlere ağırlık vermektedirler. Nükleer enerji santralleri, hidroelektrik santraller, diğer yenilenebilir enerji santralleri ve fosil yakıtlı termik santrallerinin bir ülkenin enerji portföyünde hep birlikte bulunması, o ülkenin kaynaklarının çeşitli olduğunu göstermektedir. Bir ülkenin sahip olduğu toplam enerji arzında, enerji kaynaklarından birinin diğer kaynaklara göre daha yüksek oluşu arz güvenliği sorunu yansıtmaktadır. Bu durum toplam arzda payı yüksek olan doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtların oluşan bir enerji bilançosunda yine geçerli olacaktır. Mevcut rüzgar, güneş, hidroelektrik santrallerini birden fazla bölgeye yaymak; fosil yakıtları birden çok rezervden temin etmek ve nükleer santralleri konuşlandırmak arz güvenliğini sağlayabilmenin bir yoludur. Özellikle doğal gaz ve petrolde ithalatçı konumda olan ülkeler, tedarikçi ülkelerin sayısını çoğaltarak yine arz güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. Kaynak kesintilerine dayalı uluslararası enerji krizlerinin, kaynak çeşitliliğinin yaratılamaması sonucu ortaya çıktığına sıkça rastlanmaktadır. Türkiye'nin son yıllarda yaşadığı doğal gaz ithalatındaki sıkıntı kaynak ve tedarikçilerin çeşitliliğinin az olduğunu, dolayısıyla arz güvenliğini yeterince sağlayamadığını göstermektedir. Türkiye'nin en önemli doğal gaz tedarikçilerinden olan Rusya ile doğal gaz fiyatı üzerine gerçekleşen anlaşmazlıklar ve 2008 yılında İran'dan Türkiye'ye giren doğal gaz miktarının azaltılması enerjide dışa bağımlılığın yol açtığı sorunlardandır.

Nükleer santraller yapıları itibarıyla enerji arz güvenliğini uzun süre sağlamaya yatkın enerji tesisleridir. Başta bulundukları mevcut enerji sisteminde kurulu gücü yüksek ve çeşitlilik kazandıracak özellikleri bulunmaktadır. Uranyum rezervlerinin dünyada geniş coğrafyaya yayılmış olması nükleer santral tercihinin arz güvenliğini sağlamasında rol oynamaktadır. Nükleer santrallerde yakıt olarak kullanılan uranyum ve uranyum türevlerinin nakliyatı kolay, fosil yakıtlara göre küçük hacimli ve depolanabilirliği kolay ve bolca mümkün olan bir yakıt türüdür. Aralarındaki en önemli özellik, bir nükleer santrale işletme ömrü boyunca yetecek uranyum miktarının bir defada depolanabilmesidir.⁵³ Enerji yoğunluğu açısından

⁵³ Emin Özbaş, *Sürdürülebilir Kalkınma İçin Nükleer Enerjinin Önemi*, Ed. Aslı Hüseyinoğlu, İstanbul, Tasam Yayınları, 2006, s.116.

nükleer santral yakıtlarından uranyum, diğer yakıtlara göre yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.⁵⁴ 1 kg kömür ve petrol 3-4 KWsa elektrik üretimini gerçekleştirebilirken, 1 kg uranyum ile bu üretim 50000 KWsa kadar olabilmektedir.⁵⁵ Nükleer enerji santrallerinde üretim maliyetlerinin kararlı oluşu ve yakıt fiyatına bağlı artışlardan neredeyse etkilenmemeleri, arz güvenliğinde ulaşılmak istenen fiyat istikrarı ile örtüşmektedir.

Kömür, doğal gaz, petrol ve yenilenebilir kaynaklı enerji santralleri, arz güvenliğini sağlama açısından nükleer santraller kadar etkili değildir. Fosil yakıtlar eğer ithal ediliyorsa arz güvenliğini sağlamaktan çok, enerjide dışa bağımlılığa yol açmaktadır. Fosil yakıtların çevresel yönden sera gazları emisyonlarının yüksek oluşu, fiyatlarındaki ani artışlar, dalgalanmalar ve stratejik açıdan tedarike ilişkin sıkıntılar arz güvenliğini zora sokmaktadır. Yenilenebilir enerji santralleri, ilk bakışta arz güvenliğini sağlayabilecek kaynaklar olarak görünmektedir. Çevresel yönden temiz üretimleri, yapıları itibarıyla yerli kaynak olmaları ve çeşitlendirilebilmeleri arz güvenliği bileşenleri ile örtüşmektedir. Ancak yenilenebilir kaynaklı enerji santralleri güvenilirlik yönünden eksik kaynaklardır ve arz güvenliğine çözüm olmaktan uzaktır. Yenilenebilir enerji santrallerinin güvenilirlikten uzak oluşu örneklerle açıklanabilmektedir. Söz konusu bir rüzgar santralinin verimli olduğu ve uygun maliyetle üretim yaptığı varsayıldığında bile, enerjinin kaynağı olan rüzgarın kesintisi ile üretimi durmaktadır. Yüksek düzeyde elektrik enerjisi depolanamadığından, rüzgar santrallerinin ağırlıklı olduğu bir enerji sistemi çöküntü tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır. Güneş enerjisinde de benzer sıkıntılar söz konusudur. Üretimi gerçekleştiren fotovoltaik hücreler gün ışığının kaybolması ile üretim gerçekleştiremez. Enerji üretiminin devam etmesi için, gündüz kazanılan ısının muhafaza edilerek gece boyunca üretim devamlılığı kazanacak teknoloji düzey teorik olarak mümkün olsa da; günümüzde ticari ölçeğe sahip değildir. Gerek rüzgar gerek güneş enerjisi kaynaklı enerji santrallerinin güvenilirlik yönünden eksikleri, kesintisiz enerji tedariki ile örtüşmemekte ve arz güvenliğini zorlaştırmaktadır.

⁵⁴ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.154.

