

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/332496255>

Nükleer Enerji ve Geleceği

Article · April 2019

DOI: 10.33688/aucbd.554906

CITATIONS

0

READS

227

3 authors, including:



Muazzez Harunoğulları

Kilis 7 Aralık Üniversitesi

22 PUBLICATIONS 147 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



enerji kaynaklarının jeopolitiği ve küresel güçlerin enerji politikaları [View project](#)



Suriyeli sığınmacıların Kilis şehrindeki mekansal kültürel ve ekonomik etkileri [View project](#)



Nükleer Enerji ve Geleceği¹

Nuclear energy and its future

Muazzez Harunoğulları^{*a}

Makale Bilgisi

DOI:
10.33688/aucbd.554906

Makale Geçmişi:
Geliş: 09.04.2018
Kabul: 14.02.2019

Anahtar Kelimeler:
Nükleer Enerji
Enerji Görünümü
Enerji Kaynakları
Enerji
Nükleer Santral

Öz

Sürdürülebilir bir ekonomik büyüme ve enerji geleceği için nükleer enerji vazgeçilmez bir kaynak olarak görülmektedir. Primer enerji kaynaklarına alternatif olarak görülen nükleer güç reaktörleri, elektrik enerjisi üretiminde bulunduğu ülkelere avantaj sağlamaktadır. Nükleer santraller bulundukları ülkelerin enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılamakta ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Bu çalışmanın amacı enerji sektöründe nükleer enerjinin payını belirleyerek, dünyada nükleer enerjinin coğrafi dağılımını ortaya koymak, ülkelerin enerji kullanım payında nükleer enerjinin önemini, ülkelere göre enerji talebindeki yerini değerlendirmektir. Petrol ve doğal gazla bağımlılığın azaltılmasında önemli bir kaynak olan nükleer enerji, özellikle gelişmiş batılı ülkelerde daha yaygın kullanılmaktadır. Birincil enerji kaynakları açısından dışa bağımlı ülkeler nükleer enerji sayesinde kalkınma ve gelişme hızlarını arttırarak ekonomik olarak büyümüşlerdir. En son 2011 yılında Japonya’da yaşanan nükleer kazaya rağmen bu kaynağa sahip ülkelerin nükleer enerjiden vazgeçmesi mümkün görülmemektedir.

Article Info

DOI:
10.33688/aucbd.554906

Article History:
Received: 09.04.2018
Accepted: 14.02.2019

Keywords:
Nuclear Energy
Energy Outlook
Energy Sources
Energy
Nuclear Power Plant

Abstract

For a sustainable economic growth and energy future, nuclear energy is considered as an indispensable resource. An alternative to primary energy resources, nuclear power reactors bring advantages regarding the electrical energy production. Nuclear power plants supply the needs of the countries they are built in and reduce dependency to foreign countries. The purpose of this study is to evaluate the share of nuclear energy in the energy sector, to put forward the geographical distribution of nuclear energy in the world, the importance of nuclear energy in countries’ energy use and the energy demand levels according to countries. An important resource in reducing dependency on oil and natural gas, nuclear energy is widely used specifically in western countries. Countries that are dependent on foreign countries in terms of primary energy resources economically grew thanks to nuclear energy by increasing their development pace. Despite the nuclear accident in Japan in 2011, it is not possible for countries that have this resource to abandon nuclear energy.

^{*}Sorumlu Yazar/Corresponding Author: muazzez@kilis.edu.tr

^a Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Kilis/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0003-43343364>

1. Giriş

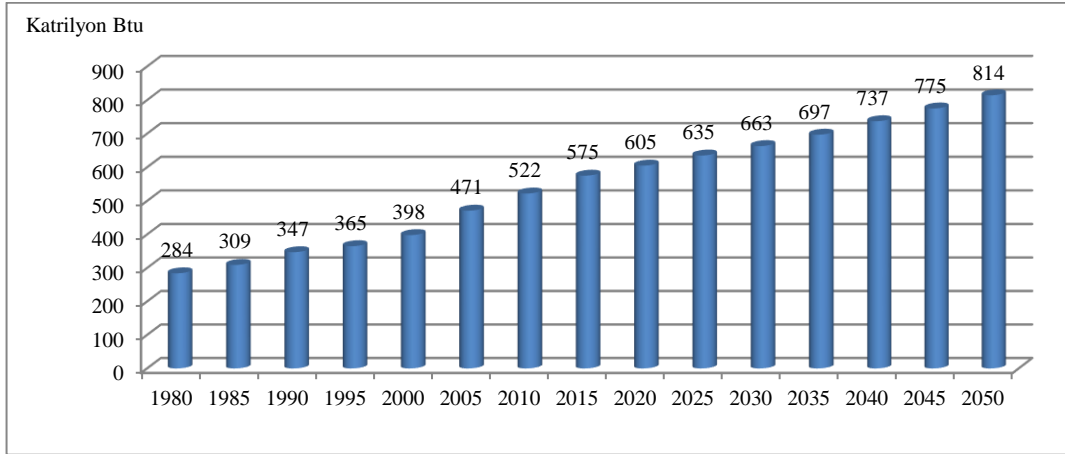
Ülkelerin sosyal ve ekonomik yönden kalkınmasında temel bir girdi olan enerji, ekonomik gelişmenin ve toplumsal refah seviyesinin artışının göstergesidir. Büyüyen ekonomilerin enerji ihtiyacı ve kullanımı hızla artırmaktadır. Enerji kullanımındaki ve tüketimindeki yükseliş iktisadi gelişmişliğin bir göstergesidir. Teknolojik olarak gelişmiş ve aynı zamanda sermayeyi ellerinde tutan, bilgi kaynaklarına ve bunları işleme olanağına sahip ülkelerdeki enerji tüketimi ve sanayi üretimi oldukça yüksektir. Gelişmekte olan ülkelerin nüfusundaki hızlı büyüme, şehirleşme, sanayileşme ve sosyal refah seviyesindeki artış enerji ihtiyacını da hızla büyütmektedir. Gelişmiş ülkelerin enerji kullanımı yüksek oranda olduğu gibi, gelişmekte olan ülkelerin de enerji talebi hızlı bir şekilde artış gösterir. Fosil yakıtlar dünya coğrafyasına dengeli bir şekilde dağılmamıştır. Bazı ülkeler, fosil yakıt rezervleri açısından zengin olduğu halde bu kaynakları işleyecek teknoloji ve bilgiye sahip değildirler. Fosil kaynaklı enerjinin yok denecek kadar az olduğu bazı ülkeler ise teknoloji, sermaye ve bilginin gücünü kullanarak ülkelerindeki ekonomik kalkınmayı ve bundaki sürdürülebilirliği gerçekleştirmişlerdir. Dünya ülkeleri, hidrokarbon enerji kaynaklarında yaşanan hızlı tüketimi, alternatif enerji kaynakları ile ilgili politikalar ve projeler geliştirerek bertaraf etmeye çalışmaktadırlar. Global ekonomide yaşanan büyümenin önümüzdeki yirmi yılda neredeyse iki katına çıkması ve büyümenin % 3.4 olması (BP, 2017: 11) beklenmektedir. Gelişmekte olan ülkelerdeki milyarlarca insanın düşük gelir seviyesinden kurtulmasında, ülkelerin refah seviyesinin artmasında, toplam enerji talebindeki genişleme önemli görülmektedir. Enerji talebindeki artış, sürdürülebilir enerji kullanımını gerekli kılmaktadır (BP, 2017: 5).

2035 yılına kadar olan sürede dünyadaki nüfusun, yaklaşık 1,5 milyar kişi daha artarak 8,8 milyara ulaşması beklenmektedir. Küresel ekonomide beklenen büyümenin büyük kısmı gelişmekte olan ülkelere gerçekleşmektedir. Çin ve Hindistan bu artışın yaklaşık yarısını gerçekleştiren ülkelerdir. Küresel ölçekte refah seviyesinde yaşanan artış ve verimlilikte öngörülen kazançlar, 2 milyardan fazla insanın düşük gelirden kurtulmasını sağlamaktadır (BP, 2017: 11). Önümüzdeki 20 yıl içinde enerji kaynaklarındaki büyümenin yarısını nükleer ve hidroelektrik enerji ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşturması beklenmektedir. Bununla beraber petrol, doğal gaz ve kömür dünya ekonomisine güç veren en önemli enerji kaynakları olmayı sürdürecektir, 2035'te toplam enerji kaynaklarının dörtte üçünden fazlasını bu kaynaklar oluşturacaktır. Birincil enerji içindeki payı hızla artan kaynak doğal gazdır. Üretim ve tüketimi son yıllarda belirgin bir artış eğilimi içinde olan kömür, 2035 yılına kadar en hızlı büyüyen ikinci yakıt kaynağı olacaktır. Enerji kaynakları içindeki payının büyüme hızının kademeli olarak yavaşlaması beklense de, petrole olan talebin büyümesi devam etmektedir. Son 20 yılda kömür talebinin büyümesi keskin bir biçimde düşmüş olmakla birlikte 2020'li yılların ortalarında kömür tüketiminin zirveye ulaşması beklenmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji de, en hızlı büyüyen enerji kaynağıdır. Günümüzdeki % 7.1'lik paya sahip olan bu kaynakların birincil enerji içindeki payının 2035 yılına kadar % 10'a yükseleceği öngörülmektedir (BP, 2017: 15).

Dünya ekonomisi canlanmaya devam etmekte, küresel enerji tüketiminin neredeyse üçte ikisi elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Elektrik üretimi için kullanılan enerjinin payı 2015'te % 42 iken bu payın 2035'te % 47'ye yükselmesi öngörülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerin refah seviyesi yükseldikçe kişi başına düşen elektrik tüketimi de artış gösterir. Özellikle Afrika, Hindistan ve gelişmekte olan Asya'nın diğer bölgelerinde yaşayan 1 milyarın üzerinde insanın şu anda elektriğe

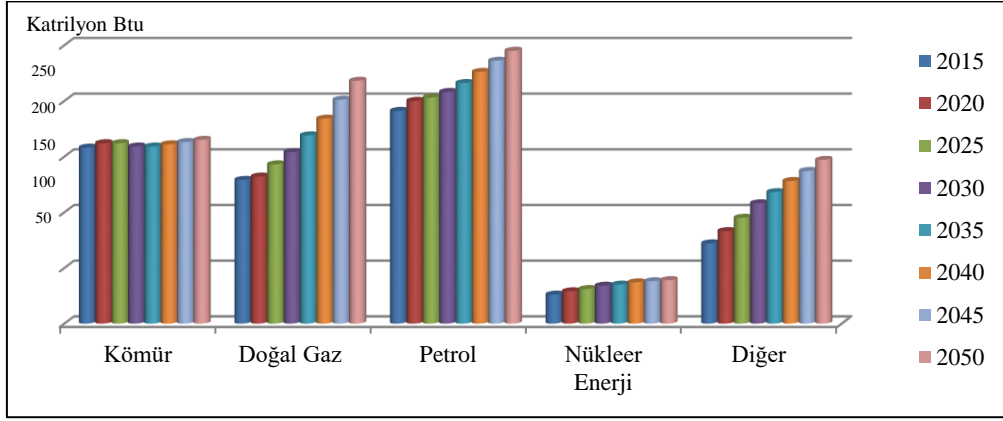
ulaşımının olmadığı tahmin edilmektedir (BP, 2017: 19). Enerji kullanımından dolayı dünyanın tamamındaki karbon emisyonunun %13 oranında arttığı yönünde bir görüş söz konusudur. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), karbon emisyonlarının 2035'e kadar %30 oranında düşmesi gerektiğini öngörmektedir. Karbon emisyonlarının büyümesinde beklenen yavaşlama enerji yoğunluğundaki azalma ve yakıt karışımındaki değişim hızındaki belirgin artışı yansıtır. Karbon salımı artışında yaşanan yavaşlamayı; dünya kömür tüketiminin keskin bir şekilde azalması ile birlikte doğal gaz, nükleer ve hidroelektrik enerji ile yenilenebilir enerji kaynaklarında yaşanan tüketim artışı sağlamaktadır (BP, 2017: 21).

Petrol talebi (geçmişe göre daha yavaş olsa da) büyümeye devam edecektir. Sektörün, sıvı yakıtların çoğunu taşımacılık tüketmektedir (BP, 2017: 27). Dünyadaki birincil enerji tüketiminde, geçmişten günümüze sürekli artışlar yaşanmaktadır. 1980'de yaklaşık 284 katrilyon Btu olan sarfiyat devamlı yükselmiş, 2010'da ise 522 katrilyon Btu'ya çıkmıştır. BP'nin Enerji Görünümü 2017 yılı raporuna göre, küresel enerji talebinde 2035 yılına kadar %30'luk bir artış gerçekleşecektir (BP, 2017). Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yapılan tahminlere göre dünya küresel enerji tüketimi 2050 yılına kadar artarak devam edecektir (Şekil 1) (EIA, 2015; EIA, 2017).



Şekil 1. Dünya toplam birincil enerji tüketimi 1980-2050 (Katrilyon Btu)

2015 yılında küresel kömür tüketimi 158.2 katrilyon Btu iken bu rakamın 2050 yılında 164.6'ya ulaşacağı tahmin edilmektedir. Doğal gazın küresel tüketim miktarı 2015 yılında 128.9 katrilyon Btu, petrol tüketimi 190.6 katrilyon Btu, nükleer enerji 20.6 katrilyon Btu, diğerleri ise 71.7 katrilyon Btu'dur. 2050 yılında bu enerji kalemlerinde tüketim artışı sırasıyla doğal gazda 218.2, petrolde 244.9, nükleer enerjide 39.4, diğer enerji kaynaklarında ise 146.6 katrilyon Btu'ya yükseleceği düşünülmektedir (Şekil 2) (EIA, 2015).



Şekil 2. Küresel birincil enerji tüketiminde yıllara göre artış (2015-2050) (katrilyon Btu)

Küresel ve bireysel refahın sağlanması, yoksulluğun hafifletilmesi ve dünya ekonomisinin sürdürülebilirliği; emisyonuz ve güvenli enerji arzına sahip olmaya bağlıdır. Küresel ölçekte tüm gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, enerji taleplerini karşılamak için yeni arayışlar içine girmişlerdir. Enerji kullanımı, sanayi devrimiyle etkin bir şekilde insanlığın hayatındaki yerini almıştır. Hidrokarbon enerji kaynaklarına sahip olan batılı ülkeler, sanayi devrimini en etkili şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sanayi kollarının zaman içinde yaygınlaşıp gelişmesi de tamamen enerji kullanımına bağlı olmuştur. Sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı 1990'lı yılların başında devletler tarafından kabul görülerek uygulamaya alınmıştır. Özellikle elektrik enerjisinin üretimi tüm dünya devletlerinin ekonomik gelişmesinde önemli olduğundan, yeni enerji politikaları ve enerji yatırımları ülkelerin siyasi arenadaki etkinliğini ve yarışını da arttırmıştır. Bu yönde yapılan enerji politikaları, tüm dünyada güçlü ülkeler arasında büyük çekişmelere ve yarışlara sebep olduğu gibi, Orta Doğu ve Orta Asya'da enerji savaşlarına yol açmaktadır. Özellikle hidrokarbon kaynaklar olan petrol ve doğal gazın üretimi, dağıtımı ve enerji ulaşımı üzerindeki politik baskılar ve çekişmeler hidrokarbon kaynaklar bakımından fakir ve bu kaynakların temininde dışa bağımlı olan ülkelerin nükleer enerji projelerini geliştirmelerine neden olmuştur.

Dünya enerji kullanımında nükleer santraller önemli bir yere sahiptir. 20. yüzyılın en önemli enerji kaynaklarından biri olan nükleer, teknolojik gelişmelerle birlikte büyüme göstermiştir (Er ve Sunal, 2008: 193). Nükleer enerji talebi günümüzde artan bir seyir izlemektedir. Nükleer santrallerin kurulması ülkeler açısından bir zorunluluk olarak değerlendirilmektedir. Dünyanın en gelişmiş ülkelerinin elektrik enerjisi üretimlerinin önemli bir kısmını nükleer santrallerden sağlaması, nükleer santrallerin önemini koruyacağının göstergesidir (BP, 2017: 4). Nükleer teknolojiyi ülkeler, hem temiz elektrik üretiminde hem de yüksek seviyede bilimsel araştırmalarda, askeri, tıp ve tarım gibi alanlarda iyileştirme ve geliştirme çalışmalarında kullanabilmektedirler (Er ve Sunal, 2008: 193). Nükleer enerji, doğrudan sera gazı emisyonu olmayan az sayıda, ekonomik olarak uygulanabilir baz yüklü elektrik üretim teknolojilerinden biridir. Nükleer enerji, enerji sektöründe mevcut CO₂ emisyon seviyesinin yaklaşık % 8'inin üretimini engellemiştir (Yim, 2006: 504).

Petrole olan bağımlılığın azaltılmasında önemli bir kaynak olan nükleer enerjinin kullanımı, gelişmiş batı ülkelerinde daha yaygındır. Özellikle gelişmiş ülkeler, petrole olan bağımlılığı azaltmak için nükleer santralleri devreye almıştır. Petrol ve doğal gaz gibi hidrokarbon enerji kaynaklarından yoksun ve enerjide dışa bağımlı ülkelerin, nükleer enerji kullanımı önemli hale gelmektedir. Dünyada

nükleer enerji kullanımı 1950’li yıllardan bu yana artarak gelişmektedir. Özellikle 1970’lerin başında dünyada yaşanan petrol krizi batılı ülkelerin nükleer enerjiye olan talebini arttırmıştır (BP, 2017:4). 1980’li yılların başlarında dünyanın farklı ülkelerinde nükleer enerji yatırımları hız kazanmıştır. 1980’lerin sonunda petrol piyasasında meydana gelen iyileşme sonucu nükleer santral yatırımları yavaşlamıştır (Akova, 2016: 97). Petrol fiyatlarında yaşanan düşüş, 1979 (Three Mile Island-ABD) ve 1986 (Çernobil- Ukrayna) yıllarında yaşanan nükleer kazalar ve doğal gazın enerji sektörüne girmesi, 1990’lı yıllarda nükleer enerjinin gelişmesini azaltmışsa da günümüzde işletmede ve inşa halinde olan reaktör sayısı azımsanmayacak bir boyuttadır. 2011 yılında Fukushima Daiichi nükleer santral kazası nükleer enerjiyle ilgili tartışmaları arttırmışsa da dünya devletleri nükleer enerjiden kolay kolay vazgeçememektedir. Dünya enerji görünümü hızla değişmekte, nükleer ve hidroelektrik enerjiyle birlikte yenilenebilir enerjinin rekabet gücünde hızlı gelişmeler yaşanmaktadır (BP, 2017: 4).

