

Nükleer Enerji ve Türkiye

Sektör Değerlendirme Raporu
Mays'17



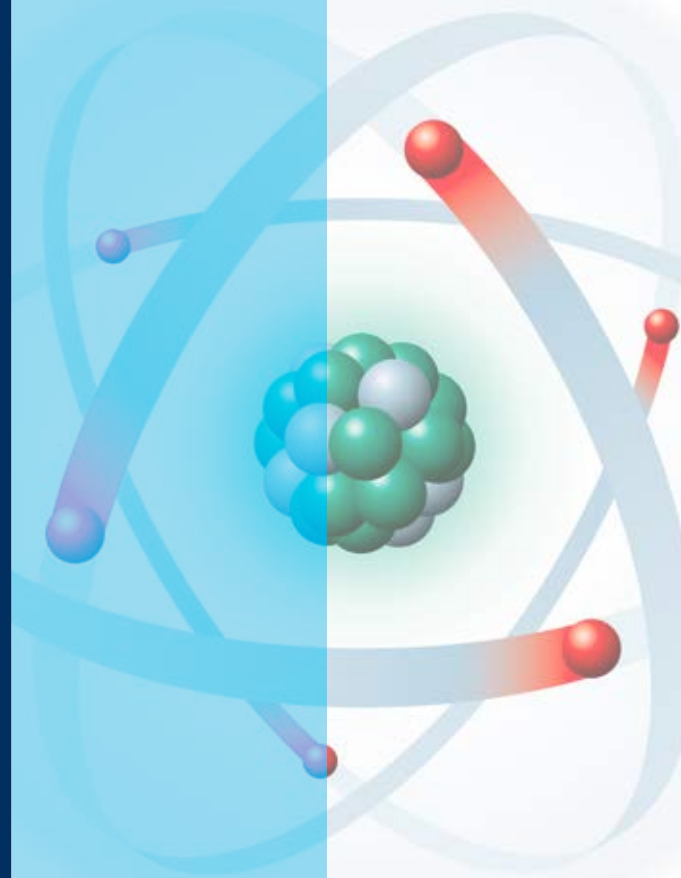
thinktech
STM Future Technology Institute



thinktech
STM Future Technology Institute

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER	6
TABLO LİSTESİ	8
KISALTMALAR	10
YÖNETİCİ ÖZETİ	12
1. GİRİŞ.....	14
2. NÜKLEER ENERJİNİN TEMELLERİ	16
3. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE NÜKLEER ENERJİ...22	
3.1. NÜKLEER ENERJİNİN TARİHİ	23
3.2. FAALİYETTE OLAN VE YAPIM AŞAMASINDAKİ NÜKLEER GÜÇ SANTRALLERİ	24
3.3. NÜKLEER YAKIT	28
3.4. URANYUM KAYNAKLARI VE ÜRETİM	30
3.5. TÜRKİYE'NİN NÜKLEER TARİHİ	32
4. NÜKLEER TEKNOLOJİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ	36
4.1. BASINÇLI SU REAKTÖRÜ (PWR).....	38
4.2. KAYNAR SULU REAKTÖRÜ (BWR).....	40
4.3. BASINÇLI AĞIR SU REAKTÖRÜ (PHWR).....	41
4.4. GELİŞMİŞ GAZ SOĞUTMALI REAKTÖR (AGR)...42	
4.5. HAFİF SU SOĞUTMALI GRAFİT	
YAVAŞLATICILI REAKTÖR (RBMK)	43



4.6. HIZLI NÖTRON REAKTÖRLERİ (FNR)	43
4.7. GELİŞMİŞ NÜKLEER GÜÇ REAKTÖRLERİ	44
4.8. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER (SMR).....	46
5. NÜKLEER ENERJİYE İLİŞKİN RİSKLER VE FAYDALAR	50
5.1. RİSKLER VE ENDİŞELER.....	51
5.2. FAYDALAR.....	63
6. TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ÜRETİMİ VE NÜKLEER ENERJİNİN ROLÜ	72
7. NÜKLEER ENERJİ PROJELERİNİN EKONOMİK ETKİLERİ	76
7.1. ELEKTRİK ÜRETİMİ	77
7.2. YENİ İŞ İMKANLARI YARATILMASI	77
7.3. TEKNOLOJİK İLERLEME	78
7.4. YEREL ENDÜSTRİ KATILIMI	80
7.5. BÖLGESEL EKONOMİ	83
7.6. İHRACAT KABİLİYETİ	83
8. SONUÇ	86
KAYNAKÇA.....	92

SORUMSUZLUK VE FİKRİ MÜLKİYET HAKKI BEYANI

İşbu eserde/internet sitesinde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup bu eser/internet sitesinde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir.

STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde/internet sitesinde sunulan verilerin/bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde/internet sitesinde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir.

Bu eserde/internet sitesinde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın eserde/internet sitesinde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.

ŞEKİLLER

	Sayfa		Sayfa
Şekil 1: Zincirleme Nükleer Reaksiyon	17	Şekil 22: SMR Geliştiren Ülkeler	46
Şekil 2: Örnek Bir Nükleer Güç Santralinin Ana Bileşenleri	18	Şekil 23: Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği	51
Şekil 3: Buhar Türbini	19	Şekil 25: Çernobil Nükleer Güç Santrali	53
Şekil 4: Soğutma Kulesi	20	Şekil 24: Three Mile Adası Nükleer Güç Santrali	53
Şekil 5: Kaynak Bazında 2014 Dünya Elektrik Üretimi	24	Şekil 26: Kaza Sonrası Fukushima Daiichi Nükleer Güç Santrali	54
Şekil 7: Dünyadaki Faaliyette Olan Reaktörlerin Haritası	26	Şekil 27: Farklı Nükleer Malzeme ve Yan Ürünlerde Zamanla Gözlemlenen Radyotoksinite Değişimi	55
Şekil 6: Nükleer Reaktör Sayıları ve Ülke Bazında Elektrik Üretimi (2015)	26	Şekil 28: Kullanılmış Yakıt Depolama Havuzu	56
Şekil 8: Dünyada Yapım Aşamasındaki Reaktörlerin Haritası	28	Şekil 29: Tehditlerdeki Artan Karmaşıklık	60
Şekil 9: Nükleer Yakıt Çevrimi	30	Şekil 30: Farklı Kurumların Küresel Sıcaklık Artışı Tahminleri	63
Şekil 10: Tek Bir Uranyum Peletinin Enerji Eşdeğeri	30	Şekil 31: GWh Üretim Başına Farklı Enerji Üretimi Yöntemleri ile Ortaya Çıkan Sera Gazı Emisyonları	64
Şekil 11: Türkiye Komşularının Reaktör Konumları	33	Şekil 32: Elektrik Üretiminde Farklı Kaynakların Kullanımına İlişkin Tahminler	65
Şekil 12: Nükleer Reaktörlerin Tarihsel Gelişimi	37	Şekil 33: Dünyanın Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Ürettiği Net Elektrik Miktarı (trilyon kilovat saat)	66
Şekil 13: Basınçlı Su Reaktörü (PWR)	39	Şekil 34: Farklı Faiz Oranlarıyla Termal Teknolojilerin LCOE Maliyetlerinin Karşılaştırılması	67
Şekil 14: Fransa'daki Saint Laurent Nükleer Güç Santrali (PWR)	39	Şekil 35: Temsili Ülkelerdeki Farklı Elektrik Üretim Yöntemleri İçin Sistem Maliyetleri ve LCOE	68
Şekil 15: Kaynar Sulu Reaktör (BWR)	40	Şekil 36: Nükleer Enerji Alanında İnsan Kaynağına İhtiyaç Duyan Kurum ve Kuruluşlar	70
Şekil 16: İspanya'daki Cofrentes Nükleer Güç Santrali (BWR)	40	Şekil 37: Nükleer Ağır Ekipman İmalatı	82
Şekil 17: Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR)	41		
Şekil 18: Gelişmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (AGR)	42		
Şekil 19: İskoçya'da Torness Güç Santrali (AGR)	42		
Şekil 20: Rusya'da Leningrad Nükleer Güç Santrali (RBMK)	43		
Şekil 21: Fransa'da Superphenix Nükleer Güç Santrali (FBR)	44		