⁵⁵ IAEA, "Nuclear Power Advantages" (Çevrimiçi); <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Development/devnine.html> 8 Haziran 2010.

Türkiye'nin elektrik enerjisi; üretim kaynakları içerisinde doğal gazın, enerji çevrim sektöründe 1980'li yıllardan itibaren kullanım payı sürekli yükselmiştir. Doğal gaz santrallerinin, Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi üretiminde payı 1997 yılında %21, 2003 yılında %45 ve 2009 yılında %48'e ulaşmıştır.⁵⁶ Türkiye'de üretilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık yarısı doğal gaz yakıtına bağlıdır. Üstelik doğal gazın da tamamına yakını ithal yolla elde edilmektedir. Türkiye'de rüzgar ve güneş kaynaklı yenilenebilir enerjilerin elektrik üretimindeki payı ise %1 kadardır.⁵⁷ Kaynak çeşitliliğindeki sıkıntı, kesintisiz elektrik üretimi ve fosil yakıtların fiyatlarındaki istikrarsızlık; Türkiye için büyük bir arz güvenliği eksikliğine yol açmaktadır. Enerji kaynaklarında dışa bağımlılık ne denli fazla ise, arz güvenliği o denli tehdit altındadır. Fosil yakıtlardaki yerli rezerv kıtlığı, fiyat dalgalanmaları ve ani fiyat şokları yenilenebilir kaynakların elektrik üretimi içinde neredeyse pay sahibi olmadığı ve nükleer santrallerden yoksun konumda olan kurulu güç sistemi; Türkiye'de enerji arz güvenliğinin ciddi tehdit altında olduğunun göstergesidir.

3.5. NÜKLEER ENERJİDE TÜRKİYE'YE YÖNELİK GENEL TESPİTLER VE SANTRALLERDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Bu bölümde Türkiye'ye getirilmesi olası nükleer santrallerin transferi öncesinde sağlanması gereken bazı şartlar ve oluşturulabilecek maliyet avantajları ele alınacaktır. Ayrıca TAEK tarafından belirlenen kriterler çerçevesinde hangi reaktör tiplerinin söz konusu olabileceği açıklanacaktır.

3.5.1. Türkiye Enerji Piyasasının Serbestleşmesi

Türkiye'nin enerji piyasasındaki hedefi; rekabetçi, mali yönden güçlü ve istikrarlı bir yapı oluşturarak; serbest bir enerji piyasası ortamı yaratmaktır. Kurulu güç yatırımlarının, düzenlenen kanunlarla ve öngörülen özelleştirmeler vasıtasıyla

⁵⁶ ETKB, "Elektrik Enerjisi" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=elektrik&bn=219&hn=219&nm=384&id=386> 8 Haziran 2010.

⁵⁷ A.e.

serbestleşme eğilimi içerisinde olduğu açıkça görülmektedir. 2010 yılında itibariyle Türkiye'nin kurulu elektrik gücü yaklaşık %54'lük pay ile EÜAŞ'a aittir.⁵⁸ Toplam kurulu gücün yarısından fazlasının halen bir kamu iktisadi teşebbüsü olan EÜAŞ'a ait olması; elektrik piyasasının tam olarak serbest bir yapıda olmadığını ve kısmen devlet bünyesinde düzenlendiğini göstermektedir. Nitekim 2002 yılından itibaren enerjide özel sektör yatırımlarının kurulu güç içinde payı giderek artmaktadır. Bir nükleer santral kurulumunun nihai kararı ve üretime geçmesi; planlaması, altyapı kurulumu; inşaat süresiyle birlikte, en hızlı şekilde bile 8-9 yılı bulacaktır. Böylelikle Türkiye'de devreye girmesi muhtemel nükleer santrallerin, bugünkü durumdan daha serbest yapıda ve kamu payının daha düşük olacağı bir enerji piyasasında faaliyet göstereceği düşünülebilir.

Kurulması planlanan nükleer santrallerin işletilmesi, serbest piyasalarda ve devlet düzenlemesi altında bazı farklılıklar gösterecektir. Öncelikle nükleer enerji santralleri, diğer enerji üretim santralleri ile maliyet bakımından rekabet edebilecek güçtedir. Bu tip bir geçiş sürecinde ya da iyice serbestleşmiş bir enerji piyasasında, nükleer santrallerin üretim maliyeti avantajını kaybetmesi söz konusu değildir; çünkü serbest enerji piyasalarında ticari maliyetin önemi oldukça yüksektir. Ancak nükleer santral yatırımcıları açısından serbestleşme sürecinde bir piyasa, yapısında; yatırımlar, belirsizlikler ve riskler içermektedir. Bu noktada kurulması planlanan nükleer santrallere, devlet tarafından belli süreyi kapsayacak alım garantileri verilebilir. Nitekim Türkiye ve Rusya arasında Mayıs 2010'da imzalanan ve TBMM onayına sunulmayı bekleyen nükleer enerji ve işbirliği anlaşmasında da devlet tarafından 15 yıllık elektrik alım garantisi verilmektedir.⁵⁹ Enerji fiyatlarının piyasada belirlendiği serbest yapı hedefi, nükleer santrallere sunulan alım garantisi ile güçleşebilir. Daha önemlisi verilen alım garantisinin süresidir. Serbest bir enerji piyasasında bu sürenin uzun tutulması nükleer santrallerin üretim maliyetinden kaynaklanan avantajının tüketiciye yansımamasına yol açabilir. Buna karşılık nükleer santrallerin yapıları itibariyle sıkı şekilde kamu kurumları ile bağları mevcuttur.

⁵⁸ ETKB "Elektrik Enerjisi" (Çevrimiçi); <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=elektrik&bn=219&hn=219&nm=384&id=386> 10 Haziran 2010.

⁵⁹ Meclis Haber, "TBMM Basın Açıklamaları", http://www.meclishaber.gov.tr/develop/owa/haber_portal.aciklama?p1=102242, 11 Haziran 2010.