2. Global Nükleer Enerji Üretimi

Enerji talebini karşılayacak önemli enerji kaynakları olan petrol ve doğal gaz fiyatlarında yaşanan artışlar, dalgalanmalar ve spekülasyonlar, dünyanın sınırlı enerji kaynakları ve rezervleri üzerinde ne kadar kırılgan ve bağımlı olduğunu göstermektedir. Nispeten ucuz enerji ve istikrarlı fiyatlar dönemi bitmiştir (Duffey, 2005: 537). Beşeri ve iktisadi ilerleme yönünden enerji yaşamsal bir ehemmiyet taşımakla birlikte kalkınmanın sürdürülebilirliği için de hayati bir bileşendir. Günümüzde enerji kaynaklarının sınırlı olması, fosil enerji kaynaklarının dünya üzerinde dengeli dağılmaması, bununla birlikte bazı ülkelerin zengin hidrokarbon kaynaklara sahip olmaması nedeniyle nükleer enerji bir ihtiyaç haline gelmiştir. Dünya ülkelerinden bir kısmı zengin hidrokarbon kaynaklara sahip iken, özellikle sanayide gelişmiş ülkelerin enerji kaynakları açısından fakir olması bu ülkelerin yeni enerji kaynaklarına yönelmesine neden olmuştur. Bu enerji kaynaklarından biri de nükleer enerjidir (Çelik vd., 2015: 56). Dünyada nükleer enerjinin elde edilmesinde hammadde olarak özellikle uranyum kullanılmaktadır. İlk kez 1789’da keşfedilen uranyum (Tümertekin ve Özgüç, 2015: 384) önceleri bilimsel amaçla daha sonra ise radyum elde etmek için çıkartılmıştır (Karabulut, 2003: 131). Uranyumun büyük miktarda çıkarımı, ABD ve İngiltere’nin askeri programına bir tepki olarak 1942’de Kanada’da başlatılmıştır. Uranyum yer kabuğunda geniş alanlara dağılmış olmakla birlikte işletilmeye alınan yerler belli başlı ülkelerdedir (Tümertekin ve Özgüç, 2015: 384). Uranyum kaynaklarının dağılımında dünyada bir orantısızlık vardır. Dünyada bilinen uranyum rezervinin 1 milyon 664 bin tonu, dünya uranyum rezervlerinde ilk sırada yer alan Avustralya’da, 745 bin tonu Kazakistan’da, 509 bin tonu Kanada’da ve 507 bin tonu ise Rusya’da bulunmaktadır (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 10). Bu ülkeleri Güney Afrika, Nijer, Brezilya, Çin, Namibya, Moğolistan, Özbekistan, Ukrayna ve diğer ülkeler takip etmektedir (Çizelge 1). Nükleer santrallerin talebi çok yüksek olmadığından uranyum sınırlı sayıda ülkede ve sınırlı miktarda işletilmektedir (Tümertekin ve Özgüç, 2015: 384). Almanya, Çekya, İngiltere, Özbekistan, Demokratik Kongo Cumhuriyeti uranyumun işletildiği diğer ülkelerdir (Doğanay ve Coşkun, 2017: 268).

Çizelge 1. Dünya uranyum rezerv durumu (2016 yılı)

Ülke	Rezerv (Ton)	Dünyadaki Payı (%)
Avustralya	1.664.100	29
Kazakistan	745.300	13
Kanada	509.000	9
Rusya	507.800	9
Güney Afrika	322.400	6
Nijer	291.500	5
Brezilya	276.800	5
Çin	272.500	5
Namibya	267.000	5
Moğolistan	141.500	2
Özbekistan	131.100	2
Ukrayna	115.800	2
Botsvana	73.500	1
ABD	62.900	1
Tanzanya	58.100	1
Ürdün	47.700	1
Diğer Ülkeler	232.400	4
Toplam	5.718.400	100

Kaynak: Red Book 2016 ve IAEA, 2017

IAEA'nın (Uluslararası Atom Enerji Ajansı) 2016 yılı verilerine göre; dünya uranyum üretiminde en büyük pay sahibi % 39 ile Kazakistan'dır. Kazakistan'dan sonra % 22 üretim payıyla Kanada ve % 10 ile Avustralya dünya uranyum üretiminde önde gelen ülkelerdir. Dünya toplam uranyum üretiminin % 71'ini bu üç ülke gerçekleştirmektedir. 2016 yılında Kazakistan'da gerçekleşen uranyum üretimi 24.575 ton, Kanada'da 14.039 ton, Avustralya'da 6.315 ton, Rusya'da 3.004 ton, Nijer'de 3.477 ton, Namibya'da 3.315 ton, ABD'de 1.125 ton olmuştur (Çizelge 2). Fransa'nın uranyum üretimi 2009'da 8 ton iken, 2015 yılında bu 2 tona düşmüş olmakla birlikte 2016 yılında üretimi bulunmamaktadır (OECD, NEA ve IAEA, 2017). 2017 yılı verilerine göre Türkiye'de yapılan araştırmalar sonucu uranyum rezervinin 12.614 ton olduğu tespit edilmiştir (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 11-13).

Çizelge 2. Dünya uranyum üretiminin miktarı ve oransal dağılımı (2016 yılı)

Ülke	Miktarı (Ton)	Oranı (%)
Kazakistan	24.575	39
Kanada	14.039	22
Avustralya	6.315	10
Rusya	3.004	5
Nijer	3.477	5
Namibya	3.315	5
Özbekistan	2.404	4
Çin	1.616	2
ABD	1.125	2
Ukrayna	1.005	2
Diğer	1.491	4
Toplam	62.366	100

Kaynak: OECD NEA 2016; Eroğlu ve Şahiner, 2017

Nükleer santral kuran ülkelerin bir kısmı aynı zamanda uranyum zenginleştirme tesislerini de inşa etmişlerdir. Uranyum zenginleştirme işlemleri zor ve bu işlem için yüksek derece enerji harcamaya gereksinim olduğundan, bu tesisleri kuracak ülkelerin büyük bir enerji programına ve enerji santrallerine sahip olması gerekmektedir. Dünyada uranyum zenginleştirme tesisleri bulunan ülkeler; Almanya, Hollanda, Japonya, ABD, İngiltere, Rusya ve Çin şeklinde sıralanmaktadır (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 5).

Nükleer enerji üretiminde toryum hammadde olarak kullanılan diğer bir kaynaktır. 2016 yılı verilerine göre dünya toryum rezervlerinin yaklaşık 6,35 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Dünya toryum rezervlerinde Hindistan, Brezilya, Avustralya, ABD, Mısır, Türkiye ve Venezuela önde gelen ülkelerdir (Çizelge 3) (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 20-21).

Çizelge 3. Dünya toryum üretiminin miktarı ve oransal dağılımı (2016 yılı)

Ülke	Miktarı (Ton)	Oranı (%)
Hindistan	846.000	13
Brezilya	632.000	10
Avustralya	595.000	9
ABD	595.000	9
Mısır	380.000	6
Türkiye	374.000	6
Venezuela	300.000	5
Kanada	172.000	3
Rusya	155.000	2
Güney Afrika	148.000	2
Çin	100.000	2
Norveç	87.000	1
Grönland	86.000	1
Finlandiya	60.000	1
İsveç	50.000	1
Kazakistan	50.000	1
Diğer Ülkeler	1.725.000	28
Toplam	6.355.000	100

Kaynak: Eroğlu ve Şahiner, 2017: 20-21

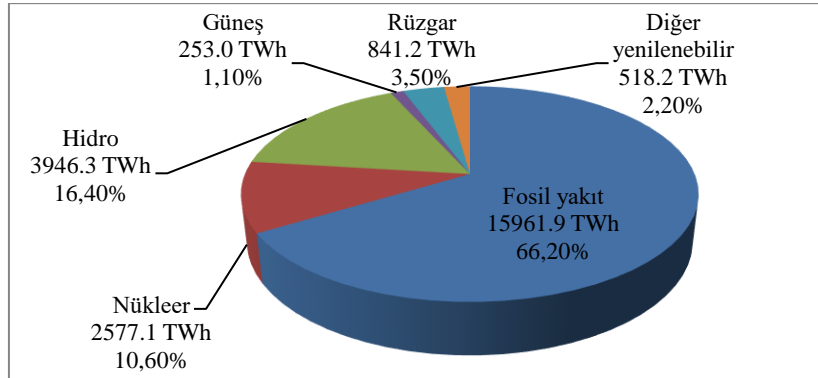
Japonya’da 2011’de yaşanan tsunami felaketi, Fukuşima Nükleer santralinde kazaya yol açmış, nükleer santralden vazgeçemeyen ülkelerin bir kısmı santrallerinde uranyumdan daha az tehlikeli toryuma yönelmişlerdir. Hindistan, Kanada, Çin, ABD ve Norveç gibi ülkeler elektrik üretiminde toryumun kullanılması için projeler geliştirmektedirler. Bu alandaki en büyük ilerlemeyi Hindistan göstermektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 23). Nükleer enerji atom çekirdeğindeki reaksiyonlar sonucu oluşmakta, Fısyon-Nükleer parçalanma, Füzyon-Nükleer kaynaşma tepkimeler ve radyoaktif bozunma meydana gelmektedir. Atomun parçalanması sonucu, kömürün yanması ya da suyun moleküllerine ayrılması gibi kimyasal reaksiyonlarla kıyaslanamayacak büyüklükte bir enerji açığa çıkmaktadır (Er ve Sunal, 2008: 194).

Nükleer fısyon 50 yıldan fazla bir süredir kullanılmakta olan olgun bir teknolojidir. Nükleer santraller için yeni tasarımlar, gelişmiş güvenlik ve performans sunduğu için bu deneyim, yeni santrallerin inşası ve önümüzdeki birkaç yıl içinde daha geniş dağıtım için hazırdır. Nükleer enerji teknolojisindeki yeni gelişmeler sürdürülebilir bir enerji geleceği nedeniyle nükleerin rolünü geliştirmek için büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Hükümetler, özel sektör yatırımı teşvik etmek için nükleer konusunda net ve tutarlı politikalar belirlemelidir. Bununla birlikte, nükleer enerjinin hızlı bir genişleme göstermesi için önemli engeller devam etmektedir (IEA, 2016). Bu engelleri ortadan kaldırmak için gelişmiş teknolojilerle nükleer santrallerde yeni bir döneme geçilmektedir. Günümüzde neredeyse tüm nükleer reaktörler teknik olarak termal nötron reaktörleri olarak sınıflandırılmıştır. Bu nükleer reaktör, teknolojiye olgunlaşmış, emniyet açısından yüksek olduğu gibi yatırım ve elektrik üretimi maliyetleri

de düşüktür. Termal nötron reaktörü, uranyum kullanım oranı çok düşük reaktör türü olarak dikkat çekmektedir (Yan vd., 2011: 747).

1974'te dünyadaki nükleer santrallerde 245.100 kWh'lik elektrik enerjisi üretilirken 1999'da nükleer santral sayısı 434'e elektrik üretimi 2.524 milyar kWh'ya yükselmiş ve nükleerin dünya elektrik üretimindeki payı belirgin bir şekilde artış göstermiştir (Karabulut, 2003: 131-132). 2009 yılında kurulu nükleer güç, 374,127 MWe'ye erişmiş, toplam küresel güç kapasitesinin yaklaşık % 8'ine denk gelerek 2560 TWh elektrik üretimi sağlamıştır (Yan vd., 2011: 743). Günümüzde kurulu nükleer güç, 400,125 MWe'dir ve nükleer enerji dünya elektriğinin %11'ini üretmektedir (IAEA-PRES, 2019). 1990'dan bu yana, nükleer santral performansında, enerji bulunabilirlik faktörü tarafından ölçülen önemli bir gelişme olmuştur. Aynı dönemde, birkaç ülkede nükleer santraller, teknik güncellemeler sonucunda lisanslı güç çıkışlarını artırmıştır. Bu faktörler, reaktör sayısı az olsa da nükleer elektrik üretiminin artmasına yol açmıştır (NEA, 2012: 10).

2014 yılında dünya elektrik üretimindeki en büyük pay %66.2 ile fosil yakıtların olmuştur. Hidroelektrik santrallerinden sağlanan enerji %16.4, nükleer santrallerden sağlanan enerji ise % 10.6'dır. Biyo-yakıtlar ve atıklar elektrik üretiminde %2.2'lik bir paya sahipken, güneş ve rüzgar enerjisinin payı ise % 4.6'dır (Şekil 3) (IEA, 2015).



Şekil 3. Dünya enerji üretiminde kaynakların payı (2014)

Nükleer enerjiyi en fazla üreten ve tüketen birinci ülke olmasına rağmen, ABD'nin elektrik enerjisi üretiminde nükleerin payı 2013'te %20.2'dir. Bu ülkeyi Rusya, Japonya, Güney Kore ve Almanya izlemiştir. 2017 yılı itibarıyla toplam elektrik enerjisindeki payı bakımından Fransa % 72 ile ilk sıradadır. Daha sonra % 55 ile Ukrayna, % 54 ile Slovakya, % 50 ile Macaristan, % 50 ile Belçika, % 40 ile İsveç, % 39 ile Slovenya ve diğer ülkeler gelmektedir (Çizelge 4) (IAEA, 2016-2019). Fransa tükettiği elektriğin yaklaşık dörtte üçünü nükleer enerjiden sağlarken, Belçika, Çek Cumhuriyeti, Macaristan, Slovakya, İsveç, İsviçre, Slovenya ve Ukrayna üçte bir oranında ya da daha fazlasını nükleerden elde etmektedir. ABD, İngiltere, İspanya ve Rusya da tükettiği elektriğin neredeyse beşte birini nükleerden sağlamaktadır. Japonya, elektriğin dörtte birinden fazlasına nükleer enerjiden üretmektedir (WNA, 2014).

Çizelge 4. Elektrik tüketiminin ¼'ünden fazlasını nükleer enerjiden sağlayan ülkeler, 2015-2017

Nükleer Enerjiyi En Yoğun Kullanan Ülkeler	Toplam Elektrik Üretimdeki Nükleer Payı (%) 2015 Yılı	Toplam Elektrik Üretimdeki Nükleer Payı (%) 2017 Yılı	Nükleer Enerjiyi En Yoğun Kullanan Ülkeler	Toplam Elektrik Üretimdeki Nükleer Payı (%) 2015 Yılı	Toplam Elektrik Üretimdeki Nükleer Payı (%) 2017 Yılı
Fransa	76	72	İsveç	34	40
Ukrayna	57	55	Finlandiya	34	33
Slovakya	56	54	İsviçre	34	33
Macaristan	53	50	Çek Cum.	33	33
Belçika	38	50	Bulgaristan	31	34
Slovenya	38	39	Güney Kore	32	27
Ermenistan	35	33			

3. Nükleer Enerji Santrallerinin Coğrafi Dağılışı

Nükleer enerjinin kullanılması 20. yüzyılda enerji alanında büyük bir başarıydı. O günden beri nükleer enerji, özellikle Amerika, Japonya ve Fransa gibi gelişmiş ülkelerde ve birçok gelişmekte olan ülkede önemli bir elektrik enerjisi kaynağı olarak kendini göstermektedir (Akbaş, 2013: 22). Nükleer enerji santrallerinin ilk kuruluş ve devreden çıkarma maliyetleri yüksek olmasına karşın işletme ve yakıt maliyetinin ucuzluğu elektrik üretimindeki maliyeti düşürmektedir (Önder ve Gündüz, 2017: 119). Nükleer santrallerdeki yakıt maliyetinin toplam üretim maliyetlerindeki oranı % 5-10 seviyesinde iken, kömür ve doğal gaz gibi yakıtlarla çalışan santrallerdeki yakıt maliyetinin toplam maliyetteki oranı % 55-60 seviyelerinde seyretmektedir (Köksal ve Civan, 2010: 120). Düşük yakıt maliyeti artan verimlilikle daha da aşağı seviyelere inmektedir. İspanya'da 1995-2001 yılları arasında nükleer enerji kaynaklı elektrik üretim maliyeti verimlilikle birlikte % 29 oranında azalmıştır (Önder ve Gündüz, 2017: 119). Nükleer enerjiyi kullanarak elektrik üretimi ilk kez 1950'lerin başında ortaya çıkmış ve ilk büyük ölçekli nükleer enerji santralleri 1960'tan önce faaliyete geçmiştir. Bu yeni enerji kaynağını elektrik üretimi için kullanan ilk ülkeler eski SSCB (1954), Birleşik Krallık (1956), ABD (1957) ve Fransa (1963) olmuştur. Daha sonra bu ülkeleri 1960'ların başında Belçika, Kanada, Almanya, İtalya, Japonya ve İsveç de dahil olmak üzere diğer ülkeler takip etmiştir (NEA, 2012: 7).