TABLO LİSTESİ

	Sayfa		Sayfa
Tablo 1: Genel Nükleer Enerji Tarihi	23	Tablo 12: Kısa Vadede Konuşlandırılacak SMR'ler (25 MW(e)'ye kadar)	47
Tablo 2: Faaliyette Olan Reaktörler	25	Tablo 13: Başlangıç Aşamalarındaki SMR Tasarımları (ya da Beklemede Olan)	48
Tablo 3: Yapım Aşamasındaki ve Planlanan Reaktörler	27	Tablo 14: Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği	52
Tablo 4: Farklı Maddelerin Enerji İçerikleri	29	Tablo 15: NGS'lerde Üretilen Atık Çeşitleri	55
Tablo 6: Çeşitli Ülkelerde Yıllık Uranyum Üretimi (ton)	31	Tablo 16: Yakın Yüzey ve Derin Jeolojik Bertaraf Örnekleri	57
Tablo 5: Bilinen Uranyum Kaynağı Olan Ülkeler	31	Tablo 17: Ülkelerin Ulusal YSA Yönetim Politikaları	57
Tablo 7: Türkiye Nükleer Enerji Tarihi	32	Tablo 18 : 2015-2020 Arasında İnşa Edilen Tesisler İçin Öngörülen Nükleer LCOE Maliyetleri, \$/MWh	67
Tablo 8: Ticari Faaliyetteki Nükleer Reaktörler	38	Tablo 19: Türkiye Elektrik Üretiminde Farklı Kaynakların Payı	73
Tablo 9: GIF Tarafından Geliştirilmekte Olan IV. Nesil Reaktör Tasarımları	45	Tablo 20: 2017-2026 İçin Brüt Elektrik Talebindeki Değişime İlişkin Tahminler	74
Tablo 10: Faaliyetteki SMR'ler	47	Tablo 21: Nükleer Güç Santrallerinde Meslek ve Yeterlilik Unvanları	78
Tablo 11: Kurulum Aşamasındaki SMR Tasarımları	47	Tablo 22: Nükleer Güç Santrallerinin İnşaatı ile İlgili Faaliyetlerin Dağılımı	79

KISALTMALAR

ACR	Gelişmiş CANDU Reaktörü (Advanced Candu Reactor)
AEC	Atom Enerjisi Komisyonu (Atomic Energy Commission)
AGR	Gelişmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (Advanced Gas-Cooled Reactor)
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
BWR	Kaynar Sulu Reaktör (Boiling Water Reactor)
DSA	Düşük Seviyeli Atık
EBR	DeneySEL Üretken Reaktör (Experimental Breeder Reactor)
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
FBR	Hızlı Üretken Reaktörler (Fast Breeder Reactor)
GSYH	Gayrisafi Yurt İçi Hasıla
HTGR	Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör (High Temperature Gas Cooled Reactor)
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)
INES	Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği (International Nuclear Event Scale)
KÇGT	Kombine Çevrim Gaz Türbini
LCOE	Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost Of Electricity)
LEU	Düşük Düzeyde Zenginleştirilmiş Uranyum (Low Enriched Uranium)
LWR	Hafif Su Reaktörleri (Light Water Reactors)
MDEP	Çok Uluslu Tasarım Değerlendirme Programı (Multinational Design Evaluation Program)
MEPHI	Moskova Fizik Mühendisliği Enstitüsü (Moscow Engineering Physics Institute)

MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MWe	Megawatt elektrik
MWt	Megawatt termal
NGS	Nükleer Güç Santrali
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (Organisation for Economic Cooperation and Development)
OSA	Orta Seviyeli Atık
PHWR	Basınçlı Ağır Su Reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor)
PWR	Basınçlı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor)
RBMK	Hafif Sulu Grafit Yavaşlatıcılı Reaktör (Light Water Graphite-Moderated Reactor)
RCP	Reaktör Soğutucu Pompaları (Reactor Coolant Pumps)
SMR	Küçük Modüler Reaktörler (Small Modular Reactors)
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş.
TMI	Three Mile Adası
U	Uranyum
VVER	Su-Su Enerji Reaktörü (Water-Water Energetic Reactor)
YİD	Yap İşlet Devret
YSA	Yüksek Seviyeli Atık
YSİ	Yap-Sahip Ol-İşlet

Yönetici Özeti

Nükleer sistemin en önemli avantajı, ana yük enerji üretimi yeteneği ile düşük karbon salımlı elektrik üretimidir. Bu da nükleer santralleri kömür santrallerine en önemli alternatif yapmaktadır.