Nükleer yakıtların güvenliği, işleme tesislerinde silahlanmanın engellenmesi, santralin fiziksel koruması gibi örnekler çoğaltılabilir. Ayrıca üretim maliyetlerinin serbest enerji piyasalarında daha da önemli hale gelmesiyle, santral işletmecilerinin güvenlik kriterlerini göz ardı etmesini ve çevresel faktörleri geri planda tutmasını engellemek bakımından kamu kuruluşlarının enerji piyasalarında yer alması kaçınılmazdır. Bu süreç içerisinde kamu kuruluşları tarafından mutlaka belirli denetim mekanizmaları oluşturulması gerekmektedir.

Türkiye'ye yönelik oldukça önemli bir başka husus, kurulması olası bir nükleer enerji santralının bulunduğu bölgedeki elektrik dağıtım ağının yeterliliğidir. Mevcut dağıtım hattı nükleer reaktörün gücünü kaldıramaz ise; nükleer santraldeki reaktörler, kapasitesinden daha düşük üretim yapacaktır. Bu durum nükleer santrallerin performansının düşmesine ve üretim maliyetlerindeki rekabet gücünü kaybetmesine yol açabilmektedir. Mersin Akkuyu nükleer sahasının, dağıtım ağına bağlanacak santralin gücüne sınır koyacağı ve ancak 1100 MW gücünde 2 üniteyi kaldırabileceği belirlenmiştir.⁶⁰ Kurulması planlanan reaktör 1100 MW gücünden düşük olsa bile, 3. Reaktör şebekeye katılamayacak ya da beklenen ömrü 50-60 yıl olan nükleer santrallerin bu süre boyunca kapasiteleri yükseltilemeyecektir. Nükleer santrallerin kurulacağı bölge için buna benzer altyapı sorunları mutlaka çözüme kavuşturulmalıdır.

3.5.2. Nükleer Santrallerde Maliyet Düşürme Yöntemleri

Nükleer santrallerin kurulumu için düşük maliyetle enerji üretimi, bu teknolojinin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Dünyada nükleer reaktörler ile ticari ölçekte elektrik üretimi 60 yıla yakın bir süredir devam etmektedir. Buna göre, ilk nükleer santralini kuracak ülkeler için kanıtlanmış bazı maliyet düşürme yöntemleri bilinmektedir. Birim maliyeti düşürmek, nükleer santrallerin sermaye yoğun yapısından ötürü büyük ölçüde yatırım maliyetlerini düşürmeye bağlıdır. İşletme-bakım ve yakıt maliyetleri için de üretim maliyetlerini düşürmek mümkün

⁶⁰ Ahmed Yüksel Özemre, Ahmet Bayülken, Şarman Gencay, 50 Soruda Türkiye'nin Nükleer Enerji Sorunu, İstanbul, Kaknüs Yayınları, 1.baskı, s. 57

olmakla birlikte, bu maliyetlerin toplam üretim maliyeti içinde payı nispeten düşük olduğundan yatırım maliyetlerini düşürmek, birim maliyetlere daha çok yansıtacaktır. Üretimde birim maliyeti düşürmek için uygulanması mümkün teknikler şunlardır:⁶¹

- Standartlaşma ve seri inşaat,
- Basitleştirilmiş reaktör tiplerinden yararlanmak,
- Santralin inşaat süresini kısaltmak,
- Santralin bünyesinde birden çok reaktör yerleştirerek çoklu ünite kurmak,
- Ömrü uzun olan santraller kurmaktır.

Nükleer santral kurulması planlanan bir ülkede, standartlaşmış bir nükleer enerji sisteminin oluşması nükleer enerji programının bir parçası olmalıdır. Türkiye artan elektrik talebinin karşılanması açısından birden fazla nükleer santral planlamaktadır. Bu santrallerin işleyişinin birbirine benzemesi ve peş peşe kurulması; lisanslama, ortalama yatırım maliyeti, test süreçlerindeki maliyetler ve malzeme üretimde maliyet avantajları getirebilmektedir. Standartlaşma ve santral kurulumunda serilere yönelme birim maliyetler üzerinde santral sayısına bağlı olarak %15-%40 oranına kadar varan düşürücü etkiye sahip olabilmektedir.⁶² İsveç'te kurulan santrallerde bunun örnekleri görülmektedir. İlk kurulan dizayndan kopyalama etkisi ile yararlanılarak ikinci, üçüncü ve dördüncü santrallerin proje maliyetlerinde %15-%20 arasında azalmalar gerçekleşmiştir.⁶³

Basitleştirilmiş tasarımların seçilmesi, doğrudan yatırım maliyetlerini düşürürken; dolaylı olarak da işletme ve bakım maliyetleri üzerinde azaltıcı etkiye sahiptir. Basitleştirilmiş sistemlerde santralin mekanik donanımları çok parçalı ve karmaşık yapısının önüne geçilebilir durumdadır. Basitleştirilmiş tasarımların seçimi ilk kez nükleer santral kurulacak ülkelerde, teknoloji transferi açısından da oldukça önemlidir. Eğer ülkenin nükleer programı dahilinde, uzun vadede kendi üretimi olan reaktör ve santraller elde etmek mevcutsa, basitleştirilmiş tasarımların seçimi bir

⁶¹ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.s. 175-176-177-178.

⁶² A.e., s. 175.

⁶³ OECD NEA, **Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants**, Paris, OECD Publishing,, 2000, s.69.

basamak görevi üstlenerek yerli teknolojinin ilerlemesine katkı sağlayacaktır. G.Kore'nin nükleer enerji programı buna benzer bir örnektir.⁶⁴

Santrallerin inşaat yapımını hızlandırarak toplam inşaat süresini kısaltmak maliyet düşürmeye yönelik bir başka tekniktir. Nükleer santrallerin yapımı diğer enerji santrallerine göre daha uzun sürmektedir. İnşaat süresinin uzunluğu arttıkça finansman şekline bağlı olan faiz ödemeleri de artar.⁶⁵ İnşaat süresinin artması işgücü maliyetlerinin de artması anlamına gelir. Birim maliyetlerin boyutu santralin inşaat süresine doğrudan bağlı olup ne kadar çabuk tamamlanırsa, nükleer santralin yatırımının geri dönüşünü de o kadar hızlandıracaktır. İnşaat süresindeki uzun gecikmeler birim maliyet avantajının yitirilmesi dışında geçen sürenin uzunluğuna bağlı olarak, reaktörün teknolojik değerini yitirmesine de sebep olabilmektedir.