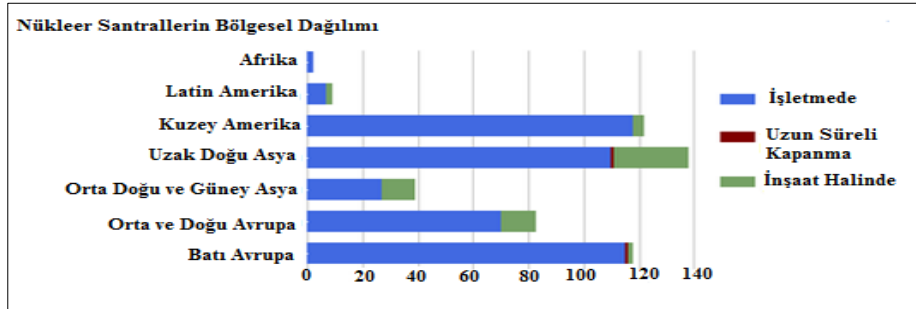
Nükleer güce olan ilgi özellikle gelişmekte olan ekonomiler ve enerji ihtiyacı olan ülke ve bölgeler için büyük önem taşır. Gelişen dünyada nüfus ve artan elektrik talebindeki artışlar, CO₂ emisyonlarından kaçınma, enerji güvenliği ve fosil kaynakların fiyatlarındaki hareketlilik uzun dönemde nükleer enerjinin, enerji kaynakları içinde önemli bir rol oynamaya devam edeceğini göstermektedir (IAEA, 2015: 16). Önceki yıllarda yakın ve uzun vadeli büyüme ve genişleme beklentileri merkezi Asya'da özellikle Çin'de yaşanmıştır. 2004 yılından 2014 yılına kadar yapım aşamasındaki toplam reaktör sayısı Asya'da 46'dır, son 40 yeni reaktörün 32'si şebekeye bağlanmıştır (IAEA, 2015: 12). Önder ve Gündüz (2017) tarafından yapılan çalışmada Hindistan, Hollanda, Japonya, Kore, İsviçre ve İsrail gibi ülkelerde nükleer enerjinin reel GSYH'yi etkilediği sonucuna varılmıştır. Wolde-Rufael (2010) yaptıkları çalışmada 1969-2006 yıllarında Hindistan'ın ekonomik büyümesinde nükleer enerji tüketiminin pozitif etkisini ortaya koymuştur (Şimşek ve Aydın, 2018: 730). Dolayısıyla nükleer enerji ekonomik büyümeyi etkilemekle birlikte enerji arz güvenliği açısından da stratejik öneme sahip bir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Bu kaynağa sahip ülkeler diğer ülkelere nazaran iktisadi ve siyasi bakımdan bir üstünlük elde edebilmektedirler (Akbaş, 2013: 22). Nükleer enerji artık enerji güvenliği, arzı ve sürdürülebilirliği için önemli bir katkı kaynağı olarak görülmektedir (Duffey, 2005: 542).

Dünya Nükleer Ajansı (WNA) istatistik verilerine göre, 1 Nisan 2010 itibarıyla, dünya nükleer reaktörlerinin inşa aşamasında olan, planlanan ve teklif edilen nükleer güç sayısı artmıştır. Kuzey Amerika, Avrupa ve Doğu Asya'da nükleerden elde edilen elektrik üretimi, dünyanın en fazla %98'ini teşkil etmiştir ve çoğunlukla güney yarımkürede bulunan diğer bölgelerde %2'ye karşılık gelmektedir. Batı Avrupa'da toplam birincil enerji arzındaki nükleer enerji payı %13'e ulaşmış ve dünyadaki ilk sırada yer almıştır. Kuzey Amerika ise %9'luk pay sahibi olmuştur. OECD ülkeleri için bu oran %10 iken gelişmekte olan ülkelerin payı %1'den azdır (Yan vd., 2011: 743). 2004 yılından 2014 yılına kadar geçen zaman içinde dünyada toplam 70 nükleer reaktör yapım aşamasında bulunmaktadır. Bu reaktörlerin 35'i Uzak Doğu Asya'da, 15'i Orta ve Doğu Avrupa'da, 11'i Orta Doğu ve Güney Asya'da, 5'i Kuzey Amerika'da, 2'ser tanesi ise Latin Amerika ve Batı Avrupa'da inşa edilmektedir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Dünyada yapım aşamasında olan nükleer reaktör sayılarının bölgelere dağılımı (2004-2014)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Latin Amerika	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
Kuzey Amerika	0	0	0	1	1	1	1	1	1	5	5
Uzak Doğu Asya	9	7	9	13	21	30	38	35	37	38	35
Orta Doğu ve Güney Asya	10	10	9	8	8	7	8	9	10	10	11
Orta ve Doğu Avrupa	7	7	8	10	12	16	17	16	14	15	15
Batı Avrupa	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
Toplam	27	26	28	35	35	57	68	65	66	72	70

2017 yılında 11 yeni nükleer güç santrali işletmeye alınmıştır. Bölgeler bazında değerlendirildiğinde Kuzey Amerika, Batı Avrupa, Uzak Doğu Asya'daki işletmede olan nükleer santrallerin sayısı birbirine yaklaşmıştır. Batı Avrupa ve Uzak Doğu Asya'da uzun süreli kapanma durumunda olan güç santralleri bulunmakla birlikte özellikle Uzak Doğu Asya başta olmak üzere Orta Doğu ve Güney Asya, Orta ve Doğu Avrupa'da inşaat halinde olan nükleer santral sayısı da fazladır (Şekil 4).



Şekil 4. Dünyadaki nükleer santrallerin bölgesel dağılımı, 2017

2011 ila 2013 yılları arasında dünyada farklı ülkelerde nükleer santral inşaatı başlamış, ilk nükleer santral siparişleri verilmiş, nükleer santraller için alt yapı için kararlar alınmış, dikkate alınan nükleer güç programları için bu üç yıllık süre içinde rakam sırasıyla 14, 13 ve 19 olmuştur (Çizelge 6) (IAEA, 2013: 17).

Çizelge 6. 2011- 2013 yıllarında nükleer güce karar verme ve planlama gibi farklı aşamalarda olan ülke sayıları

Yıllar	2011	2012	2013
İlk nükleer santral inşaatının başlaması	0	1	2
İlk nükleer santral siparişi	3	2	1
Alt yapı için karar verilmesi ve hazırlamaya başlanması	6	6	6
Aktif hazırlık için verilen nihai karar	6	6	5
Dikkate alınan nükleer güç programı	14	13	19

Uluslararası Atom Enerji Kurumu, üye devletlerin yeni nükleer güç programlarını güvenli bir şekilde yapmalarında, var olanı geliştirmelerinde sorumlu bir tavır sergileyerek yardımcı olmakta kararlıdır. Özellikle üye devletlerden Endonezya, Ürdün, Malezya, BAE, Vietnam ve Bangladeş; Nükleer yasa, yönetmelik geliştirilmesi ve gözden geçirilmesi ve seçilen yerlerin değerlendirilmesinde kurumdan destek almıştır (IAEA, 2013: 17). 2013 yılında dünyada farklı ülkeler kendi nükleer santrallerini yapmak için önemli ilerlemeler kat etmiştir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı ile yakın temasta olan BAE, büyük bir halk desteğiyle nükleer enerji programı başlatmıştır. 2013 yılı Mayıs ayında BAE Barakah'ta ilk nükleer ünitenin yapımına başlamıştır (IAEA, 2015: 13). BAE, Güney Koreli bir konsorsiyumdan 20 milyar dolarlık bir teklifi kabul ederek Barakah'da dört adet nükleer güç reaktörü inşa etmektedir. Ünite 1'in yapımı tamamlanmış ve 2019 yılının sonu veya 2020 yılının başlarında işletmeye alınması hedeflenmektedir (WNA, 2018f). 2013 yılı Kasım ayında Belarus Ostrovets'de ilk nükleer enerji santralinin yapımına başlanmıştır. Belarus, 2010-2013 yılları arasında nükleer santral yapımına başlanan ikinci ülkedir. Rusya'nın Atomstroyexport şirketi tarafından finanse edilen nükleer santralin 2019 yılından itibaren işletmeye alınması planlanmaktadır (WNA, 2018g). Bangladeş ve Rusya arasında 2011 yılında yapılan hükümetler arası antlaşmanın ardından 2013 yılında iki üniteli Rooppur nükleer santrali için hazırlık çalışmalarına başlanmıştır. Bangladeş, ilk nükleer güç reaktörü olan Rooppur 1'in inşaatına Kasım 2017'de, ikinci birimin inşaatına ise Temmuz 2018'de başlamıştır. Rooppur 1'in 2023 yılında devreye alınması beklenmektedir. Artan bir güç talebine sahip olan ülke, doğal gazla olan bağımlılığını azaltmayı hedeflemektedir (WNA, 2018h).

Arjantin'de küçük bir integral tip hafif basınçlı su reaktörü tasarlanmıştır. Polonya'nın Bakanlar Kurulu, 6000 MWe enerji kapasiteli nükleer santralin 2024 yılına kadar faaliyete geçmesini onaylamıştır. Vietnam, Ninh Thuan içinde toplam kapasitesi 4000 MWe olan NNPs için iki yerin fizibilite çalışmalarını tamamlamıştır. Ürdün ilk tesisi için tercih edilen tedarikçi olarak Rus Atomstroyexport şirketini seçmiş, ortak yapılacak santral için Amra'nın karakterizasyonu üzerinde çalışmaya başlamış, 2014 yılında Ürdün nükleer altyapısı ile ilgili çalışmalarda ilerleme kaydetmiştir. 2014 yılında 5 yeni reaktör şebekesine bağlanmıştır: Arjantin'de Atucha-2 (692 MWe), Çin'de Ningde-2 (1018 MWe), Fuqing-1 (1000 MWe) ve Fangjiashan-1 (1000 MWe) Rusya Federasyonu'nda Rostov-3 (1011 MWe). Güney Kore'de ise son 18 yılda nükleer santral sayısı 2,5 kat artmıştır. Güney Kore'nin 1997 yılındaki nükleer güç ünitesi sayısı 10 iken bu rakam 2013'te 23, 2016'da ise 25'e yükselmiştir (IAEA, 2015: 12).

2017 yılında özellikle ABD ve AB ülkeleri başta olmak üzere 449 nükleer santral işletmede iken bu rakam 2019 yılının ocak ayında 454'e yükselmiştir. İşletmedeki bu santrallerin toplam kapasitesi 2017 yılında 392.116 MWe iken 2019 yılında işletmede olan nükleer santrallerin toplam kapasitesi 400,125 MWe'dir. 2017 yılında dünyada 60,460 MWe kapasiteli 59 reaktör yapım aşamasında bulunurken, inşaatı tamamlanan 4 reaktörün işletmeye alınmıştır. 2019 yılının Ocak ayında dünya

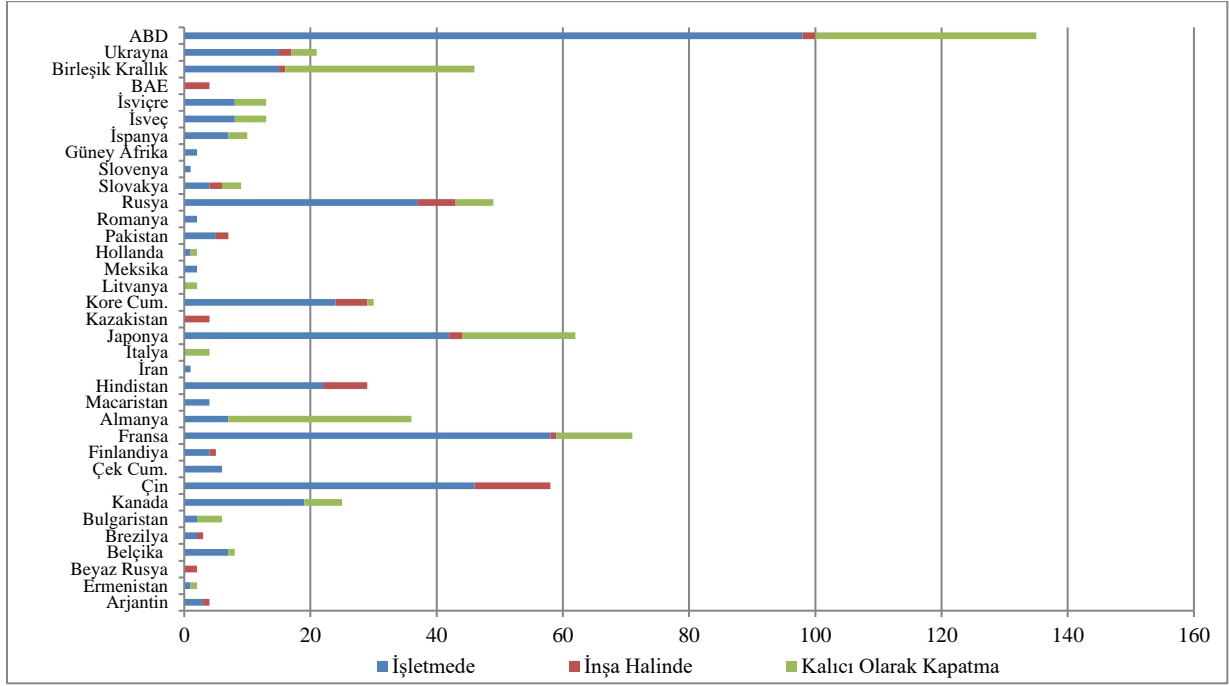
ülkelerinde inşaatı devam eden reaktör sayısı 55'tir (56,643 MWe) (Çizelge 7). 2019 yılına kadar dünyada kalıcı olarak kapatılmış olan toplam nükleer güç reaktörü sayısı ise 169'dur. İşletmeye alındıktan sonra süresinin dolması veya başka sebeplerle kapatılan nükleer santrallerin en fazla; ABD, Birleşik Krallık, Almanya, Japonya ve Fransa'da olması dikkat çekicidir (Çizelge 8) (Şekil 5) (NEİ, 2017; IAEA/PRIS, 2019; WNA, 2019).

Çizelge 7. Dünyada inşaatı devam eden nükleer santraller (2017 ve 2019 yılları)

Ülkeler	2017	2019
Arjantin	1	1
Bangladeş	1	2
Belarus	2	2
Brezilya	1	1
Çin	19	12
Finlandiya	1	1
Fransa	1	1
Hindistan	7	7
Japonya	2	2
Güney Kore	4	5
Pakistan	2	2
Rusya	7	6
Slovakya	2	2
BAE	4	4
Ukrayna	2	2
ABD	2	2
Tayvan	1	1
Birleşik Krallık	-	1
Türkiye	-	1
Toplam	59	55

Çizelge 8. Dünyada kalıcı olarak kapatılmış olan nükleer santrallerin ülkelere göre dağılımı ve net elektrik kapasitesi (2019)

Ülkeler	Nükleer Santral	Toplam Net Elektrik Kapasitesi (MW)
Ermenistan	1	376
Belçika	1	10
Bulgaristan	4	1,632
Kanada	6	2,143
Fransa	12	3,789
Almanya	29	16,860
Japonya	18	9,046
Kazakistan	1	52
Güney Kore	1	576
Litvanya	2	2,370
Hollanda	1	55
Rusya	6	1,171
Slovakya	3	909
İspanya	3	1,067
İsveç	5	2,321
İsviçre	1	6
Ukrayna	4	3,515
Birleşik Krallık	30	4,715
ABD	35	15,046
İtalya	4	1,423
Tayvan, Çin	2	1,208
Toplam	169	68,290



Şekil 5. Ülkelerin nükleer güç sayıları 2019

Kaynak: IAEA/PRIS, 2019

31 Aralık 2017 yılı itibarıyla 79,134 MWe kapasiteli 86 reaktörün inşaatının yapılması planlanmıştır. Planlanan nükleer santrallerini 31'i Çin'de, 22'si Rusya'da, 9'u Japonya ve 8'si ise ABD'de yer almaktadır (Çizelge 9) (IAEA/PRIS, 2019).

Çizelge 9. Dünyada inşaatı planlanan nükleer reaktörler (2017)

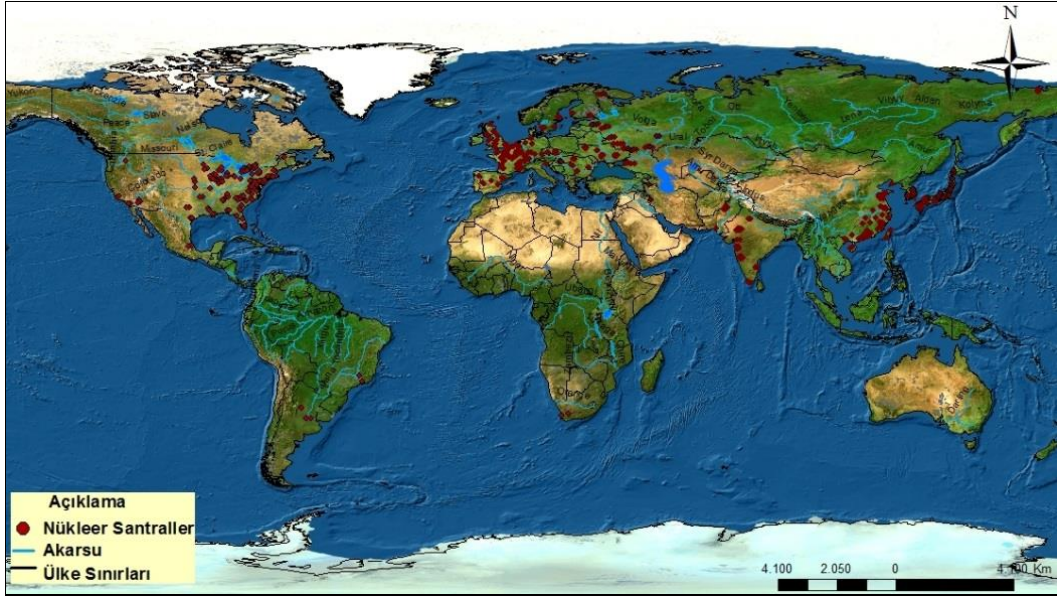
Ülkeler	Reaktör Sayısı
Bangladeş	1
Çin	31
Finlandiya	1
Macaristan	2
Hindistan	2
İran	3
Japonya	9
Güney Kore	1
Rusya	22
Türkiye (Akkuyu)	4
Birleşik Krallık	2
ABD	8
Toplam	86

1997 yılından 2017 yılına kadar dünyada nükleer santral sayısı büyük oranda artan ülkeler Çin, Hindistan, Güney Kore ve Rusya'dır. Nükleer güç sayılarının en fazla olduğu ülke ABD iken, ikinci ülke ise Fransa'dır. Nükleer santrallere sahip ülkeler sıralamasında Çin, Japonya, Rusya, Güney Kore ve Hindistan önde gelmektedir (Çizelge 10) (IAEA, 2015-2016-2017; IAEA-PRIS, 2019; WNA, 2019).