Nükleer enerji, %11 oranında payla elektrik üretiminde dünyanın önemli enerji kaynaklarından olan, aynı zamanda güvenlik ve atık yönetimi konularıyla sıkça tartışılmakta olan bir enerji türüdür. Hâlihazırda gelişmiş Batı ülkelerinin çoğu, kayda değer kurulu nükleer kapasiteye sahiptir. Bu ülkeler neredeyse tüm fosil yakıtlı santralleri kapatmayı ve yeni nükleer santral kurulumlarını sınırlamayı planlamaktadır. Öte yandan Çin, Hindistan, Mısır, Suudi Arabistan gibi Uzak Doğu ve Orta Doğu ülkeleri yeni nükleer güç santrali yatırımları planlamaktadır. Türkiye de bu ülkeler arasında olup toplam 12 reaktör ünitesi ve toplamda yaklaşık 15000 MWe kurulu kapasiteye sahip üç nükleer güç santrali planlanmıştır. Bu projelerin önümüzdeki on yıl içerisinde hayata geçirilmesi beklenmektedir.

Nükleer yakıt genel olarak yeryüzünde ve deniz suyunda bolca bulunan uranyum bazlı maddelerden üretilmektedir. Reaktörlerde nükleer yakıt olarak kullanılmak üzere zenginleştirilmiş uranyumun uluslararası pazarda serbestçe ticareti yapılabilmektedir. Yıllık bazda her bir reaktörde kullanılan yakıt miktarı hacim olarak nispeten düşüktür. Bu da arz sorunu yaratmadan uzun bir süre boyunca taze yakıtın depolanmasını mümkün kılar. Buna ilaveten uranyum fiyatları, petrol veya doğal gaz gibi diğer enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında yıllardır nispeten istikrarlı bir seyir izlemektedir.

Nükleer sistemin en önemli avantajı, ana yük enerji üretimi yeteneği ile düşük karbon salımlı elektrik üretimidir. Bu da nükleer santralleri kömür santrallerine en önemli alternatif yapmaktadır. Rekabetçi elektrik üretim maliyeti nükleer enerjiyi cazip kılmaktadır. Öte yandan, nükleer ile ilgili yatırım kararını etkileyen bazı hususlar mevcuttur. Güvenlik endişeleri ve kazalar nükleer için her zaman potansiyel tehditler olarak düşünülmüştür. Çözülemez atık sorunu ve yüksek seviye radyoaktif atıklardan kaynaklanan uzun vadeli radyoaktivite hususu da diğer problemler olarak dikkate alınmıştır. Nispeten yüksek sermaye maliyeti, finansman gereksinimleri ve uzun süren santral kurulum süreleri de nükleer güç santralleriyle ilgili diğer hususlardır.

Nükleer enerjiyi elektrik üretimine alternatif olarak düşünen ülkeler aynı zamanda işletme desteği ve lisanslama/düzenleyici faaliyetler için gerekli altyapıyı da geliştirmelidirler. Nitelikli insan kaynağını sağlamak için gerekli eğitim ve öğretim altyapısı geliştirilmelidir. Maalesef, nükleer enerjiyle yakından ilgilenen ülkelerde bile yüksek nitelikli personel eksiği bulunmaktadır. Nükleer güç santrallerinin kurulumundan önce ilgili kurumsal çerçevenin iyi tespit edilmesi gerekmektedir.

Nükleer enerji projelerinin ekonomik etkisi elektrik üretimi ile sınırlı değildir. Nitelikli personel için istihdam fırsatları, yerel ekonomiye katkı, hükümet için vergi geliri, yan faaliyet alanları ve sektörlerin oluşturulması da nükleer güç santrallerinin en önemli avantajlarından.

Elektrik üretiminde uygulanabilir bir seçenek olarak nükleer enerjinin hayata geçirilmesi ile bir nükleer sanayi oluşumu söz konusudur. Sanayi altyapısının gücüne bağlı olarak yerli sanayinin katılımı ve nükleer güç santralleri için üretimin yerleştirilmesi de yerli firmalar için bir fırsat olarak düşünülmektedir. Bu durum, firmaların nükleer teknoloji alanına katılımları için hazır olmalarını gerektirir. Bu firmalardan özellikle tasarım ve üretim yetenekleri, kalite güvence programları ve üretim sertifikalarını sağlamaları beklenmektedir. Aynı zamanda yüksek nitelikli insan kaynağı gerekmektedir. Diğer yandan nükleer alanındaki faaliyetler uzun vadede milyarlarca dolarlık iş fırsatları sağlayabilir. Bu fırsatlar, nükleer güç santrallerinin işletilmesi esnasında da varlıklarını sürdürürler.