Devreye girecek nükleer tesiste birden çok reaktör bulunması, yani çoklu ünite kurulumu; tesis birimlerinin ortak kullanımı, işgücü maliyetlerinin düşmesi, lisanslamanın tek seferde sağlanması gibi avantajlar birim maliyetlerini düşürmektedir. Ünite sayısındaki artışa göre maliyetler daha da düşürülebilmektedir. Tek üniteli iki ayrı santral yerine, aynı santralde ikiz reaktör bulunması; yatırım maliyetleri içinde yer alan kalemleri aşağıda verilen oranlarda düşürmektedir.⁶⁶

- İnşaat ve kurulum maliyeti %10,2
- Mekanik donanım ve malzeme %8,1
- İş gücü maliyeti %6,6
- Otomasyon ve reaktör yazılımlarının maliyeti %33,8

Elektrik üretimi kaynak dağılımında nükleer santrallerin en yüksek paya sahip olduğu ülke Fransa'da; nükleer santral projelerinin tümünde, sayıca birden

⁶⁴ G.Kore 1977 Yılında neredeyse hiçbir yerli katkı gerçekleştirmeden ilk nükleer santraline sahip olmuştur. Nükleer program dahilinde; santrallerini ithal etmeye devam ederek nükleer teknolojilere hakim olmuş, ardından kendi reaktör tasarımları üzerinde çalışmaya başlamıştır. Ayrıntılı bilgi için bkz. Richard C. Ragaini, Antonino Zichici, "International Seminar on Nuclear War and Planetary Emergencies", **Popular Science**, Bonnier, Ağustos, 2005.

⁶⁵ OECD NEA, **Nuclear Energy Outlook 2008**, s.177.

⁶⁶ OECD NEA, **Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants**, s.69.

fazla ya da ikiz ünite mevcuttur.⁶⁷ Bu ülkede tek üniteli kurulumların, ikiz üniteli kurulumlara göre %15 daha maliyetli olduğu anlaşılmıştır.⁶⁸

Türkiye'nin enerji politikası içinde nükleer santrallerden yararlanılması gerektiği ve gelecekte bu enerji kaynağına bağlı birden fazla santralin konuşlandırılacağı yer almaktadır. Ülkenin ikinci nükleer santralinin, kurulacak ilk santralden elde edinilen tecrübe ile önü açılmaktadır. III. nesil santraller maliyet düşürme tekniklerine daha yatkındır. Bu bağlamda santral seçimi için üretim maliyetlerini düşürme teknikleri derinlemesine incelenmeli ve uygulanmalıdır.

3.5.3. TAEK Kriterleri Çerçevesinde Nükleer Teknoloji Transferi

Nükleer enerji teknolojilerinin transferi uzun vadeli kararlar, nükleer program ve siyasi kararlılık gerektirmektedir. Nükleer santral kurulum kararlarının alımında; üretim maliyetleri haricinde, çevresel ve arz güvenliğine ilişkin dışsallıklar mutlaka dikkate alınarak, mevcut nükleer programın bir parçası olmalıdır. Nükleer santraller kurulmadan önce enerji piyasasında bazı belirsizliklerin ortadan kalkması zorunludur. Öncelikle nükleer santrallere yabancı olan kamuoyunun bilgilendirilerek, yapısal özelliklerinin tanıtılması gerekmektedir. Nükleer programın uzun vadede başarıya kavuşması için kamuoyu desteği sağlanması zorunludur. Bu destek için, nükleer programın uzun vadeli olması ve kararlı bir şekilde sürdürülmesi fayda sağlayacaktır. Geniş kapsamlı bir nükleer programı; santrallerin kullanılmış yakıt ve yüksek seviyeli atıkların idaresinin kanunlaştırılması, santralin ömrü dolduğunda sökülmesi için sağlanacak fonların oluşturulmasına netlik kazandıracaktır. Böylece serbestleşme eğiliminde olan bir enerji piyasasında belirsizlik ve riskler nispeten indirgenecektir.

Nükleer santral tipinin seçimi; uzun süreli mühendislik analizlerinin, Türkiye'nin yapısal şartlarının, teknik insan gücünün, ilgili kanunları göz önünde bulundurularak titizlikle belirlenmesi gerekir. Nükleer santral kurup çalıştıracak

⁶⁷ A.e., s.67.

⁶⁸ A.e.

işletmelerin uyması gereken kriterler, TAEK tarafından belirlenmiştir.⁶⁹ TAEK tarafından belirtilen kriterler önem sırasına göre; güvenlik, lisanslama, reaktör tipi, en az 40 yıl işletme ömrü, teknolojik sınanmışlık, yakıt ve en az %60 yerli katkı sağlamak şeklindeyir. Buna göre Türkiye’de kurulması planlanan santralin yüksek güvenlik donanımlarına sahip, uzun süre denenmiş ve diğer ülkelerde faaliyetini sürdüren reaktörlerden seçileceği anlaşılmaktadır. Kriterler içersinde yakıt olarak doğal uranyum, zenginleştirilmiş uranyum ve MOX tipi yakıtların kullanılabileceği yine TAEK tarafından belirtilmiştir.⁷⁰ Teknolojinin denenmiş olma şartı nedeniyle en yeni teknolojilerin prototip tasarımları seilmeyecektir. TAEK tarafından belirlenen kriterlere uygun düşen reaktörler; II. nesil PWR, BWR, PHWR ve bunların uzantıları olan III. nesil reaktörlerdir. [Bkz. Bölüm 2.2.2.] Kriterlerde istenilen en önemli özellik; güvenlik, dünyada kabul grmşlk ve teknolojik düzey olduğundan, III. nesil PWR tipi reaktörlerin Türkiye için ideal olacağı düşünülebilir. Bu reaktörlerin çalıştırılmasında toplam tecrübe yılı oldukça yüksektir ve güvenlik açısından ağır kazalara karşı daha dirençlidir.⁷¹ III. nesil PWR tipinde reaktörlere örnek gösterilebilecek bazı modeller ve tasarımcıları; AP1000 (Westinghouse-ABD), VVER1200 (Rusya), QPR1000 (G.Kore), APWR (Mitsubishi-Japonya) şeklindeyir.