Çizelge 10. Dünyada işletmede olan nükleer enerji santrali sayısı (1997-2019)

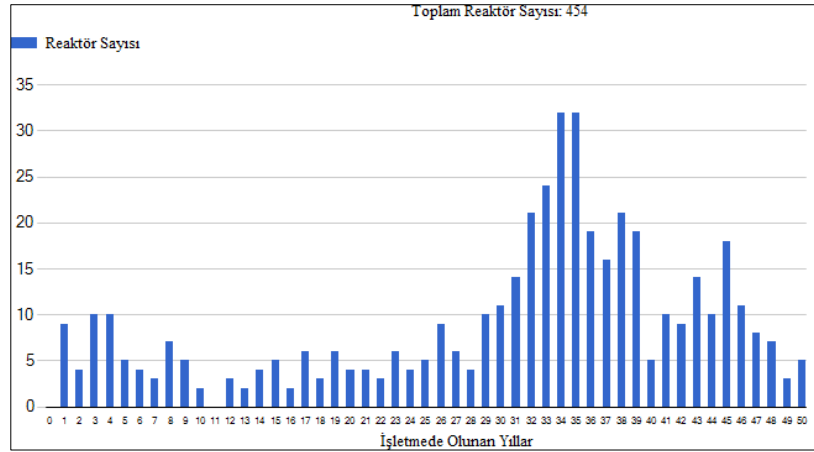
Ülke	Reaktör Sayısı 1997	Reaktör Sayısı 2013	Reaktör Sayısı 2014	Reaktör Sayısı 2016	Reaktör Sayısı 2017	Reaktör Sayısı 2019	Kurulu Güç 2017 [MWe]	Kurulu Güç 2019 [MWe]
Arjantin	2	2	3	3	3	3	1,667	1,667
Ermenistan	-	1	1	1	1	1	376	376
Belçika	7	7	7	7	7	7	5,943	5,943
Brezilya	1	2	2	2	2	2	1,884	1,884
Bulgaristan	6	2	2	2	2	2	1,926	1,926
Kanada	22	19	19	19	19	19	13,553	13,553
Çin	3	17	23	33	39	46	34,514	42,800
Çek Cum.	4	6	6	6	6	6	3,932	3,932
Finlandiya	4	4	4	4	4	4	2,769	2,769
Fransa	54	58	58	58	58	58	63,130	63,130
Almanya	21	9	9	8	7	7	9,515	9,515
Macaristan	4	4	4	4	4	4	1,889	1,889
Hindistan	9	20	21	21	22	22	6,219	6,219
İran	-	1	1	1	1	1	915	915
Japonya	49	50	48	43	42	42	39,752	39,752
Güney Kore	10	23	23	25	24	24	22,494	22,494
Meksika	2	2	2	2	2	2	1,552	1,552
Hollanda	2	1	1	1	1	1	485	485
Pakistan	1	3	3	3	4	5	1,005	1,318
Romanya	-	2	2	2	2	2	1,300	1,300
Rusya	29	33	34	35	35	37	26,111	28,264
Slovakya	4	4	4	4	4	4	1,816	1,816
Slovenya	1	1	1	1	1	1	688	688
Güney Afrika	2	2	2	2	2	2	1,830	1,830
İspanya	9	7	7	7	7	7	7,121	7,121
İsveç	12	10	10	10	10	8	9,740	8,612
İsviçre	5	5	5	5	5	5	3,333	3,333
Ukrayna	15	15	15	15	15	15	13,107	13,107
Birleşik Krallık	33	16	16	15	15	15	8,883	8,883
ABD	108	100	99	99	99	98	99,869	99,333
Tayvan	6	6	6	6	6	4	5,052	3,719
Toplam	427	432	438	444	449	454	392,370	400,125

Günümüzde nükleer santrallerin sayısı ve yoğunluğu gelişmiş ülkelerde fazla iken, gelişmekte olan ülkelerde de nükleer santraller, hızla işletmeye alınmaktadır (Şekil 6). Nükleer enerji üreten ileri teknolojiye sahip olmayan gelişmekte olan ülkeler, bu teknolojiyi ithal ederek enerji üretme yoluna gitmektedir. Hindistan, Arjantin, Brezilya, Bulgaristan ve Ermenistan gibi gelişmekte olan ülkeler de nükleer enerjiyi kullanmakta ihtiyaç duydukları elektrik enerjisini büyük oranda bu yolla temin etmektedirler (Akova, 2016: 113).



Şekil 6. Dünyadaki nükleer santrallerin coğrafi dağılışı

2013 yılı sonu itibariyle dünya çapında faaliyet gösteren nükleer santrallerin % 80'den fazlası 20 yıl ve daha uzun işletme süresine sahiptirler (IAEA, 2013: 18). Günümüzde dünyada bulunan 454 nükleer reaktörden 225'inin 40 yıl ve daha fazla çalışma süresi olmuştur. ABD ve üye ülkelerin lisans yenileme başvurularına göre 40 yıl boyunca işletme ruhsatı, her yenileme uygulaması için en fazla 20 yıl ek süre verilebilmektedir (IAEA, 2019). ABD'de faaliyet gösteren 99 reaktörden 73'ü 2014 yılı sonu itibariyle 20 yıllık lisans yenileme almıştır (IAEA, 2015). Dünyada işletmede olan reaktörlerin büyük bir kısmı 30 yaşın altındadır (Şekil 7).



Şekil 7. 31 Aralık 2014 yılı itibariyle işletmede olan reaktörlerin yaş dağılımı.

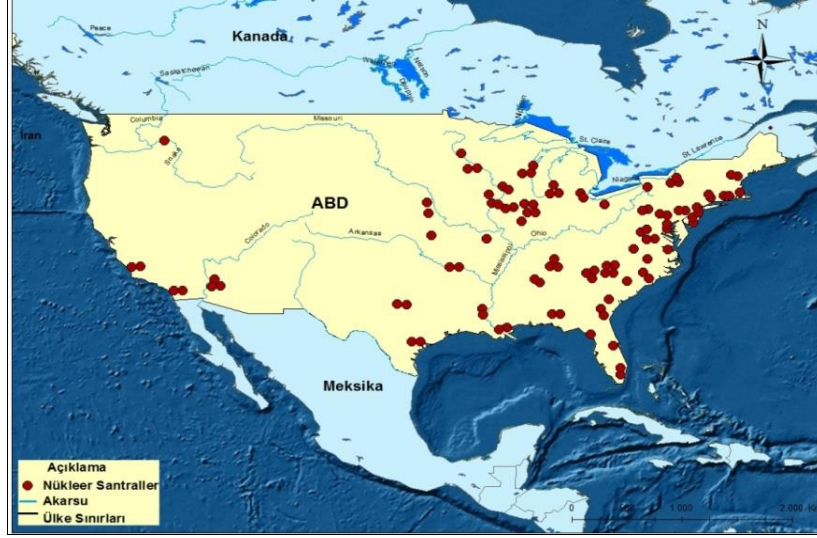
Kaynak: IAEA/PRIS, 2019

3.1. ABD'de Nükleer Enerji

Her ne kadar zengin rezervlere sahipse de ABD'nin hızlı bir şekilde büyümesi, hem kaynaklarını değerlendirebilme hem de oluşabilecek enerji dar boğazına karşı enerji üretiminde nükleer santrallere yer vermesine yol açmıştır (Sağdı, 2006). Elektrik enerjisi kaynağı olarak uranyum ve toryumu ilk kez değerlendiren ABD, nükleer enerji ile ilgili araştırmalara 1947'de başlamıştır (Doğanay ve Coşkun, 2017: 274). Nükleer enerji üretimi ile ilgili çalışmalara dünyada ilk kez ABD tarafından 1951 yılında

Idaho-Arco'da EBR-I Deneysel Reaktöründe başlanmıştır (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 8). ABD'de nükleer enerji santrali inşaatı ve bunlara karşılık gelen nükleer enerji tüketimi 1960'lı yıllarda çarpıcı biçimde artmış, 1970'lerin ortalarında nükleer santrallerin inşası yavaşlamıştır. Dahası, 1979'da Pennsylvania'daki Three Mile Island nükleer tesisinde meydana gelen kısmi çekirdek erimesi, federal düzenleyici standartların sıkılaştırılmasına ve nükleer santral yapımı için halkın muhalefetine artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, teknoloji ve operasyonel verimlilikteki gelişmeler, toplam reaktör kapasite faktörünü arttırmıştır. 1970'li ve 1980'li yıllara kıyasla, ulusal olarak işletmede daha az sayıda nükleer enerji santrali mevcut olmasına rağmen, ABD'deki elektrik arzının yaklaşık % 20'sinde gösterildiği gibi, bu tesisler daha fazla elektrik üretmektedir (Payne ve Taylor, 2010: 301-302).

ABD'de nükleer üretim kapasitesinin neredeyse tamamı, 1967-1990 yılları arasında inşa edilen reaktörlerden gelmektedir. 1990'lı yılların sonlarından bu yana ABD hükümet politikası değişiklikleri nükleer kapasitedeki önemli büyümenin önünü açmıştır. 1977'den 2013 yılına kadar yeni bir nükleer santral inşaat başlangıcı olmamıştır. 1970'ler ve 1980'ler boyunca gaz üretimi ekonomik açıdan daha çekici hale gelmiş, 1979'da Three Mile Island kazasının ardından artan güvenlik korkusuyla yeni nükleer santral yapımı durmuştur. 2007 yılında Tennessee Valley Authority (TVA) kararını takiben 2007 yılında bir başka PWR - Watts Bar 2 - inşaatına başlamıştır. 1980 yılında, nükleer santraller, ülkenin elektriğinin 251 milyar kWh'yi (% 11) üretmiştir. 2008 yılında, bu üretim 809 milyar kWh'ye ve elektriğin yaklaşık % 20'sine yükselmiş ve dünya çapında nükleer enerjiden üretilen elektriğin % 30'undan fazlasını sağlamıştır. Artışın büyük kısmı, 1977'den önce inşa edilmek üzere onaylanan 47 reaktörden gelmiştir. 1970'lerin sonlarında ve 1980'lerde ABD'nin nükleer üretim kapasitesini ikiye katlanmıştır. Geçen zaman zarfında ABD nükleer endüstrisi, mevcut tesislerde daha iyi yakıt ikmal, bakım ve güvenlik sistemleri ile santral kullanımında kayda değer kazanımlar elde etmiştir (WNA, 2018c). ABD'de 1997'deki nükleer santral sayısı 108 iken bazı işletme sorunları yüzünden kapatılan nükleer santraller sebebiyle sayı 2013'te 100'e 2014'te 99'a, 2018 yılında ise 98'e düşmüştür. ABD'nin 2016 yılındaki toplam elektrik üretimi 4079 TWh (milyar kWh)'dir. Bunun 1380 TWh (% 34) doğal gazdan, 1240 TWh (% 30) kömürle çalışan tesislerden, 805 TWh (% 19.7) nükleer, 266 TWh hidro, 226 TWh rüzgar ve 117 TWh diğer yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır. Nükleerden sağlanan elektrik, üretiminin yaklaşık % 20'sini oluşturmaktadır. ABD'de Ekim 2018 itibari ile inşa halinde olan 2500 MWe kapasiteli 2 nükleer santral bulunurken, planlama aşamasında 3100 MWe kapasiteli 2 büyük ve 12 küçük reaktör bulunmaktadır. 2020 yılından hemen sonra iki yeni ünitenin daha devreye girmesi beklenmektedir (WNA, 2018c). ABD'deki nükleer santraller özellikle ülkenin doğu kesiminde yoğunluk göstermektedir (Şekil 8).

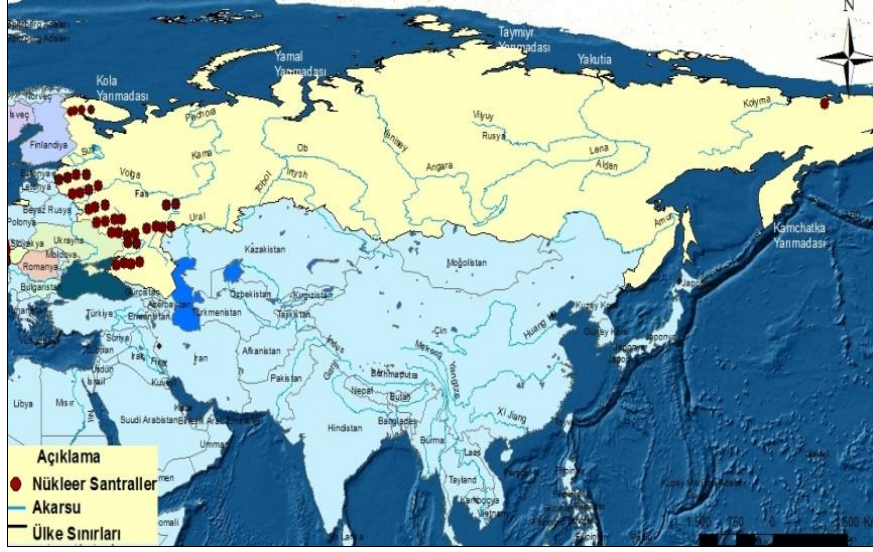


Şekil 8. ABD'deki nükleer santrallerin coğrafi dağılışı, 2018

3.2. Rusya'da Nükleer Enerji

Rusya, 1950 ve 1960'lı yıllarda nükleer enerjinin sivil gelişiminde dünya liderliğinde etkileyici adımlar atmaya başlamıştır. Dünyada ticari amaçlı elektrik üreten ilk nükleer işletme Rusya-Obninsk'de 1954 yılında işletmeye alınan 5 MWe elektrik üretimi yapan APS-I nükleer santralidir (Eroğlu ve Şahiner, 2017: 8). Bu önemli başarıdan sonra Rusya'da 1963-64 yıllarında ticari boyutlu ilk nükleer santraller işletmeye alınmıştır (Akova, 2016: 109). Bugünün üretim modelleri olan nükleer santraller 1971-1973 yıllarında devreye alınmıştır. 1980'lerin ortalarında Rusya'da işletmede bulunan nükleer santral sayısı 25 olmuştur. 1986 yılında yaşanan Çernobil kazası ülkedeki nükleer yatırımları yavaşlatmış, nükleer santrallerden vazgeçmeyen Rusya, 1990'ların ortasında yeni bir santrali işletmeye almıştır. Sovyetler Birliği'nin çöküşünü izleyen yıllarda ekonomik reformlar nedeniyle mali sıkıntı yaşayan ülkede nükleer yatırımlar durma noktasına gelmiştir. 1990'ların sonlarında İran, Çin ve Hindistan'a yönelik gerçekleşen reaktör ihracatı, nükleer yatırımları yeniden canlandırmıştır. Rusya'da 2001, 2004, 2010, 2011 ve 2014 yıllarında yeni reaktörler işletmeye alınmıştır. Nükleer kapasitede meydana gelen artış, ülkenin bir bütün olarak sosyo-ekonomik kalkınmasında olumlu etki yapmıştır (WNA, 2018a). Rusya, yeni reaktör teknolojilerini geliştirerek nükleer enerji ile ilgili yatırımlarda istikrarlı bir şekilde ilerlemektedir. Nükleer mal ve hizmet ihracatı, Rusya'nın dış politikası ve ekonomik hedefi olarak görülmektedir. Rusya, 20'den fazla nükleer güç reaktörünün ihracatı için planlama yapmış ve nükleer santrallerin inşasını onaylamıştır. Yabancı siparişler 2017'nin sonunda toplam 133 milyar doları bulmuştur (IAEA, 2018).

Rusya'daki nükleer santral sayısı 1997'de 29 iken bu rakam 2013 yılında 33'e, 2017'de 35'e yükselmiştir. Rusya'nın 2016 yılı elektrik üretimi, 1091 TWh iken bu üretimin 522 TWh'si (% 48) gazdan, 197 TWh (% 18) nükleer, 187 TWh (% 17) hidro ve 171 TWh (% 16) kömürden elde edilmiştir (WNA, 2018a). 2017 yılında Rusya'nın nükleerden elde ettiği toplam net elektrik kapasitesi ise 26 983 MWe olmuştur (IAEA, 2017a). IAEA'nın verilerine göre 2017 yılında Rusya'daki nükleer santral sayısı 35 iken 2019 yılında ise bu sayı 36 olmuştur (Şekil 9). Net elektrik kapasitesi 28,036 MWe olmakla birlikte inşa halinde olan 6 reaktör bulunmaktadır (IAEA, 2018).