Bu rapor, nükleer enerji ve ilgili hususlar hakkında bağımsız bir bakış açısı ile genel bilgi vermek maksadıyla hazırlanmıştır. Rapor ile mevcut teknoloji, kaynaklar, geleceğe dönük yönergeler, endişeler ve hususların yanı sıra ekonomik etki ve fırsatlar hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

1. Giriş

Bir ülkedeki nükleer teknolojinin gelişimi, sadece nükleer alanı için değil aynı zamanda diğer savunma, havacılık, uzay gibi yüksek teknoloji endüstrileri için de yararlı olacaktır.



Dünya nüfusundaki ve sanayileşmedeki artış enerji talebinde artışı da beraberinde getirmektedir. Ancak yeryüzündeki enerji kaynakları kısıtlı olup eşit dağılım sergilememektedir. Hatta bu durum siyasi istikrarsızlıklara ve uluslararası çatışmalara neden olmaktadır. Öte yandan, özellikle gelişmiş ülkelerde, iklim değişikliklerine sebep olan sera gazı salınımından dolayı fosil kaynakların kullanımından kaçınılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları çoğunlukla bölgeye bağlı ve sınırlı miktarda bulunmaktadır. Güvenilir enerji depolaması olmadan, yenilenebilir kaynakların ana yük enerji kaynağı olarak kullanımı zordur. Nükleer enerji birçok ülkede önemli miktarda elektrik üretimi sağlamaktadır. Ancak, nükleer enerji kullanımı doğası gereği ve bazı endişeler nedeniyle daima tartışılmaktadır.

Bu rapor, nükleer enerji hakkında genel bilgi vermek ve tarafsız bir bakış açısıyla ilgili hususları tartışmak için hazırlanmıştır. Söz konusu tartışma farklı ülkelerden farklı örneklerle zenginleştirilmiştir. Nükleer endüstrisinde yerleşme ve insan kaynağı gibi yeni başlayan ülkeler için önemli olabilecek konular da tartışmaya dâhil edilmiştir.

Raporun bölümleri ile ilgili ana hatlar aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

Raporun ikinci bölümünde nükleer enerji kavramına genel bakış, nükleer güç santrallerinin temel çalışma prensipleri ve ana bileşenleri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, 1950'lerde yapılan ilk nükleer çalışmalarla başlayan Türkiye'nin nükleer enerji tarihinin önemli kilometre taşları, Türkiye'nin nükleer enerji stratejisi ile planlanan nükleer güç santrallerinden bahsedilmiştir.