Bu veriler ışığında gelecekte Türkiye’nin ilk nükleer santralini dışarıdan transfer edeceği beklenmektedir. TAEK tarafından da belirlenen, hem %60 yerli katkı hedefinin gerçekleşmesi hem de uzun vadede yerli bir nükleer santral inşa etmek ya da uyarlamak için; nükleer bilimlerde araştırma-geliştirme çalışmaları mutlaka sıkılaştırılmalı ve bir nükleer program doğrultusunda gerçekleştirilmelidir. Türkiye’de nükleer enerji üretiminin gelecekteki eğilimi kurulacak ilk nükleer santralin beklentileri karşılaması, sonraki santrallerin seçimi ve kurulum kararı üzerinde etkili olacaktır.

⁶⁹ Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, (evrimii); <http://www.taek.gov.tr/belgeler-formlar/func-startdown/93/> 12 Haziran 2010.

⁷⁰ A.e.

⁷¹ WNA, ‘‘Advanced Nuclear Power Reactors’’, (evrimii); <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>, 12 Haziran 2010

SONUÇ

Dünya birincil enerji kaynaklarının üretim ve tüketimi büyük oranda petrol, doğal gaz ve kömürden oluşmaktadır. Bu yakıtlar petrol krizi, fiyat dalgalanmaları ve çevresel felaketlerden etkilense de; üretim ve tüketim paylarını sürekli korumuştur. Fosil yakıtların sahip olduğu üstünlüğün, rezervlerinin tükenmesiyle kırılabileceği düşünülmektedir. Nitekim yapılan tahminler, hızlı kullanıma bağlı olarak gelecekte bunun oluşacağını doğrulamaktadır. Günümüzde, hızla gelişen teknoloji ve bilgi alışverişi sayesinde yeni enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır. Güneş, rüzgar, modern biyokütle, mikro hidroelektrik, hidrojen enerjisi gibi yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları önemli gelişmeler sergilemiştir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının bu denli hızlı gelişimi, teknolojik açıdan hala olgunlaşmadıklarını göstermektedir. Yenilenebilir kaynaklar teknolojik açıdan yeterince olgunlaşmadığından, dünyada yayılamamıştır. Bununla birlikte, sadece teknolojik altyapıları yüksek ülkelerde, ticari ölçekte üretim gerçekleştirebilmektedir. Yenilenebilir kaynakların teknolojik açıdan en büyük yetersizliği, kesintisiz enerji üretimi sağlayamamasıdır. Tam bu noktada nükleer enerji santrallerinin enerji üretimi, fosil yakıtlara ikame edilebilecek yapıdadır. Dünya nihai enerji tüketiminde petrolden sonra en yüksek paya, elektrik enerjisi sahiptir. Nükleer santraller, tüm enerji santralleri içerisinde, en yüksek kurulu güce sahip santrallerdir ve belli zaman aralıklarında yüksek elektrik enerjisi üretme potansiyeline sahiptirler.

Nükleer santraller, bulundukları ülkelerde elektrik üretimlerine önemli ölçüde katkı sağlamaktadırlar. Bununla birlikte; santrallerde gerçekleşen elektrik üretim maliyetleri, çoğu çalışmada diğer elektrik üretim santrallerine göre daha avantajlı gerçekleşmektedir. Fosil yakıtlı santrallerin yol açtığı çevresel sorunlardan sera gazları emisyonu, nükleer santrallerin üretimi esnasında açığa çıkmaz. Dahası günümüzde enerji santrallerinin yarattığı sera gazları emisyonu, dünyanın çeşitli yerlerinde ücretlendirilmektedir. Gelecekte oldukça yaygınlaşması olası bu ücretlendirme, nükleer santralleri üretim maliyetleri açısından daha da avantajlı konuma getirecektir.

Türkiye’de enerji üretim ve tüketimi, dünyada olduğu gibi, büyük ölçüde fosil yakıtlarla sağlanmaktadır. Fosil yakıtların yüksek ithalatı, beraberinde; ekonomik sorunlar, çevresel tahribatlar, arz güvenliği eksikliği ve enerjide dışa bağımlılığı getirmektedir. İkincil enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin neredeyse tamamı fosil yakıtlar tarafından üretilmektedir. Kurulu gücün %80’inden fazlası yine fosil yakıtlı santraller tarafından oluşmaktadır. 2009 yılı sonunda Türkiye’nin kurulu gücü 44600 MW seviyesindedir. Günümüzde yer alan III. nesil bir reaktör 1600MW’a kadar kurulu güce ulaşmaktadır. Kurulması olası 4 üniteli, toplam 4800 MW güce sahip bir nükleer santral, Türkiye’nin bugünkü kurulu gücünün yaklaşık %10’unu oluşturacaktır. Bu şekilde 3 santralin konuşlandırıldığı düşünülürse, kurulu güç içinde nükleer enerjinin alacağı pay %30’a ulaşacaktır. Nükleer santrallerin kurulumu, Türkiye için gerekli olan düşük maliyetli enerji üretimine olanak sağlayacaktır. Dışa bağımlılığın azaltılıp arz güvenliğinin sağlanmasında nükleer enerji, Türkiye için potansiyel bir kaynaktır. Türkiye’de yaşanan enerji sıkıntılarına; nükleer santrallerle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının da yanıt verme potansiyelinde olduğu görülmektedir. Arz güvenliği yönünden eksik kalsa da, yenilenebilir enerji santralleri; çevresel tahribata yol açmayan ve Türkiye’deki enerji kaynaklarına çeşitlilik sağlayacak santrallerdir.