Şekil 9. Rusya'daki nükleer santrallerin coğrafi dağılışı

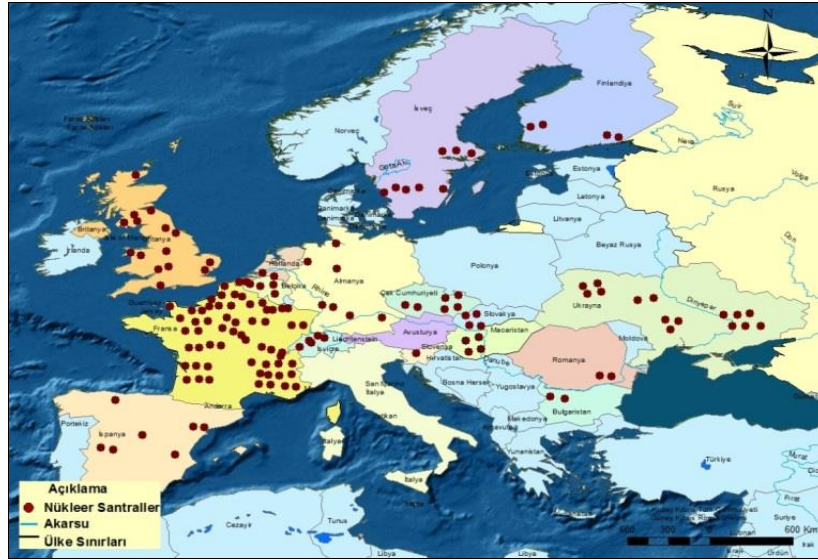
Rusya nükleer enerjiyi aynı zamanda alüminyum eritme işleminde, kuzey kutup bölgesindeki buzları kırmak ve kuzey denizinde petrol ve doğal gaz aramaları için de kullanmaktadır. Buzkıranların kapasitesinin ötesindeki çalışma koşullarına sahip nükleer güç ile ilgili yapılan çalışmalar, teknik ve ekonomik olarak nükleer enerjinin gerekli olduğunu kanıtlamıştır. 3 metre kalınlığa kadar buzun kırılması için gerekli güç seviyeleri, diğer tip gemiler için yakıt ikmali güçlükleri ile birleştiğinde önemli avantaj sağlamaktadır. Nükleer filo Kuzey Denizi güzergâhında yılda iki ila on ay, Batı Kutbunda yıl boyunca seyrüseferini arttırmıştır. Yamal yarımadasındaki gelişmeler ve daha doğuda buzkıran filosunun daha fazla kullanılması beklenmektedir. Filo ticari olarak kuzey ve açık deniz petrol ve doğal gaz gelişmeleri için de hayati önem taşımaktadır. Rusya, nükleer enerjiyle çalışan Arctic gemileri 1975 yılından bu yana kullanmaktadır. 2015 yılına kadar çalışma süresi 38 yıl olan yedi veya sekiz yüzer nükleer enerji santralin kurulması planlanmıştır. Kamçatka yarımadasında Vilyuchinsk'teki deniz üssüne sürdürülebilir elektrik ve ısı tedariki sağlamak amacıyla nükleer güç santrali kurulmuştur. 2009 yılı başında, Yakutia'nın güneyindeki Elkon Uranyum Madencilik Projesi ile bağlantılı olarak kuzey Yakutia için dört yüzer tesis belirlenmiştir. Beş offshore petrol ve gaz sahasının geliştirilmesi için Gazprom tarafından kullanılmak üzere, Finlandiya'ya yakın Kola yarımadasında ve merkezi Sibirya'da Yamal yarımadasında işletmeler tasarlanmıştır. Tasarlanan bu işletmelerin ömrü 40 yıl, olası uzatma süreleriyle 60 yıl olarak planlanmıştır (WNA, 2018a).

3.3. AB ülkelerinde Nükleer Enerji

Avrupa ülkeleri 1954'te ilk kez nükleer enerji santrallerinden faydalanmaya başlamış, 1970'lerde küresel ölçekte yaşanan petrol krizleri nedeniyle nükleer enerji yatırımlarında önemli gelişmeler yaşanmıştır. 1975 yılına gelindiğinde 19 ülkede elektrik üreten 157 nükleer santral bulunmaktadır (Akova, 2016: 109). Dünyanın en büyük enerji ithalatçısı olan ve enerjisinin % 53'ünü ithal eden 28 AB üyesi ülkenin, 14'ünde faaliyet gösteren 128 nükleer güç reaktörü (Şekil 10) AB'nin tamamında üretilen elektriğin dörtte birinden fazlasını oluşturmaktadır. Fransa tek başına AB'nin nükleer elektriğinin yarısını üretmektedir. AB üyesi olmayan üç ülkedeki (Rusya, Ukrayna ve İsviçre) 53 birim, Avrupa'nın geri kalan kısmındaki elektriğin yaklaşık % 17'sini oluşturmaktadır. Ekim 2015'te AB endüstri derneği Foratom, en az 14 AB üye ülkesinde mevcut nükleer kapasiteyi en az 2050'ye kadar

korumak için, 2025 ile 2045 arasında toplam 122 GWe olmak üzere 100 yeni nükleer güç reaktörünün işletmeye alınmasını hedeflemiştir (WNA, 2018b).

Birleşik Krallık'taki nükleer güç sayısı 1997'de 33 iken bu rakam günümüzde 15'e düşmüştür. Birleşik Krallık eskiyen santrallerini 2023'e kadar yenileme kararı almış 2030'a kadar ise 16 GWh yeni nükleer santral yapmayı planlamıştır. Almanya'nın sahip olduğu nükleer güç sayısı 1997'de 21 iken günümüze kadar gelen süreçte bu reaktörlerin bir kısmının miyadının dolması nedeniyle ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımlarını artırmasıyla bu santrallerin bir kısmı sürekli olarak kapatılmıştır. Günümüzde Almanya'nın sahip olduğu nükleer enerji santrali 7'dir (IAEA, 2016-2017b). Fransa ve Finlandiya nükleer enerji yatırımlarını arttırmış, Bulgaristan, Çek Cumhuriyeti, Macaristan, Romanya, Slovakya, Slovenya gibi ülkelerde de yeni nükleer santral inşa girişimleri sürmektedir. Polonya nükleer santral enerji programlarını geliştirirken, Estonya ve Letonya birlikte, Litvanya'nın nükleer santrallerini kurmak için işbirliğine gitmektedir (Akova, 2016: 112).



Şekil 10. Avrupa ülkelerindeki nükleer santrallerin dağılışı

3.4. Japonya'da Nükleer Enerji

Amerika, Fransa ve Japonya dünyanın en büyük nükleer enerji ülkelerinden üçü olmuştur. Bu ülkeler nükleer elektrik üretiminin % 56'sını, çalışan reaktörlerin % 49'unu ve kurulu kapasitenin % 56'sını oluşturarak dünya toplamının yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Küresel nükleer elektrik üretimi ortalama seviyesi % 14'e ulaşmıştır (Yan vd., 2011: 744). Fukushima Daiichi nükleer enerji santralinde meydana gelen kazadan önce Japonya'da işletmedeki nükleer reaktör sayısı 48'dir. Japonya ihtiyacı olan elektriğin yaklaşık % 30'unu bu santrallerden karşılamıştır. Ayrıca kazadan önce 2 nükleer santralin inşası sürmekteydi (IAEA, 2014: 12).

2011 yılının Mart ayında yaşanan Fukushima Daiichi kazasından sonra Japonya, operasyonel nükleer santrallerini kapatmış ancak enerjisinin neredeyse % 90'dan fazla kısmını ithalattan karşıladığından, kapatılan santrallerden sonra enerji ihtiyacının artmasıyla büyük bir darboğaza girmiştir. 2013 yılının sonundan itibaren enerji harcamaları 93 milyar dolarlık bir ek yük getirmiştir. Aynı zamanda sanayide kullandığı elektrikte % 28, elektriğin evsel kullanımında ise % 19 oranında bir fiyat artışıyla karşı karşıya kalmıştır. Elektrik fiyatlarında yaşanan yükseliş özellikle endüstride maliyet

artışlarına yol açmış, bu sebeple sanayi üreticilerinin tekrar nükleer enerjiye dönüşü yönünde talepleri kendini göstermiştir. Nükleer güç santrallerinin kapanmasıyla Japonya'da ekonomik sıkıntılar baş göstermiş, bu sıkıntıların aşılması için Japon hükümeti yeniden nükleer santrallerden elektrik üretiminde faydalanılacağını duyurmuştur (Nükleer Akademi, 2017).

Japonya'da Kasım 2014 yılında yeni güvenlik standartlarına uygun olarak Sendai-1 ve Sendai-2 temizlenerek tam kapasiteyle yeniden işletmeye alınmıştır. Aralık 2014 yılında Japonya'da Nükleer Düzenleme Kurumunca Takahama 3-4 ve Ikata 3 reaktörlerinde düzenleyici denetimleri yapılmış, yakıt yükleme izinleri alınmış ve reaktörlerin yeniden başlatılmasını onaylamıştır (IAEA, 2015: 12). 2016'da 7 reaktörün daha işletmeye alınması öngörülmüştür (Nükleer Akademi, 2017). Enerji ihtiyacının % 90'dan fazlasını ithalatla karşılayan Japonya, enerji ithalatında dışa bağımlılığı azaltmak için 2011 yılından sonra kapattığı nükleer santralleri tekrar işletmeye almaya başlamıştır. Günümüzde Japonya'da işletmede bulunan nükleer santral sayısı 42'dir (Şekil 11) (IAEA-PPIS, 2019; WNA, 2019). BP'nin raporuna göre (BP, 2017: 39) Japonya aşamalı olarak reaktörlerin bir kısmını yeniden başlatmasına rağmen, Fukushima öncesi seviyelere ulaşamayacaktır.



Şekil 11. Japonya'daki nükleer santrallerin dağılışı

3.5. Çin'de Nükleer Enerji

1997 yılında Çin'in sahip olduğu nükleer santral sayısı 3 iken 2013'te bu sayı 17, 2014'te 23, 2016'da 33, 2017'da 37, 2019 yılı Ocak ayında ise bu rakam 46 olmuştur (Şekil 12). Çin'de şu anda inşa halinde olan 12, yapımı planlanan 31 reaktör bulunmaktadır (IAEA-PRIS, 2019). Çin hidrokarbon enerji kaynakları bakımından dünyanın en avantajlı ülkelerinden biri olduğu halde son yıllarda sanayisinde yaşanan hızlı büyüme ile enerji ihtiyacı artmış, kendi öz kaynakları yetersiz kaldığı için önemli bir enerji ithalatçısı haline gelmiştir. İhtiyaç duyduğu enerjinin bir kısmını nükleer santral yatırımları yaparak karşılamaya çalışmaktadır (IAEA, 2015-2016-2017b). Gelecekte en büyük enerji pazarı olması beklenen Çin'in, nükleer genişleme programı küresel artışın neredeyse dörtte üçünü oluşturmaktadır. Bu, kabaca Çin'in önümüzdeki 20 yıl boyunca her üç ayda yeni bir reaktör kullanımına eşdeğerdir. Buna karşılık Çin'in hidroelektrik santralinin büyümesi son on yıla göre keskin bir şekilde yavaşlamıştır (BP, 2017: 39).

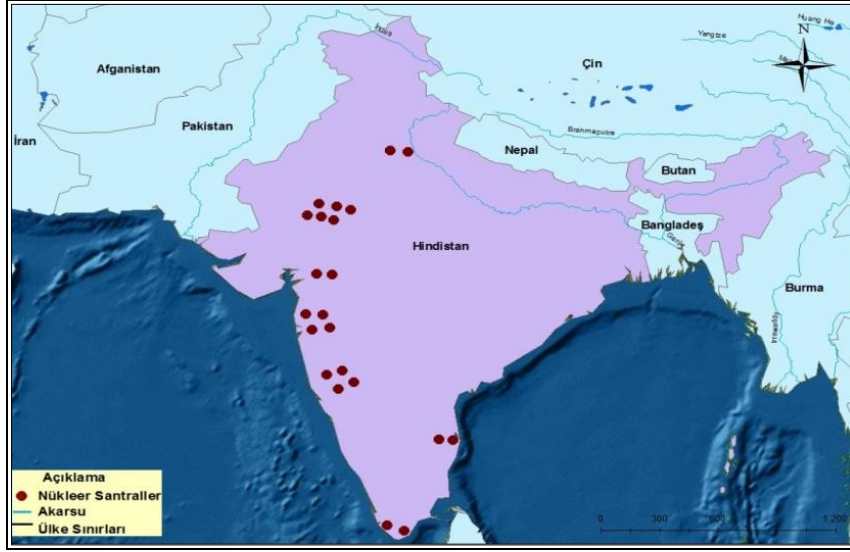


Şekil 12. Çin’de işletmede olan nükleer santraller

3.6. Hindistan’da Nükleer Enerji

Hindistan’da 2016 yılında üretilen 1478 TWh elektriğin 1105 TWh (%75)’si kömürden, 138 TWh (%9)’si hidrodan, 71 TWh (%5)’i doğal gazdan, 59 TWh (%4)’si güneş ve rüzgârdan, 38 TWh (%2.6)’si nükleerden, 44 TWh’si biyoyakıttan ve 23 TWh’si petrolden sağlanmıştır. Hindistan enerji talebinin büyük kısmını ithalatla karşılamaktadır. BP’nin 2017 yılı enerji raporuna göre Hindistan’ın enerji tüketiminde 2015 ila 2035 yılları arasında % 129 oranında artış yaşanacaktır. Hindistan, hidrokarbon kaynaklarının azlığı nedeniyle elektrik üretimi için nükleer yatırımlara yönelmektedir (WNA, 2018d). Hindistan’ın önümüzdeki on yıllar için enerji talebinde yüksek bir büyüme yaşayacağı tahmin edilmektedir. Aslında, Hindistan, "bilinen fosil rezervlerini verimli bir şekilde kullanmak, fosil kaynak tabanını artırmak, rekabetçi bir enerji ithali aramak, elektriğin üretilmesi için hidro potansiyeli tam olarak kullanmak ve kaynak kullanımını artırmak da dahil olmak üzere gelecekteki talepleri karşılamak için nükleer ve konvansiyonel olmayan fosil kaynaklar gibi tüm mevcut seçenekleri düşünmek zorundadır". Bu amaçla, Hindistan Atom Enerjisi Departmanı nükleer programı başlatmıştır. Hedef, enerji ithalatını mevcut seviyeye (yaklaşık %30) sınırlamak için, elektrik üretiminde nükleer oranını % 3’ten yaklaşık % 25’e yükseltmek ve çeşitli reaktörlerden 2020 yılına kadar 20 GW kapasiteye erişmektir (Vaillancourt vd., 2007: 3).

Ekonomik büyümeyi hızlı bir şekilde gerçekleştiren Hindistan’ın 1997 yılındaki nükleer santral sayısı 9 iken bu rakam 2013’te 20, 2014’te 21, 2017’de ise 22 olmuştur (Şekil 13). Ocak 2019 itibarıyla Hindistan’da inşa halinde 5400 MWe kapasiteli 7, planlama aşamasında ise 10,500 MWe kapasiteli 14 nükleer santral bulunmaktadır (WNA, 2019). Hindistan, 2050 yılına kadar elektrik ihtiyacının %25’ini nükleerden karşılamayı hedeflemektedir (IAEA, 2015-2016-2017b).



Şekil 13. Hindistan’da işletmede olan nükleer santrallerin dağılışı

3.7. Türkiye’deki Durum

Enerji tedarikinde büyük oranda dışa bağımlı olan ve enerji verimliliğini/güvenliğini arttırmak isteyen Türkiye’de nükleer enerji santrali kurma fizibilite çalışmaları 1965’te başlamıştır. 1974 -1975 yıllarında yer seçimi ile ilgili çalışmalar yapılmış, 1976 yılında tesis için Mersin-Akkuyu mevki belirlenmiştir. 1980 yılında tesis kurmaya yönelik girişim mali sebeplerden ötürü başarısız olmuştur (WNA, 2018e). Daha sonraki süreçte Rusya ile başlayan görüşmeler 2010 yılında anlaşmayla sonuçlanmıştır. Akkuyu nükleer santrali, dört adet 1200 MWe AES-2006 birimi olacak ve toplam 4800 MWe kurulu güçle elektrik üretecek biçimde projelendirilmiştir. 2006 yılında Türkiye’nin ikinci nükleer santraline ev sahipliği yapması için Sinop-İnceburun seçilmiştir. Japon ve Fransız firmalarının ortak girişimi ile geliştirilen 3. nesil ATMEA-I tipi reaktör kullanılacak olan santral, 4 üniteden meydana gelecektir. Bu santral çevreye daha duyarlı ve az atık üretecek olmasıyla dikkat çekmektedir. Santralin 1150 MWe’lik 4 reaktör ünitesiyle 4.600 MWe toplam kurulu güce sahip olması tasarlanmaktadır (Akova, 2016: 132). Bunların yanında TAEK, Kırklareli’nin Demirköy ilçesine bağlı İğneada beldesinde 1250 ve 1400 MWe güç kapasitesine sahip ikişer güç reaktörünün yapılması için çalışmalar yapmaktadır (Çizelge 11) (Şekil 14) (WNA, 2018e). Türkiye’de şu anda Akkuyu 1 nükleer reaktör ünitesinin inşaatı sürmektedir.

Çizelge 11. Türkiye’de yapım aşamasında olan, planlanan ve önerilen nükleer güç reaktörleri

	Tip	Güç MWe	İnşaatın Başlaması	İşletmeye Alınma
Akkuyu 1	VVER-1200	1200	April 2018	2023
Akkuyu 2	VVER-1200	1200	2019	2023
Akkuyu 3	VVER-1200	1200	2020	2024
Akkuyu 4	VVER-1200	1200	2021	2025
Sinop 1	Atmeal	1150		2024/2025?
Sinop 2	Atmeal	1150		2025/2026?
Sinop 3	Atmeal	1150		
Sinop 4	Atmeal	1150		
İğneada 1-4	AP1000x2, CAP1400x2	2x1250 2x1400		

Kaynak: WNA, 2018e.



Şekil 14. Türkiye’de inşaatı devam eden ve planlanan nükleer santraller

4. Nükleer Enerjinin Avantajları

Nükleer teknolojilerin en önemli avantajları, az miktarda birincil kaynaktan kesintisiz olarak büyük miktarda enerji üretme kapasiteleridir. Dahası, bu seçenek bol kaynaklara dayanır ve sonuç olarak, fosil yakıtlarda olduğu gibi büyük fiyat dalgalanmaları olmaksızın, uzun vadede istikrarlı bir enerji kaynağını temsil eder. Gelişmekte olan ülkelerin gelecekteki ekonomik büyümesi ve enerji ihtiyaçları göz önüne alındığında, sürdürülebilir kalkınma için küresel bir stratejide nükleer enerjinin gelişimi giderek daha geçerli bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Sınırlamalara rağmen, mevcut kapasite ile gelişmekte olan ülkelerin gelecekteki enerji ihtiyaçları arasındaki boşluğun önemli bir bölümünü doldurmak için uzun vadeli projeksiyonlarda nükleer enerjinin net bir şekilde yeniden canlandırılması yatmaktadır (Vaillancourt vd., 2007: 2). Sanayinin desantralizasyonu ile nükleer enerji arasında paralellik kurulabilmektedir. Kanada, İskandinav ülkeleri, Avrupa Rusya’sının kuzey bölgeleri ve Sibiryaya içlerine kadar sanayi tesislerinin yayılmasında nükleer enerjiden elde edilen elektrik enerjisinin önemli bir payı bulunmaktadır (Doğanay ve Coşkun, 2017: 280).

Nükleer enerji santralleri, fosil yakıtların kullanımı yoluyla güç üretenlerden önemli ölçüde daha az yakıtı ihtiyaç duyar. Nükleer enerji üretiminde çok küçük miktarda hammadde kullanıldığından hammadde maliyet fiyatı düşük olmaktadır. Bu santrallerde kullanılan hammadde hacimce çok az yer kapladığı gibi çok yüksek enerji miktarı da sağlar (Doğanay ve Coşkun, 2017: 277). Dört ton maden kömüründen elde edilecek enerji bir gram uranyumdan elde edilecek enerjiye eşittir. Uranyum çok küçük miktarlarda kullanıldığından yakıt olarak maliyeti düşüktür (Tümertekin ve Özgüç, 2015: 384). Bir ton uranyum, 16.000 ton kömür veya 80.000 varil petrolün yakılmasına eşdeğer 40 milyon kilovat saat elektrik üretebilir (Namli ve Namli, 2014: 30). 1kg kömürden 3 kWh, 1 kg petrolden 4 kWh elektrik enerjisi üretilmekteyken, 1 kg uranyumdan ise 50.000 kWh elektrik enerjisi üretilmektedir (Temurçin ve Aliagaoglu, 2003: 27).

Nükleer enerjide yakıt maliyeti düşük olduğundan bu enerjiden elde edilen elektrik üretimi, elektrik fiyatlarında potansiyel bir istikrar etkisi yaratır. Nükleer enerji kaynağının etkin ve yaygın kullanımıyla özellikle hidrokarbon enerji kaynakları üzerindeki talep baskısını azaltacaktır. Dünyadaki

uranyum ve toryum rezervlerinin gelişen teknolojilerle daha etkin kullanımı söz konusu olduğundan nükleer enerji açısından kaynak sınırlamasının olmayacağı düşünülmektedir (TAEK, 2010).

Nükleer enerji kaynakları özellikle elektrik üretiminde önemli bir yere sahip olmakla birlikte askeri, tıp, endüstri, tarım gibi pek çok alanda teknolojik gelişmelere bağlı olarak kullanım alanını oldukça genişletmiştir (Yan vd., 2011: 743). Nükleer enerji ülkelerin nükleer teknolojilerini geliştiren bir faktör olarak da önem arz eder. Nükleer teknoloji; bilimsel araştırmalarda, tarımda, hayvancılıkta, gıda güvenliğinde, sanayide, elektronik ve uzay teknolojilerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Er ve Sunal, 2008: 196).

Nükleer teknoloji, endüstride önemli bir yer tutmaktadır. Sanayi aygıtları, araç-gereçleri, ürünlerdeki kaçak ve çatlaklar nükleer teknoloji yardımıyla tespit edilmekte ve verimlerinin artırılması için de radyoaktif izleyicilerden sık sık yararlanılmaktadır. Nükleer teknoloji alanında pek çok kademede çalışan, istihdam edilmektedir (Er ve Sunal, 2008:196). Tarım ve hayvancılık alanında nükleer teknoloji kullanılarak farklı genetik yapıya haiz ve aynı zamanda hastalıklara karşı dayanıklı bitkilerin geliştirilmesinde hayati bir rol üstlenmektedir. Geleneksel yöntemlere alternatif olarak ışınlama teknolojisiyle gıda koruma ve kalitenin artırılması ile ilgili problemler çözülmektedir. Nükleer teknolojiyle birlikte nükleer tıp alanında bir bilim dalı meydana gelmiştir. Bu sayede kanser hastalığı gibi pek çok hastalığın teşhis ve tedavisinde kullanılmakta, herhangi bir organın doğru çalışıp çalışmadığı kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Nükleer teknolojiyle röntgen cihazları yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kanserli hücrelerin bulunduğu bölgeye radyasyon verme suretiyle kanserli hücre yok edilmekte ve kanserin yayılması önlenmektedir (Er ve Sunal, 2008:197).

Toplumların dünya genelinde kentleşmeye ve sanayileşmeye devam etmesi, tatlı su kaynaklarının kirlenmesine ve belediye kanalizasyon çamurunun oluşmasına katkıda bulunur. Endüstriyel atık, su atıklarının ve çamurun elektron ışını hızlandırıcıları gibi nükleer teknolojileri kullanarak arıtımı, su kaynaklarının korunmasına, hayvanların yaşamını ve halk sağlığını korumasına ve toprak koşullarını iyileştirmek için gübreleme, biyolojik katı yağların üretilmesine yardımcı olabilir. Bu teknikler, endüstriyel tekstil boya atık suyunun arıtılmasında ve tarımsal uygulamalar için yüksek kaliteli biyolojik katkılar sağlamak için kanalizasyon çamurunun sanitasyonunda etkinliğini göstermiştir. Su sıkıntısı yoğunlaştıkça, suyun yeniden kullanılması konusuna dünya çapındaki ilgi artmıştır. Radyasyon teknolojileri, dolaylı içilebilir kullanım için yüksek kaliteli su kombinasyonu üretiminde ve yakın gelecekte en önemli tedavi teknolojileri haline gelecektir. Deniz ekosistemleri, dünya nüfusunun büyük bir kısmı için hayati bir yiyecek ve gelir kaynağıdır. Bazı bölgelerde bu ekosistemler, zararlı algal patlamalar (HAB) ile periyodik olarak tehdit altındadır. İklim değişikliğinin yanı sıra ekonomik faaliyetin yaygınlaşması da bu olayların sıklığını artıracaktır. Örneğin alg toksinleri, kabuklu deniz hayvanlarındaki toksinler düzenleyici seviyeleri aştığında uygulanan hasat tesislerinin kapatılması yoluyla kabuklu deniz hayvanları endüstrisine devasa ekonomik kayıplar getirmektedir. Tatlı su ortamlarında HAB olaylarının sıklığı da artmakta ve tatlı su canlıları ve hayvanlar ile insanlara tehdit oluşturmaktadır. Reseptör bağlanma deneyi (RBA) gibi nükleer teknikler, deniz ürünlerindeki ve çevredeki alg toksinlerinin etkin bir şekilde izlenmesinin yanı sıra, iklim değişikliğinin HAB'ler üzerindeki etkisini ve deniz ekosistemini bir bütün olarak incelemek için kanıtlanmış araçlardır. Oldukça spesifik ve çok hassas olduğu için RBA daha geleneksel yöntemlere göre kritik bir avantaja sahiptir, bu

nedenle düzenleyici otoriteleri ve üreticileri HAB toksisitesiyle ilgili doğru bir erken uyarı sağlar (IAEA, 2014: 5).

Nükleer enerji sera gazı salmayan ve havayı kirliletmeyen bir enerji kaynağıdır. Bu sebeple bu enerji kaynağı çevreye salınan karbonun sınırlandırılmasında önemli bir araçtır. Yalnızca OECD ülkelerindeki nükleer santraller senede 1200 milyon ton CO₂ salımına engel olmaktadır. Hâlihazırda var olan nükleer santraller yerine modern fosil yakıtlı santrallerin kullanılması durumunda dünya enerji sektöründe salınan CO₂ miktarının % 8 oranında artacağı hesaplanmaktadır (TAEK, 2010). Nükleer enerjinin çok düşük karbon emisyonuna sahip olduğu ve enerji üretiminin şu anda dünya genelinde sera gazı emisyonlarının % 66'sını oluşturduğu göz önüne alındığında, nükleer enerji atmosferik sera gazı ve ilişkili iklim değişikliğinin yönetimi için önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Zinkle ve Was, 2013: 735). Hidrokarbon yakıtlarla işletilen santrallerden kaynaklanan sülfür ve azot oksitler gibi hava kirliletici gaz ve parçacıkların salınımı, nükleer enerji kullanımıyla bertaraf edilecek solunum yolu hastalıkları ve asit yağmurlarının etkisi büyük oranda azalacaktır (TAEK, 2010).

Hidrokarbon enerji kaynaklarının aksine, nükleer yakıt ve bu yakıtın hammaddesi enerji yoğun madde olmakla birlikte kolayca depolanabilmekte ve düşük maliyetle korunabilmektedir. Bu durum dışa olan enerji bağımlılığını azaltmakla birlikte enerji arz güvenliğini ve ulusal güvenliği arttıracaktır. Bu enerji kaynağı için ihtiyaç duyulan uranyum ithalatı; yüksek maliyet ve büyük miktarda tüketilen hidrokarbon kaynaklar olan kömür, petrol ve doğal gazın ithalatından daha caziptir (TAEK, 2010). Nükleer santrallerin işletilmesinden ortaya çıkan katı atık miktarı, fosil enerji kaynaklarının işletilmesinden kaynaklanan katı atık miktarından çok daha azdır. Nükleer santrallerde elektrik elde edilirken ortaya çıkan katı atık miktarı, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarındakine denk görülmektedir. Nükleer santrallerin potansiyel risklerinin çevre halk sağlığı açısından fosil yakıtların oluşturduğu risklerden daha düşük olduğu dikkat çekmektedir (TAEK, 2010).

Reaktör ve yardımcı cihazlar kalınlığı 2,5 m olan beton dış güvenlik duvarı içinde korunmaktadır. Reaktörde yaşanacak bir kaza durumunda radyoaktif buhar bu duvar içinde kalacaktır. Ayrıca reaktörün etrafında 800-1500 m yarıçaplı sivil halka yasak bir kuşak bulunmaktadır. Bu önlemler reaktörden kaynaklanabilecek riskleri büyük oranda azaltmaktadır. Nükleer santrallerin diğer bir avantajı ise diğer santrallere göre daha az arazinin kullanılmasıdır (Temurçin ve Aliagaoglu, 2003: 27).

5. Nükleer Enerjinin Dezavantajları

Nükleer santraller birçok ekonomik ve çevresel faydaya sahip olsalar da, ülkeler için bir dezavantaj oluşturabilecek potansiyel riskler ve tehlikeler de içerirler. Öncelikle radyoaktivite nedeniyle nükleer santraller, hem üretimden önce hem de üretim sürecinde, aynı zamanda üretimin sonunda da nükleer atıklardan dolayı tehlike yaratmaktadır. Nükleer atıklar, 600 yıldan sonra bile zehirlerinin % 99'unu kaybetmezler. Kullanılmış nükleer yakıtın nakliye işlemleri esnasında ve riskli atıkların nakil alanlarına taşınması sırasında ortaya çıkması muhtemel bir tehlike söz konusudur. Harcanan yakıtın geri dönüşümü, pahalı bir prosedürdür. Ayrıca çok fazla nükleer hırsızlık ve terör saldırısı riski taşımaktadır (Namli ve Namli, 2014: 34). Elektrik enerjisi üretmek için kurulan nükleer santraller, belli coğrafi özellik taşıyan konumlarda kurulabilirler (Doğanay ve Coşkun, 2017: 277). Nükleer santraller iyi yönetilmedikleri ve saha seçimi sürecinden başlayarak düzgün bir şekilde düzenlenmediği, inşaat ve

işletme sırasında güvenlik denetimleri ile iyi takip edilmedikleri takdirde tehlikeli olabilirler (Namli ve Namli, 2014: 26).

Nükleer enerji üretimi sırasında oluşan radyoaktivite, kazayla serbest bırakıldıysa, insanlara ve çevreye zarar verme potansiyeline sahiptir. Böylece, nükleer enerjinin kullanımı için çok yüksek güvenlik seviyeleri esastır. Tüm nükleer güvenlik önlemlerinin temel amacı, radyoaktivitenin kalması veya serbest bırakılması durumunda, önemli bir zarar vermeden kontrollü miktarlarda yapılmasını sağlamaktır. Yine de, güçlü bir düzenleyici kurum tarafından gözetim altında olan operatör tarafından etkin bir şekilde yönetilse de bir dereceye kadar risk kalmaktadır (NEA, 2012: 37). Günümüzde nükleer santraller yüksek güvenlik standartlarına sahip olsa da hala çok riskli bir teknolojidir. Nükleer santrallerde açığa çıkan radyoaktif atıklar silah yapımında kullanılabildiğinden, bu teknolojinin yaygın kullanımı nükleer silahların yaygınlaşmasını sağlayabilir (Üçgül ve Elibüyük, 2016: 290-291).

Nükleer tepkimeler sonucu kısa sürede çok fazla enerji üretildiğinden, bu enerjinin etkisiyle çok sıcak bir ortam oluşmaktadır. Elektrik üretimi ve sürekliliğin sağlanması için devamlı olarak soğutulmak zorundadır. Soğutma işlemi akarsulardan veya denizden temin edildiğinden dışarıya çıkan su sıcak bir biçimde atılmaktadır. Reaktörün çok fazla atık su deşarj etmesi halinde zamanla bulunduğu çevrede suların ısınmasına, çevredeki canlı hayatın olumsuz etkilenmesine neden olabilir (Akova, 2016: 123-124). Nükleer santrallerin kurulması bürokratik ve teknik ayrıntılar ve yaşanan gecikmeler nedeniyle 20-30 yıl gibi uzun zaman alabileceğinden nükleer santral inşası zorlaşabilir (Üçgül ve Elibüyük, 2016: 291; Akova, 2016: 124).

6. Nükleer Enerjinin Geleceği

Dünya enerji talebi hızla artmakta, insanoğlu enerji kullanımının çevresel etkileri, özellikle de fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan karbondioksit salımı ile ilgili endişe duymaktadır. Yükselen talep aynı zamanda enerji arz güvenliğinin birçok ülke için önemli bir sorun haline geldiği anlamına geliyor. Nükleer enerjinin bu endişelerin ele alınmasında belirli avantajları bulunmakla birlikte, enerji kaynaklarının çeşitliliğine ve güvenliğine katkıda bulunabilecek düşük karbonlu bir enerji kaynağıdır. Nükleer enerji, önümüzdeki 40 yıl ve sonrasında dünya çapında daha geniş bir enerji arz ve talebi meydana getirecektir. Dünya, önümüzdeki 40 yıl boyunca ve ötesinde, artan bir nüfusa güvenli ve uygun fiyatlı enerji tedariki sağlamak ve çevre üzerinde kabul edilemez etkilerden kaçınmak için bazı büyük zorluklarla karşı karşıyadır. Bunu başarmak, enerji talebi büyümesini hafifletmek ve enerji üretimi ve tüketiminin verimliliğini büyük ölçüde geliştirmek, aynı zamanda geri kalan büyümeyi sosyal ve çevresel olarak kabul edilebilir bir şekilde karşılamak için enerji kaynakları ve teknolojilerinin karışımı optimize edilmelidir (NEA, 2012: 87).

Dünya ekonomisinde yaşanan büyüme daha fazla enerji tüketimine sebep olmaktadır. Nükleer ve hidroelektrik güçle birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının, gelecek 20 yılda enerji kaynaklarındaki büyümenin yarısını oluşturması düşünülmektedir (BP, 2017: 15). Nükleer ve hidroelektrik santrallerinin % 2.3 oranında istikrarlı bir biçimde büyümesi beklenmektedir (BP, 2017: 39). Enerji kıtlığı ve bunun sonucunda yüksek fiyatlar, ülke ekonomileri üzerinde yıkıcı bir etkiye sahip olabilir. Bu kaygılar geçmişte özellikle fosil yakıtlar, petrol ve doğal gaz tedariki ile ilgilidir. Bu kaygıların bir nedeni, petrol ve doğal gaz kaynaklarının ve üretiminin, bazıları politik olarak istikrarsız olmak üzere, nispeten az sayıda ülke ve küresel bölgede yoğunlaşmasıdır. Daha uzun vadede, düşük maliyetli fosil yakıt

kaynaklarının tükendiği, ekstraksiyonun daha maliyetli ve potansiyel olarak çevreye daha fazla zarar vereceği endişesi vardır (NEA, 2012: 88).