KAYNAKÇA

- Adalıoğlu, Ulvi: “Türkiye’de Nükleer Enerjinin Tarihçesi”, Enerji 2023 Derneği (Çevrimiçi); http://www.enerji2023.org/index.php?option=com_content&view=article&id=230:tuerkye-de-nuekleer-enerjnn-tarhces&catid=6:nuekleer&Itemid=156 2 Mart 2010
- Agarwal, Suresh K: **Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects**, A.P.H. Publishing Corporation, India, 2003, s.s. 49, 53, 55
- Ahmed Yüksel Özemre, Ahmet Bayülken, Şarman Gencay: “50 Soruda Türkiye’nin Nükleer Enerji Sorunu” Kaknüs Yayınları, 1.baskı, İstanbul
- Alemdaroğlu, Nusret: **Enerji Sektörünün Geleceği Alternatif Enerji Kaynakları ve Türkiye’nin Önündeki Fırsatlar**, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, İstanbul, 2007
- Angelo, Joseph A: **Nuclear Technology**, Greenwood Press, 2004, s.s. 272, 369, 370, 372
- Banks, Ferdinand E: **Energy Economics: A Modern Introduction**, Springer, 2000
- Banks, Ferdinand E: **The political Economy of World Energy: an introductory textbook**, World Scientific, 2.Cilt, Singapore, 2007
- Bayraç, Naci: “Uluslar Arası Petrol Piyasasının Ekonomik Analizi” (Çevrimiçi); <http://www.tek.org.tr/dosyalar/BAYRAC-ENERGY.pdf>, 5 Mart 2009
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi: “Kyoto Protokolü”, (Çevrimiçi); http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php 2 Haziran 2010
- Bodansky, David: “Nuclear Energy: Principles, practices ad prospects”, Springer, 2004
- Bonnier: **Popular Science**, Ağustos 2007, ss. 48, 50, 53
- Brown, Charles E: **World Energy Resources**, Springer, Hiedelberg, 2002, s.s. 65, 103

- Carbondioxide Information (Çevrimiçi);
Analysis Center: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_coun.html#T, 4
Haziran 2010
- CBO Testimoty: “Cost of Reprocessing Versus Directly Disposing of
Spent Fuel” (Çevrimiçi);
<http://www.cbo.gov/ftpdocs/88xx/doc8808/11-14-NuclearFuel.htm> 22 Mayıs 2009
- Çevre ve Orman Bakanlığı: “Kyoto Protokolü Esneklik Mekanizmaları ve Diğer
Uluslararası Emisyon Ticareti Sistemleri”, (Çevrimiçi);
<http://www.iklim.cevreorman.gov.tr/belgeler/03.pdf>, 3
Haziran 2010
- Çevre Yönetimi (Çevrimiçi);
Genel Müdürlüğü: http://www.cygm.gov.tr/CYGM/Files/Guncelbelgeler/Radyasyon_olcum_sunum.pdf 5 Haziran 2010
- Çiçek, Arzu: **Çevre Sağlığı**, Ed:Arzu Çiçek, 1. Baskı, Anadolu
Üniversitesi, Eskişehir, 2006
- Dahl, Per F: **Heavy Water and the Wartime Race For Nuclear
Energy**, CRC Press, London, 1999
- Drbal, Lawrence F: **Power Plant Engineering**, Ed: Patricia G. Boston,
Kayla L. Westra, Springer, 1995
- Eerkens, Jeff W: **The Nuclear Imperative: A Critical Look at the
Approaching Energy Crisis**, Springer, Dordrecht,
2006
- Enerji 2023 Derneği: “Türkiye Açısından Nükleer Enerjinin Yeri”,
(Çevrimiçi);
http://www.enerji2023.org/index.php?option=com_content&view=article&id=152:tuerkye-acisindan-nuekleer-enerjnn-yer&catid=6:nuekleer&Itemid=221 3 Mart
2010
- Erdoğan, Erkan: “Nuclear power in open energy markets: A case study
of Turkey”, **Energy Policy**, Elsevier, 2007
- ETKB: “Biyoyakıt” (Çevrimiçi);
<http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage>

Mart 2009	s&b=biyoyakit&bn=235&hn=&nm=384&id=40698, 7
ETKB:	“Güneş” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=gunes&bn=233&hn=&nm=384&id=40695 , 15 Mart 2009
ETKB:	“Elektrik Enerjisi” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=elektrik&bn=219&hn=219&nm=384&id=386 8 Haziran 2010
ETKB:	“Rüzgar” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/ , 13 Mart 2009
ETKB:	“2008 Yılı Genel Enerji Dengesi” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=y_istatistik&bn=244&hn=244&id=398 22 Haziran 2010
ETKB:	“Kömür” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692 , 23 Haziran 2010
ETKB:	“Hidrolik” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692 , 24 Haziran 2010
ETKB:	“Jeotermal” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692 , 24 Haziran 2010
ETKB:	“Güneş” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692 , 24 Haziran 2010
ETKB:	“Biyoyakıt” (çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpage&s&b=kotur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692 , 24 Haziran 2010
ETKB:	“Uranyum ve Toryum” (Çevrimiçi); http://www.enerji.gov.tr 5 Nisan 2010