ABD hükümeti nükleer enerji sektörünü canlandırma ve genişletme yönünde politik bir karar almıştır. Nükleer enerji endüstrisi, yenilikçi nükleer enerji teknolojilerini ticarileştirmeye doğru hızlandırılmıştır. Ayrıca bu teknolojileri uygun maliyetli bir şekilde taşımak için gerekli teknik, düzenleyici ve mali desteğe erişim sağlanmasının yanında, gelecekte nükleerden elektrik üretilmesinin ötesinde gelişmiş reaktörlerle; esnek elektrik üretimi, endüstriyel uygulamalar, hidrojen üretimi, temiz su, kimyasal süreçlerde nükleer enerjiden faydalanılacaktır (U.S. Department of Energy, 2018). İsviçre ve Almanya gibi bazı Avrupa ülkelerinde hükümetler, hâlihazırda çalışan santrallerin faaliyetlerini tamamladıklarında, yeni nükleer enerji santralleri kurmayacaklarını kamuoyuna duyurmuştur. Öte yandan, İsveç ve Fransa gibi diğer bazı Avrupa ülkeleri nükleer güç programlarına devam etme konusunda kararlı görünmektedirler (Namli ve Namli, 2014: 27). Nükleer enerji bugün Avrupa'nın enerji karışımında önemli bir rol oynamaktadır. Nükleer enerji AB'de elektrik üretimi için en büyük düşük karbonlu kaynaktır ve elektrik üretiminin % 27'sine katkıda bulunur. Nükleer enerjinin AB elektrik karmasındaki payının 2005 yılında %30.5'ten 2020'de % 23.9'a düşmesi ve 2030'dan 2050'ye kadar % 20'nin biraz üzerinde sabitlenmesi beklenmektedir (Dellinger ve Schratzenstaller, 2017:7).

Asya'ya baktığımızda, Güney Kore ve Çin gibi hızlı büyüyen ülkeler hala mevcut tesislerine ek olarak yeni nükleer santraller inşa etmeye çalışmaktadırlar (Namli ve Namli, 2014: 27). Nükleer enerji ülkelerin birbirlerine karşı üstünlük sağlamada kullanabildikleri bir araçtır. Ayrıca ülkelere ekonomik ve mali getiri sağlayarak ülkelerin kalkınmalarını sağlama potansiyeline sahiptir (Bahçe ve Gümüş, 2016:127). Enerji kaynaklarının güvenliği, enerji kaynaklarının çeşitliliğinin artırılmasıyla güçlenmektedir. Pek çok ülkenin fosil yakıtlara olan yoğun bağımlılığı göz önüne alındığında, nükleer ve diğer alternatif enerji kaynakları değerli çeşitlendirme sağlayabilir. Bu nedenlerden dolayı, pek çok hükümet nükleer enerjiyi, enerji kaynaklarının güvenliğini artırma stratejilerinin önemli bir bileşeni olarak görmektedir (NEA, 2012: 88).

Dünyadaki sera gazı salımlarında büyük bir düşüşün, nükleer elektrik üretimi ile elde edilebileceği ve böylece gelecek nesiller üzerindeki potansiyel etkilerini azaltılabileceği söz konusudur. Bu ihtiyaç, mevcut ve gelişmiş reaktör tasarımlarının dağıtımı ve elektrik şebekesinin hidrojen ekonomisiyle bütünleştirilmesiyle karşılanabilir. Gelecekte nükleer güç için özellikle önemli bir rol, hidrojen ekonomisine olan bağlantıları olacaktır. Gelecek, Hidrojen Çağı olabilir (Duffey, 2005: 542).

Bugüne kadar, nükleer enerji neredeyse sadece elektrik üretimi için kullanılmıştır. Elektrik kademeli olarak nihai enerji tüketiminin daha büyük bir payını aldıkça, nükleer enerjinin nispi önemi artacaktır. Özellikle, önümüzdeki yıllarda elektrikle çalışan araçların kullanımındaki beklenen yükseliş, ulaştırma sektöründeki önemini yükseltecektir. Nesil IV tasarımlarının birkaçı, hem ısı hem de güç sağlama ve bazı potansiyel uygulamalar için gerekli olan yüksek sıcaklıkları sunma potansiyeline sahiptir. Eğer bunlar başarılı bir şekilde ticari olarak geliştirilir ve dağıtılırsa, nükleer enerji 2050 yılına kadar önemli bir ısı kaynağı haline gelebilir. Fosil yakıtların doğrudan kullanımını ortadan kaldırdığı ölçüde, CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunacaktır (NEA, 2012: 95).

Dünya Nükleer Enerji Derneğine üye devletlerin birçoğu nükleer enerjiyi; enerji arz güvenliğini iyileştirme ve iklim değişikliğini hafifletme konusunda giderek daha önemli bir rol oynaması beklenen,

kendini kanıtlamış, temiz, çıkarılabilir ve ekonomik bir teknoloji olarak görmeye devam etmektedir. Hâlihazırda nükleer santrallerin işletildiği 30 ülkeden 13'ü, ya yenilerini inşa etmekte ya da daha önce askıya alınmış inşaat projelerini aktif olarak tamamlamaktadırlar. Ayrıca bu ülkelerin 16 yeni reaktörün inşası için plan ya da önerileri bulunmaktadır (IAEA, 2017b: 1).

Nükleer santral işletme ömrü diğer santral türlerine göre daha uzundur. Güneş enerjisi sistemlerinin yaklaşık ömrü 20 yıl civarında seyretmektedir. Rüzgâr enerjisi santrallerinin ortalama verimli çalışma süresi 20 yıl olup, sistemin kullanım ömrü 30 yıl civarındadır. Nükleer güç santralleri uzun yıllar boyunca (yaklaşık 40 yıl, yeni nesil nükleer santrallerde yaklaşık 60 yıl) ihtiyaç duyulacak nükleer yakıtları kolayca ve ekonomik depolamaya imkân verdiğinden enerji arz güvenliğinin sağlanmasına önemli katkı sağlamaktadır (Uzun ve Kalaycı, 2015: 150).

IEA, tarafından geliştirilen bir senaryo özellikle 2020 ve 2040 yılları arasında nükleer güç için çok yüksek yıllık büyüme oranları üretmekte ve bu 2000 ile 2050 yılları arasında küresel nükleer enerji üretiminde 14 kat artış anlamına gelmektedir. Yine de yalnızca bu, küresel nükleer enerji kullanım oranını %16'dan %20'ye çıkaracaktır. Bununla birlikte, nükleer füzyon mühendisliği için yeni bir dönem başlayacaktır. 2050'de piyasaya çıkması beklenen bu teknoloji, çok uzun yıllar boyunca dünya enerji ihtiyaçlarını karşılama potansiyeline sahip olacaktır (Yemane ve Menyah, 2010: 551).

7. Tartışma ve Sonuç

Nükleer enerji yalnızca enerji yapısı üzerinde değil, aynı zamanda küresel ekonomi ve politikada da büyük etkiye sahiptir. Dünya çapında ülkeler şu an için nükleer enerji geliştirme konusunda farklı görüşlere sahip olsalar da, nükleer enerjinin kullanılması enerji güvenliğine ve küresel iklim ısınmasının azaltılmasına büyük katkıda bulunmaktadır. Artık, nükleer enerji teknolojileri daha da geliştirilmiştir ve uygulama kapsamı sadece elektrik üretimi ile sınırlı değildir. Endüstri, tarım, tıp, çevre koruma vb. çeşitli alanlarda nükleer enerji gittikçe etkin şekilde kullanılmaktadır.

Enerji elde etmede kullanılan var olan teknolojilerin sürdürülebilirliğinin yetersiz görülmesi hem imkân hem de zorluklar meydana getirmektedir. Nükleer enerjinin sürdürülebilirliği bu enerji kaynağının enerji arzındaki yerini ve önemini ortaya koymaktadır. Nükleer enerji, sermaye yoğun ve merkezileştirilmiş bir teknoloji olarak, uzun vadeli ve yüksek performanslı bir seçenek olarak öngörülmekte ve uluslararası piyasalarda yüksek değişkenlik arz eden petrol ve gaz riskini dikkate alarak iklim politikalarına ve enerji güvenliğine katkıda bulunabilmektedir. Bununla birlikte nükleer enerji; geliştirilmesi, kaza riski, radyoaktif atıkların üretimi ve yönetimi gibi, sosyal kabulün genel olarak düşük olması gibi bazı önemli kısıtlamalara da sahiptir. 1986 yılında Ukrayna'da yaşanan Çernobil nükleer santral kazası nükleer enerji üretimindeki en yıkıcı ve etkileri en geniş kaza olmuştur. Bu kazanın ardından dünyada nükleer enerji yatırımları bir süre durmuş, ancak ilerleyen yıllarda dünya enerji talebinde yaşanan artışlar bu enerji koluna olan ilgiyi tekrar canlandırmıştır. 2011'de Japonya'da meydana gelen deprem ve tsunami sonrası Fukushima Daiichi nükleer reaktöründeki kaza sonrasında tüm dünyada tekrar nükleer santrallerin güvenliği ile ilgili tartışmalar başlamıştır. Bu büyük dezavantajlara rağmen ülkeler ekonomik ve mali getiri sağlayarak sürdürülebilir bir ekonomik kalkınma sağlamak için nükleer enerjiyi tercih etmektedirler.

Nükleer enerji, faydaları yanında yıkıcı felaketler meydana getirecek etkiye sahip silahların yapımında da kullanılmaktadır. Ancak nükleer santrallerin dezavantajlarını göz önüne alarak nükleer

enerjinin üretilmemesi söz konusu değildir. En gelişmiş teknolojilerle nükleer enerji üretiminde gerekli önlemlerin alınmasıyla birlikte kurulan nükleer santraller ülkelerin ve toplumların faydasına pek çok avantajı beraberinde getireceği gibi dezavantajları da en aza indirgeyecektir.

Nükleer santrallerin normal işletme koşullarında tarım alanlarına, bitki örtüsüne, turizm faaliyetlerine, hava kalitesine olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca diğer enerji kaynaklarına göre arazi kullanım açısından daha az yer işgal etmekte, bu sebeple ekolojik çevre üzerindeki etkileri daha az olmaktadır. Nükleer santraller; fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan asit yağmurları, hava kirliliği, biyo-sistemler üzerinde madencilik ve petrol sızıntıları gibi çevre sorunlarından kaçınmanın avantajlı bir çözümü olarak görülmektedir. Nükleer enerjiyle sera gazı emisyonları etkili bir şekilde azaltılabilir. Risk almadan veya olumsuz çevresel etkiler meydana getirilmeden elektrik üretiminin hiçbir yöntemi bulunmamaktadır. Enerji talebinde büyük oranda dışa bağımlı olan ülkeler açısından düşük maliyetli, temiz, güvenli, sürdürülebilir elektrik enerjisi elde etmede nükleer santraller büyük avantaj sağlar. Günümüzün en önemli gerekliliği olan elektriğin elde edilmesinde dışa bağımlılığı azaltacağı gibi önümüzdeki yıllarda elektrikli otomobiller gibi teknolojilerin etkili şekilde hayata geçmesi için ucuz ve sürekli elektriğe olan ihtiyaç daha da artacağından, üretilen elektriğin maliyetinin düşük olması önem arz etmektedir. Nükleer santrallerin ürettiği elektriğin maliyeti, diğer hidrolik santraller gibi tesislerde üretilen elektriğe nazaran daha düşük seviyededir. Nükleer santrallerdeki yakıtlar tekrar kullanıldığından da kullanılmış yakıtların yeniden işlenerek faydalı ürünlerin ayrıştırılmasıyla tekrar yakıt olarak kullanılabilir. Atmosfere salınan CO₂ salınımı bakımından çevreye duyarlı olan nükleer enerji; kömür, petrol, doğal gazdan elde edilen enerji üretiminde olduğu gibi kirlletici bir özelliğe sahip değildir. Bu sebeple küresel ısınmaya katkı yapmadığı için ortaya çıkacak etkileri yavaşlatmaktadır.

Ticari çıkarlar, nükleer teknoloji kullanımının arkasındaki çok daha baskın itici bir güç haline gelmiştir. Bir zamanlar çoğunlukla teknolojiye izole edilmiş gelişmekte olan dünya, gelecek için daha önemli bir oyuncu haline gelmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde enerji talebinin keskin bir şekilde artması beklenmekte, birçok ülke de daha iyi yaşam kalitesi istemektedir. Kaza riski ve meydana gelen nükleer reaktör kazalarına rağmen dünya devletlerinin bu kaynaktan vazgeçmesi mümkün görünmemektedir. ABD'deki Three Mile Island, Ukrayna'daki Çernobil ve Japonya'daki Fukuşima nükleer santrallerinde yaşanan kazalara rağmen gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler nükleer santral yapımına devam etmektedir.

Nükleer üretimde ilk sırada olan on ülkenin çoğu uluslararası ilişkilerde güçlü ülkelerdir. Bu ülkelerin gücünü belirleyen faktörlerden birinin nükleer enerji olduğu söylenebilir. Bu ülkeler arasında meydana gelebilecek muhtemel çatışmalar dünya ekonomilerini ve piyasalarını sarsacak ölçüde yıkıcı olabilir. Bu yıkıcı etki tüm tarafları büyük oranda olumsuz etkileyeceğinden, nükleer enerji ve teknoloji böylesi bir çatışmadan uzak durmayı sağlayacak caydırıcı bir güce de sahiptir.

Notlar

¹Bu makale 'Al Farabi 1. Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi'nde sözlü olarak sunulan bildirinin genişletilmiş, detaylandırılmış, yeniden düzenlenmiş ve güncellenmiş halidir.



Nuclear Energy and Its Future¹

Muazzez Harunoğulları*^a

Submitted: 09.04.2018

Accepted: 14.02.2019

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Energy, which is a fundamental input in the social and economic development of countries, is an indicator of the increase in economic development and social welfare. The energy needs, demand and its consumption is rapidly increasing in growing economies. The energy use of developed countries is already high while the energy demand of developing countries is increasing rapidly day by day. However, fossil fuels are not distributed evenly across the world. Although some countries are rich in fossil fuel reserves, they do not have the technology and knowledge to process these resources. On the other hand, other countries with low fossil-derived energy have achieved economic development and sustainability through technology, capital and knowledge. In general, all countries are trying to eliminate the rapid consumption of hydrocarbon energy sources by developing policies and projects related to alternative energy sources. In the next twenty years, half of the growth in energy resources is expected to create renewable energy sources together with nuclear and hydroelectric energy. Nuclear energy is seen as an indispensable source for a sustainable economic growth and energy production of the future. The aim of this study is to determine the share of nuclear energy in the energy sector, to show the geographical distribution of nuclear energy in the world, to evaluate the importance of nuclear energy in the share of energy usage of countries, and to evaluate the place of nuclear energy in energy demand by countries.

2. Methodology

This research seeks to answer the following questions:

1. Why is nuclear energy important?
2. What is the situation of global nuclear power generation?
3. What is the geographical distribution of nuclear energy?
4. What are the advantages and disadvantages of nuclear energy?
5. Will the demand for nuclear energy continue in the future?

The most recent data related to the research questions stated above are the reports published by institutions dealing with nuclear energy such as World Nuclear Association, Nuclear Energy Agency, Nuclear Energy Institute, International Energy Agency, International Atomic Energy Agency,

*Corresponding Author: muazzez@kilis.edu.tr

^a Kilis 7 Aralık University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Geography, Kilis/Turkey, <http://orcid.org/0000-0003-43343364>

International Atomic Energy Agency & Power Reactor Information System, Statistical Review of World Energy, Energy Information Administration. Scientific studies on the subject were reviewed in addition to these reports. In terms of methodology, a case study approach has been preferred, as it is one of the qualitative research methods.

3. Result

The interest in nuclear power is of particular importance for developing economies as well as for countries and regions where energy is needed. The number of nuclear power plants in the world have increased considerably in China, India, South Korea and Russia between 1997 and 2017. According to the countries, the number of nuclear reactors in operation in 2017 was 449, and this number increased to 454 in January 2019. USA holds the highest amount of nuclear power while France ranks second in this respect. China, Japan, Russia, South Korea and India are the leading countries in the rankings of nuclear power plants (Chart 1) (IAEA, 2015-2016-2017; WNA, 2019; IAEA-PRIS, 2019).

Chart 1. Number of nuclear power plants in the world (1997-2019)

Country	Number of Reactors 1997	Number of Reactors 2013	Number of Reactors 2014	Number of Reactors 2016	Number of Reactors 2017	Number of Reactors 2019	Installed Power 2017 [MWe]	Installed Power 2019 [MWe]
Argentina	2	2	3	3	3	3	1,667	1,667
Armenia	-	1	1	1	1	1	376	376
Belgium	7	7	7	7	7	7	5,943	5,943
Brazil	1	2	2	2	2	2	1,884	1,884
Bulgaria	6	2	2	2	2	2	1,926	1,926
Canada	22	19	19	19	19	19	13,553	13,553
China	3	17	23	33	39	46	34,514	42,800
Czech Rep.	4	6	6	6	6	6	3,932	3,932
Finland	4	4	4	4	4	4	2,769	2,769
France	54	58	58	58	58	58	63,130	63,130
Germany	21	9	9	8	7	7	9,515	9,515
Hungary	4	4	4	4	4	4	1,889	1,889
India	9	20	21	21	22	22	6,219	6,219
Iranian	-	1	1	1	1	1	915	915
Japan	49	50	48	43	42	42	39,752	39,752
South Korea	10	23	23	25	24	24	22,494	22,494
Mexican	2	2	2	2	2	2	1,552	1,552
Netherlands	2	1	1	1	1	1	485	485
Pakistan	1	3	3	3	4	5	1,005	1,318
Romania	-	2	2	2	2	2	1,300	1,300
Russia	29	33	34	35	35	37	26,111	28,264
Slovakia	4	4	4	4	4	4	1,816	1,816
Slovenia	1	1	1	1	1	1	688	688
South Africa	2	2	2	2	2	2	1,830	1,830
Spain	9	7	7	7	7	7	7,121	7,121
Swedish	12	10	10	10	10	8	9,740	8,612
Switzerland	5	5	5	5	5	5	3,333	3,333
Ukraine	15	15	15	15	15	15	13,107	13,107
United Kingdom	33	16	16	15	15	15	8,883	8,883
USA	108	100	99	99	99	98	99,869	99,333
Taiwan	6	6	6	6	6	4	5,052	3,719
Total	427	432	438	444	449	454	392,370	400,125

4. Discussion

Today, the number and density of nuclear power plants is high in developed countries, and these plants are rapidly commissioned. Developing countries that do not have the advanced technology to

produce nuclear power are producing it by importing the necessary technology. For instance, developing countries such as India, Argentina, Brazil, Bulgaria and Armenia produce the electricity they need processing nuclear energy in this manner (Akova, 2016: 113).

Nuclear Energy in the US; The US –the first to consider uranium and thorium as a source of electricity- started research on nuclear energy in 1947 (Doğanay & Coşkun, 2017: 274) and began working on nuclear energy production in 1951 in the EBR-I Experimental Reactor in Idaho-Arco (Eroğlu & Şahiner, 2017: 8). Almost all of the nuclear production capacity in the US comes from the reactors built between 1967 and 1990 (WNA, 2018c). Nuclear electricity generated approximately 20% of its production. While there are two nuclear power plants with 2500 MWe capacity in the USA as of 2018, there are two large and twelve small reactors with a capacity of 3100 MWe in the planning phase. Two new units are expected to be activated soon after 2020 (WNA, 2018c).

Nuclear Energy in Russia; The first commercially-sized nuclear power plants in Russia were put into operation in 1963-4 (Akova, 2016: 109). In the mid-1980s, the number of nuclear power plants in Russia were twenty-five. The Chernobyl accident in 1986 slowed down nuclear investments in the country, but Russia, which did not abandon nuclear power plants, started operating a new one in the mid-1990s and new reactors were commissioned in 2001, 2004, 2010, 2011 and 2014. The increase in nuclear capacity has had a positive impact on the socio-economic development of the country as a whole (WNA, 2018a). Russia is steadily advancing its investments in nuclear energy by developing new reactor technologies (IAEA, 2018). According to IAEA data, the number of nuclear power plants in Russia increased from to 36 in 2019 (IAEA, 2018).

Nuclear Energy in EU countries; The 128 nuclear power reactors operating in fourteen of the twenty-eight EU member states, the world's largest energy importer and importing 53% of its energy, cover more than a quarter of the electricity produced in the whole of the EU. France produces half of the EU's nuclear electricity on its own (WNA, 2018b).

Nuclear Energy in Japan; After the Fukushima Daiichi accident in March of 2011, Japan closed its operational nuclear power plants, but since it met more than 90% of its energy from imports, it became a major bottleneck due to the increase in energy demand after the closed plants. Since the end of 2013, energy expenditures have added an additional burden of 93 billion dollars. At the same time, 28% of the electricity used in the industry and 19% of domestic electricity use were subjected to a price increase. The increase in electricity prices has led to cost increases especially in the industry and therefore, the industrial producers demanded the return to nuclear energy (Nuclear Academy, 2017). Japan, which has met more than 90% of its energy needs with imports, has started to re-commission its nuclear power plants after 2011 in order to reduce foreign dependency in energy imports. Today, the number of nuclear power plants in Japan is 42 (WNA, 2019; IAEA-PPIS, 2019).

Nuclear Energy in China; The number of nuclear power plants owned by China is 46 as of January 2019, while this number was 3 in 1997 and 17 in 2013. China currently has 12 built-in 31 reactors planned for construction (IAEA-PRIS, 2019). Although China is one of the most advantageous countries in the world in terms of hydrocarbon energy sources, the need for energy has increased with the rapid growth experienced in the industry in recent years and thus, it has become an important importer of energy. China has attempted to meet some of its energy needs through nuclear power plant investments (IAEA, 2015-2016-2017b).

Nuclear Power in India; India is turning to nuclear investments for electricity generation due to the lack of hydrocarbon resources (WNA, 2018d). India has launched a nuclear program to meet future energy demands. The goal is to increase the nuclear rate from 3% to approximately 25% in electricity generation to limit the energy import to the current level (approximately 30%) (Vaillancourt et al., 2007: 3).

Advantages of Nuclear Energy; The most important advantages of nuclear technologies are their capacity to produce large amounts of energy continuously from a small number of primary sources (Vaillancourt et al., 2007: 2). A parallelism can be established between decentralization of industry and nuclear energy. Electrical energy from nuclear energy has a significant share in the spread of industrial facilities towards Canada, Scandinavian countries, the northern regions of Europe Russia and Siberia (Doğanay & Coşkun, 2017: 280). The raw material used in nuclear power plants occupy very little space and provide a very high amount of energy (Doğanay & Coşkun, 2017: 277). As fuel cost in nuclear energy is low, the generation of electricity from this energy creates a potential stability effect in electricity prices (TAEK, 2010). Nuclear energy is a factor that improves the nuclear technology of countries. Nuclear technology is widely used in the fields of scientific research, agriculture, animal husbandry, food security, industry, electronic and space technologies (Er & Sunal, 2008: 196). Nuclear energy is an energy source that does pollute the air by emitting greenhouse gases. Therefore, this energy source is an important tool in limiting the carbon released to the environment (TAEK, 2010). Nuclear energy is considered to be an important resource for the management of atmospheric greenhouse gas and the management of climate change due to atmospheric greenhouse gas (Zinkle & Was, 2013: 735). Another advantage of nuclear power plants is the use of less land than other plants (Temurçin & Aliagaoglu, 2003: 27).

Disadvantages of Nuclear Energy; The potential danger caused by the transportation of used nuclear fuel and hazardous wastes. Recycling of spent fuel is an expensive procedure. There is also the risk of nuclear theft and terrorist attacks (Namli & Namli, 2014: 34). If radioactivity is accidentally released during nuclear energy production, it has the potential to cause harm to humans and the environment (NEA, 2012: 37). Since radioactive waste released in nuclear power plants can be used in the construction of weapons, and the widespread use of this technology can make nuclear weapons widespread (Üçgül & Elibüyük, 2016: 290-291). Since the establishment of nuclear power plants can take as long as 20 to 30 years due to bureaucratic and technical obstacles and delays, the construction of nuclear power plants may be difficult (Üçgül & Elibüyük, 2016: 291; Akova, 2016: 124).

5. Conclusions

Nuclear energy has a great impact not only on the energy structure but also on the global economy and politics. Nuclear power technologies are now further developed and the scope of its application is not limited to electricity generation. Nuclear energy is increasingly used in various fields such as industry, agriculture, medicine, environmental protection etc. Nuclear energy, as a capital intensive and centralized technology, is envisaged as a long-term and high-performance option and can contribute to climate policies and energy security by taking into account oil and gas risks that are highly volatile in international markets. However, nuclear energy has some important limitations such as its development, risk of accidents, production and management of radioactive waste and low overall social acceptance. In addition to its benefits, nuclear energy is also used in the construction of weapons that

have the effect of creating disasters. However, it is not possible to abstain from producing nuclear energy due to the disadvantages of nuclear power plants. Nuclear power plants established by taking the necessary measures in nuclear energy production with state-of-the-art technologies will bring many benefits to countries and societies as well as minimizing its shortcomings.

Nuclear plants are viewed as an advantageous solution for avoiding environmental problems such as acid rain, air pollution, mining, and oil spills on bio-systems resulting from the burning of fossil fuels. The fuels in the nuclear power plants are re-used by re-processing the used fuels. Also, nuclear energy that is sensitive to the environment in terms of CO₂ emissions released into the atmosphere does not pollute unlike the production of energy from coal, petroleum, natural gas. Therefore, it does not have a negative effect on global warming.

Most of the top ten countries in nuclear production are strong countries in international relations. It can be said that one of the factors determining their power is actually nuclear energy. Possible conflicts between these countries, however, can be devastating to the extent that it can disrupt world economies and markets.

Notes

¹This article is an updated and extended version of my paper “Nuclear Energy Outlook and Future in the Global Dimension” presented at “Al Farabi 1st International Congress of Social Sciences”.

Referanslar/References

- Akbaş, Z. (2013). İran'ın Nükleer Enerji Politikası ve Yansımaları. *History Studies*, 5 (2), 21-44.
- Akova, İ. (2016). *Enerji Kullanımındaki Değişimler*. Ankara: Nobel Yayınevi.
- Bahçe, A.B., Gümüş, Ö. (2016). Fiscal Risks and Expectations of Turkey in Terms of Nuclear Energy in Central Asia and Caucasus: A Praxiologic Dissection, *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9 (2), 26-144.
- British Petroleum (BP, 2011). *Statistical Review of World Energy 2011*. 15.07.2018 tarihinde www.bp.com/energyoutlook adresinden edinilmiştir.
- British Petroleum (BP, 2017). *BP Energy Outlook* (17 Edition). 15.07.2018 tarihinde www.bp.com/energyoutlook adresinden edinilmiştir.
- Çelik, İ., Çeker, A., Belge, R. (2015). Nükleer Enerji: Türkiye ve Dünya Ölçeğinde Bir Değerlendirme. *Yeni Fikir*, 6 (15), 55-68.
- Dellinger, F., Schratzenstaller, M. (2017). *Sustainability-oriented Future EU Funding: A European Nuclear Power Tax, FairTax*. Working Paper Series No.09, H2020-EURO-SOCIETY-2014.
- Doğanay, H., Çoşkun, O. (2017). *Enerji Kaynakları*. Ankara: Pegem Akademi.
- Duffey, R. B. (2005). Sustainable Futures Using Nuclear Energy, *Progress in Nuclear Energy*. 47 (1-4), 535-543. doi:10.1016/j.pnucene.2005.05.054
- Er, Ç., Sunal, S. (2008). Dünyada Nükleer Enerji Kullanımı ve Yeni Yaklaşımlar. *21. Yüzyıl*, Temmuz/Ağustos/Eylül, 193-204.
- Eroğlu, G., Şahiner, M. (2017). *Dünya'da ve Türkiye'de Uranyum ve Toryum*. MTA Genel Müdürlüğü, Maden Serisi, 3, Ankara.
- International Atomic Energy Agency & Power Reactor Information System (IAEA/PRIS, 2019). *World Statistics*. 13.01.2019 tarihinde <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByCountry.aspx> adresinden edinilmiştir.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2013). *Annual Report 2013*.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2014). *Nuclear Technology Review 2014*. Printed by the IAEA in Austria, 18.09.2018 tarihinde www.iaea.gov adresinden edinilmiştir.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2015). *Nuclear Technology Review 2015*. Printed by the IAEA in Austria, 18.09.2018 tarihinde www.iaea.gov adresinden edinilmiştir.

- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2016). *International Atomic Energy Agency's Power Reactor Information Systems Database*. 20.08.2018 tarihinde www.nei.org Wold Statistics- Nuclear Energy Institute adresinden edinilmiştir.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2016). *Nuclear Technology Review 2016*. 25.09.2018 tarihinde www.iaea.gov adresinden edinilmiştir.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2017a). *Country Nuclear Power Profile. Russian Federation*. 18.09.2018 tarihinde <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Russia/Russia.htm> adresinden edinilmiştir.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2017b). *International Status and Prospects for Nuclear Power 2017*. 60 Years Atoms for Peace and Development Board of Governors General Conference, GOV/INF/2017/12-GC(61)/INF/8, 1-14.
- International Atomic Energy Agency (IAEA, 2018). *PRIS Power Reactor Information System Russian Federation*. 18.09.2018 tarihinde www.iaea.org/PRIS/CountryStatistic/CountryDetails.aspx?current=RÜ adresinden edinilmiştir.
- International Energy Agency (IEA, 2008). *Energy Outlook*. France, Paris, 15.09.2018 tarihinde www.iaea.gov adresinden edinilmiştir.
- International Energy Agency (IEA, 2016). *Annual Energy Outlook*. 18.09.2018 tarihinde www.iea.gov adresinden edinilmiştir.
- International Energy Agency (IEA, 2017). *Annual Energy Outlook*. 15.10.2018 tarihinde www.iea.gov adresinden edinilmiştir.
- Kadak, A. C. (2004). A Future For Nuclear Energy, *Pebble Bed Reactors*, 1-22.
- Karabulut, Y. (2003). *Enerji Kaynakları*, Ankara: Ankara Üniversitesi Basımevi.
- Köksal, B., Civan, A. (2010). Nükleer Enerji Sahibi Olma Kararını Etkileyen Faktörler ve Türkiye İçin Tahminler. *Uluslararası İlişkiler*, 6 (24), 117-140.
- Namli, T. H., Namli, S. S. (2014). Nuclear Power in Turkey: Pros and Cons. *Journal of WEI Business and Economics, The West East Institute, December*, 3 (3), 26-38.
- Nuclear Energy Agency (NEA, 2012). *Nuclear Energy Today*. Second Edition, No. 6885, Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation and Development.
- Nuclear Energy Agency (NEA, 2016). *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. 05.04.2018 tarihinde www.nea.gov adresinden edinilmiştir.
- Nuclear Energy Institute (NEI, 2017). *Nuclear Energy*. 05.04.2018 tarihinde www.nei.org adresinden edinilmiştir.
- Nükleer Akademi (2017). *Nükleer Enerji Nedir?* 05.04.2018 tarihinde www.nukleerakademi.org adresinden edinilmiştir.
- OECD NEA & IAEA. (2017b). *Uranium 2016: Resources, Production and Demand ('Red Book')*, World Uranium Mining Production. 05.04.2018 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx> adresinden edinilmiştir.
- Önder, H., Gündüz, İ. (2017). Nükleer Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Literatür Üzerinden Bir İnceleme. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5, 117-133.
- Payne, J. E., Taylor, J. P. (2010). Nuclear Energy Consumption and Economic Growth in the U.S.: An Empirical Note, *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5 (3), 301-307. doi:10.1080/15567240802533955
- Red Book (2016). "Red Book" Uranium Report is Published, 46.
- Sağdık, U. (2006). Türkiye’de Nükleer Enerji İle Elektrik Üretimi İçin Bir Görüş. *Türkiye 10. Enerji Kongresi 27-30 Aralık 2006*, Ankara.
- Şimşek, T., Aydın, H. İ. (2018). Gelişmiş Ülkelerde Nükleer Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi Üzerine Panel Veri Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23, 727-737.
- Temurçin, K., Aliagaoglu, A. (2003). Nükleer Enerji ve Tartışmalar Işığında Türkiye’de Nükleer Enerji Gerçeği. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 1(2), 25-39.
- Tümertekin, E., Özgüç, N. (2015). *Ekonomik Coğrafya Küreselleşme ve Kalkınma*, İstanbul: Çantay Kitabevi.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK, 2010). *Nükleer Enerji ve Sürdürülebilir Kalkınma*. 10.02.2018 tarihinde www.taek.gov.tr adresinden edinilmiştir.
- U.S. Department of Energy (2018). *U.S. Nuclear Energy and Its Future*, January 23, 2018, INMM Spent Fuel Management Seminar.
- U.S. Energy Information Administration (EIA, 2015). *Today in Energy*. 20.08.2018 tarihinde www.eia.gov adresinden edinilmiştir.

- U.S. Energy Information Administration (EIA, 2017). U.S. *Energy Information Admin International Energy Outlook 2017*, September 14, 2017, 15.03.2018 tarihinde www.eia.gov/ieo adresinden edinilmiştir.
- Uzun, A.D., Kalaycı, İ. (2015). *Türkiye’de İktisadi Açıdan Nükleer Enerji Tercihi, I. Uluslararası Avrasya Enerji Sorunları Sempozyumu 28-30 Mayıs 2015*, Bildiriler Kitabı içinde (144-158). İzmir.
- Vaillancourt, K., Labriet, M., Loulou, R., Waub, J. P. (2007). The Role of Nuclear Energy in Long-Term Climate Scenarios: An Analysis with the World-TIMES Model. *Les Cahiers du GERADG*–2007–29, 1-20.
- Wolde-Rufael, Y. (2010). Bounds Test Approach to Cointegration and Causality Between Nuclear Energy Consumption and Economic Growth in India. *Energy Policy*, 38, 52–58. doi:10.1016/j.enpol.2009.08.053
- World Nuclear Association (WNA, 2014). *Nuclear Power Today*. 15.03.2018 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today/> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2016). *Nuclear Power Today*. 15.03.2018 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2017). *Nuclear Power Today*. 15.03.2018 tarihinde www.world-nuclear.org adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018a). *Nuclear Power in Russia*. 15.03.2018 tarihinde www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018b). *Nuclear Power in the European Union*. 15.03.2018 tarihinde www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018c). *Nuclear Power in the USA*. 15.03.2018 tarihinde www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018d). *Nuclear Power in India*. 15.06.2018 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018e). *Nuclear Power in Turkey*. 15.06.2018 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/turkey.aspx> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018g). *Nuclear Power in Belarus*. 08.01.2019 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/belarus.aspx> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2018h). *Nuclear Power in Bangladesh*. 08.01.2019 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/bangladesh.aspx> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association (WNA, 2019). *Information Library Index*. 11.01.2019 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/index.aspx?atozscroll=C> adresinden edinilmiştir.
- World Nuclear Association. (2018f). *Nuclear Power in the United Arab Emirates*. 08.01.2019 tarihinde <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-arab-emirates.aspx> adresinden edinilmiştir.
- Yan, Q., Wang, A., Wang, G., Yu, W., Chen Q. (2011). Nuclear Power Development in China and Uranium Demand Forecast: Based on Analysis of Global Current Situation. *Progress in Nuclear Energy*, 53, 742-747. doi: 10.1016/j.pnucene.2010.09.001
- Yemane, W. R., Menyah, K. (2010). Nuclear Energy Consumption and Economic Growth in Nine Developed Countries. *Energy Economics*, 32, 550–556.
- Yim, M. S. (2006). Nuclear Nonproliferation and the Future Expansion of Nuclear Power. *Progress in Nuclear Energy*, 48, 504-524. doi:10.1016/j.pnucene.2005.10.003
- Zinkle, S. J., Was, G. S. (2013). Materials Challenges in Nuclear Energy. *Acta Materialia*, 61, 735–758. doi:10.1016/j.actamat.2012.11.004