- European Commission Environment: "Emission Trading System", (Çevrimiçi); http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/index_en.htm 3 Haziran 2010
- Evans, Robert L: **Fueling Our Future: An Introduction to Sustainable Energy**, 2007, Cambridge University Press, New York
- Fizik Mühendisleri Odası: **Nükleer Enerji Raporu**, Ankara, 2006 s.s. 25, 32, 34, 44, 51, 52, 120, 124, 136, 142, 143, 145
- Frankel, Ernst G: **Oil and Security: A World Beyond Petroleum**, Springer, Dordrecht, 2007
- Gabriel, Cacuci Dan: **Sustainable Energy Technologies Options and Prospects**, Ed: K. Hanjalic, R. van de Krol, A. Lekic, Springer, Dordrecht, 2008
- Gen IV International Forum: "A Technology Roadmap For generation IV Nuclear Energy Systems", (Çevrimiçi); http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf 20 Mayıs 2009
- Global Nuclear Energy Partnership: "Statement of Principles" (Çevrimiçi); http://gneppartnership.org/docs/GNEP_SOP.pdf, 21 Mayıs 2009
- Government of India, Department of Atomic Energy: "Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme" (Çevrimiçi); <http://www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf> 7 Nisan 2010
- Hesketh, K. W: **The Nuclear Fuel Cycle: From Ore to Wastes**, Ed: P. D. Wilson, Oxford University Press, New York, 1996
- Hewitt, Geoffrey F, Jonh G: **Introduction to Nuclear Power**, 2nd Edition, Collier, Taylor&Francis, New York, 2000
- IAEA: **Advanced Applications of Water Cooled Nuclear Power Plants**, IAEA, Austria, 2008
- IAEA: "INPRO 2008 Progress Report", (Çevrimiçi); <http://www.iaea.org/INPRO/> 22.5.2009
- IAEA: **Nuclear Power Reactors in The World**, Reference Data Series No:2, IAEA, Vienna, 2009 s.s. 12, 15, 21

- IAEA: "Nuclear Power Advantages" (Çevrimiçi);
<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Development/devnine.html> 8 Haziran 2010
- IAEA: **Nuclear Power Reactors in the World**, Vienna
Austria, IAEA, 2008, s.s. 12, 41
- IAEA: "Nuclear Power Reactors in the World
2010" (Çevrimiçi);
http://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf 29 Haziran 2010
- IAEA: "Reactor Lists" (Çevrimiçi);
<http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/>, 13 Mart
2010
- IEA: "Key World Energy Statistics 2009" (Çevrimiçi);
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf, 25 Haziran 2010
- IEA: "Renewables and Waste in World", (Çevrimiçi);
<http://www.iea.org/stats/prodresult.asp?PRODUCT=renewables>, 19 Haziran 2010
- IEA: **World Energy Outlook 2008**, Stedi Media, Paris,
2008
- İ.T.Ü. Petrol ve Doğal gaz Mühendisliği Bölümü: "Petrol, Doğal Gaz ve Jeotermal Enerji Hakkında
Merak Edilenler", (Çevrimiçi);
<http://www.petrol.itu.edu.tr/question/faqt.html#3>, 5
Mart 2009
- İder, Kemal: "Hidrojen Enerji Sistemi" (Çevrimiçi);
http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi134/d134_101105.pdf, 21 Haziran 2010
- James Doyle: **Nuclear Safeguards, Security and Nonproliferation:
Achieving Security With Technology and policy**,
Elsevier, Burlington, 2008
- Kadiroğlu, Osman K: "Türkiye'ye Nükleer Enerji Girmelidir", (Çevrimiçi);
<http://www.tisk.org.tr>, 13 Mayıs 2010
- Krech, Shepard, McNeill, John Robert, Merchant, Carolyn: "Encyclopedia of World Environmental History"
3.cilt, Routledge, 2004

- Lappeenranta University of Technology: "Comparison of Electricity generation Costs", (Çevrimiçi); <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/39685/isbn9789522145888.pdf> 4 Mayıs 2010
- Leyzerovich, Alexander S: **Wet Steam Turbines For Nuclear Power Plants** First Edition, Oklahoma USA, 2005, s.s. 20, 25
- Massachusetts Institute of Technology: "Future of Nuclear Power" (Çevrimiçi); <http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-update2009.pdf> 3 Mayıs 2010
- Meclis Haber: "TBMM Basın Açıklamaları" http://www.meclishaber.gov.tr/develop/owa/haber_portal.aciklama?p1=102242, 11 Haziran 2010
- McElroy, Michael B: **The Atmospheric Environment: Effects of Human Activity**, Princeton University Press, New Jersey, 2002
- Michel, Erwann O, Decker, Debra K: "The Economics of Nuclear Energy Markets and the Future of International Security", s.s. 4, 8, 9, 10, 15 (Çevrimiçi); http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP2008-01-08,EMK,DD_ENEM.pdf, 24 Mayıs 2009
- Morris, Neil **Nuclear Power**, Ed: Mary-Jane Wilkins, Smart Apple Media, 1.Bs, China, 2007, s.s. 9, 10, 14
- Mounfield Peter R: **World Nuclear Power**, Routledge, 1991, s.s. 9, 11
- Münir, Metin: "Nükleerde Kore Örneği" Milliyet, 19 Şubat 2010
- National Research Council: **The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs**, National Academies Press, Washington, 2004
- Nükleer Enerji Dünyası: "Türkiye'de Nükleer Enerjinin Tarihçesi" (Çevrimiçi); <http://www.nukleer.web.tr/> 3 Mart 2010
- OECD NEA, IAEA: **Projected Cost of Generating Electricity 2010 Edition**, Paris, OECD Publishing, 2010, s.s. 34, 48, 59, 60, 61, 62
- OECD NEA, IAEA: **Uranium 2005: Resources, Production and Demand: A Joint Report**, Paris, OECD Publishing, 2006

- OECD NEA, IAEA: **Uranium 2007: Resources, Production and Demand**, OECD Publishing, Paris, 2008 s.s.16, 28
- OECD NEA: **Decommissioning Nuclear Power Plants: Strategies and Costs**, OECD Publishing, Paris, 2003, s.s. 60, 61
- OECD NEA: **Externalities and Energy Policy: The life Cycle Analysis Approach**, OECD Publishing, Paris, 2002
- OECD NEA: “Nuclear Electricity Generation: What are the External Costs”, (Çevrimiçi); <http://www.nea.fr/ndd/reports/2003/nea4372-generation.pdf> 11 Mayıs 2010
- OECD NEA: **Nuclear Energy Outlook 2008**, OECD Publishing, Paris, 2008, s.s. 154, 175-178, 375, 376, 379, 380, 385, 386, 447, 449
- OECD NEA: **Nuclear Energy Today**, OECD Publishing, Paris, 2003, s.s. 60, 61
- OECD NEA: **Nuclear Power plant Management in Changing Business World**, OECD Publishing, Paris, 2000
- OECD NEA: **Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants**, OECD Publishing, Paris, 2000, s.s. 67, 69
- OECD NEA: **Risks and Benefits of Nuclear Energy**, OECD Publishing, 2007
- OECD NEA: **Transparency of Nuclear Regulatory Activities**, OECD Publishing, Tokyo, 2007, s.242
- OECD NEA: **Trends in Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects”** OECD Publishing, Paris, 2001, s.s. 22, 24
- OECD: **OECD Environmental Outlook**, OECD Publishing, Paris, 2008
- Özbaş, Emin: **Sürdürülebilir kalkınma için Nükleer Enerjinin Önemi**, Ed. Aslı Hüseyinoğlu, Tasam Yayınları, İstanbul, 2006, s.116
- Park, Chris C: **Chernobly the Long Shadow**, Routledge, London, 1989

- Petrol İşleri Genel Müdürlüğü: “İstatistik” (Çevrimiçi); <http://www.pigm.gov.tr/istatistikler.php>, 23 Haziran 2010
- Princeton Plasma Physics Laboratory: (Çevrimiçi); http://www.pppl.gov/fusion_basics/pages/fusion_advantages.html 10 Mart 2010
- Quasching, Volker: **Understanding Renewable Energy Systems**, Earthscan, UK, 2005
- Renewable Energy: “Renewables Global Status Report 2009 Update” Policy Network: (Çevrimiçi); http://www.ren21.net/pdf/RE_GSR_2009_Update.pdf
- Royal Academy of Engineering: “The Cost of Generating Electricity”, (Çevrimiçi); http://www.raeng.org.uk/news/publications/list/reports/Cost_of_Generating_Electricity.pdf 8 Mayıs 2010
- Shaffer, Brenda: **Energy Politics**, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 2009
- Shepherd, William: **Energy Studies**, 2. Bs, Imperial College Press, London 2003, s.s. 162, 226
- Sherman, Josepha: **Fossil Fuel Power**, Capstone Press, Minnesota, 2004
- Smith, Zachary A, Taylor, Katrina, D: **Renewable and Alternative Energy Resources. A Reference Handbook**, ABC-CLİO, California, 2008 s.s. 16, 17
- TAEK: (Çevrimiçi); <http://www.taek.gov.tr/birimler/bagli-kuruluslar/99-cnaem.pdf> 2 Mart 2010
- Temurçin, Kadir, Aliağaoğlu, Alpaslan: “Nükleer Enerji ve Tartışmalar Işığında Türkiye’de Nükleer Enerji Gerçeği” **Coğrafi Bilimler Dergisi** Ocak 2003, s.33
- Toossi, Reza: **Energy and The Environment: Resources, Technologies and Impacts**, Verve Publishers, Los Angeles, 2005
- Tübitak: **Bilim ve Teknik**, Aralık 2007, s.s. 7, 8
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu: (Çevrimiçi); <http://www.taek.gov.tr/belgeler-formlar/func-startdown/93/> 12 Haziran 2010
- Türkiye Kömür İşletmeleri “Kömür Nedir”, (Çevrimiçi);

- Kurumu: http://www.tki.gov.tr/dosyalar/komur_nedir.pdf, 7 Mart 2009
- UK Energy Research Centre: "A Review of Electricity Unit Cost Estimates", (Çevrimiçi); http://www.ukerc.ac.uk/Downloads/PDF/07/0706_TPA_A_Review_of_Electricity.pdf 18 Nisan 2010
- US Energy Information Administration: "International Energy Outlook 2008" (Çevrimiçi); <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html> 13 Mayıs 2009
- US Nuclear Regulatory Commission: "Status of the Decommissioning Program" (Çevrimiçi); <http://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/decommissioning.html>, 13 Nisan 2010
- Walker, Denise: **Fuels and the Environment**, Ed: Katie Harker, Evans Brothers, London, 2007
- Weart, Spencer R: **The Discovery of Global Warming**, Harvard University Press, USA, 2008, s.s. 7,8
- World Nuclear Association: "Decommissioning Nuclear Facilities", (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf19.html>, 13 Nisan 2010
- World Nuclear Association: "Fast Neutron Reactors" (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf98.html>, 2 Haziran 2009
- World Nuclear Association: "Information Papers" (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>, 24 Nisan 2009
- World Nuclear Association: "Non Power Uses of Nuclear Technology" (Çevrimiçi); http://www.worldnuclear.org/how/nonpower_uses_of_nuclear_energy.html, 13 Mart 2010
- World Nuclear Association: "Research Reactors", (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf61.html>, 13 Mart 2010
- World Nuclear Association: "Radioisotopes In Medicine", (Çevrimiçi); <http://www.world-nuclear.org/info/inf55.html>, 13 Mart 2010
- World Nuclear Association: "Reactor Database" (Çevrimiçi); <http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/Advanced.aspx?id=27246> 30 Haziran 2010

World Nuclear Association: "The New Economics Of Nuclear Power", s.17
(Çevrimiçi); <http://www.worldnuclear.org/reference/pdf/economics.pdf>, 18 Nisan 2010

World Nuclear Association: "Uranium Production" (Çevrimiçi);
<http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>, 1 Nisan 2010

World Resources Institute: "Energy and Resources", (Çevrimiçi);
http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.php?theme=6, 17 Haziran 2010

World Wind Energy Association: "World Wind Energy Report 2009" (Çevrimiçi);
http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf, 19 Haziran 2010