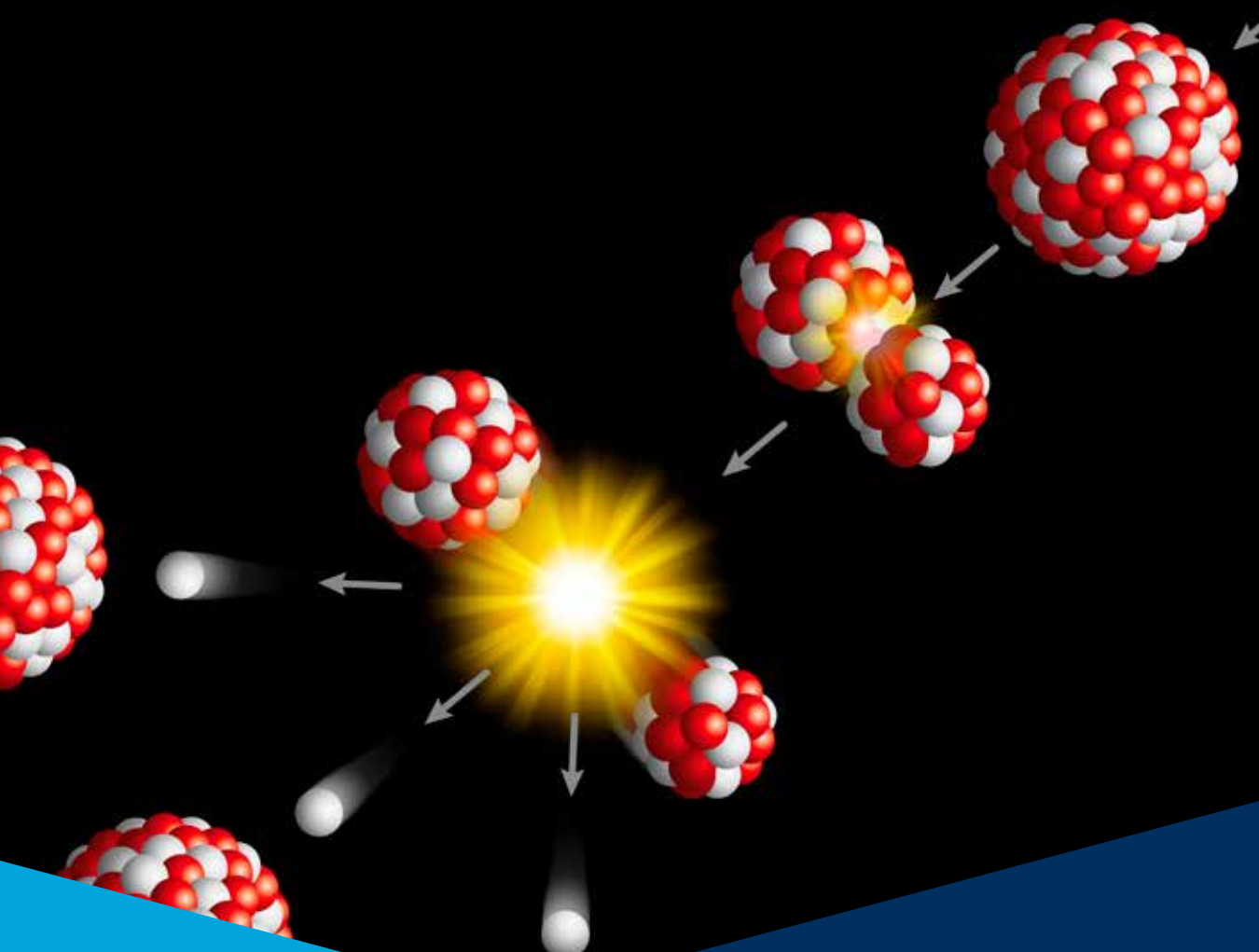
Dördüncü bölümde, nükleer teknolojinin tarihsel gelişimi, mevcut ve gelişmiş nükleer reaktör tasarımları detaylandırılmıştır.

Beşinci bölümde, nükleer enerji kullanımından kaynaklanan riskler/endişeler ve faydalar açıklanmıştır.

Risk ve endişeler, dünya çapında mevcut nükleer güç santrallerinde oluşan kazaları, kullanılmış yakıt depolanması ve atık imha yönetimi, siber güvenlik hususlarını, nitelikli iş gücü ve altyapı eksikliği ile çevresel kaygıları içermektedir. Nükleer enerji kullanımının sağladığı avantajlar ise düşük karbon salınımı, rekabetçi elektrik üretim maliyetleri, iyi gelişmiş bir nükleer sanayinin oluşması ve yüksek nitelikli iş gücü nükleer enerji kabiliyetine sahip olmanın büyük faydalarıdır.

Altıncı bölümde, Türkiye'de elektrik üretiminde farklı kaynakların katkısı belirtilmiştir. Son tahminlere göre, önümüzdeki 20 yıl boyunca elektrik tüketiminin Bölüm 6 içerisinde bahsedilen temel senaryoda bile iki katından fazla artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle artan talebi karşılayacak şekilde elektrik üretiminde uygun bir planlamaya ihtiyaç bulunmaktadır. Bu artan elektrik talebini karşılamak amacıyla Türkiye Cumhuriyeti hükümeti tarafından yenilenebilir kaynakların payının artırılmasına karar verilmiş ve kömür kullanımına ilişkin de kayda değer yeni kapasite geliştirme planları öngörülmüştür. Yeni nükleer projelerin entegrasyonu da elektrik üretiminde çeşitliliği artıracaktır. Kömür ve nükleer enerjinin kapasite faktörleri güneş ve rüzgâr enerjisi gibi diğer kaynaklardan çok daha fazladır. Bu nedenle, nükleer veya kömür santrallerinden üretilecek elektrik miktarına yaklaşabilmesi için yenilenebilir kaynaklara dayalı kurulu kapasitenin daha fazla olması gerekmektedir.

Son bölümde, Türkiye'de planlanan nükleer enerji projelerinin ekonomik etkileri ve katma değerleri detaylı olarak tartışılmıştır. Akkuyu ve Sinop nükleer güç santrallerinin elektrik üretimine katkıları ve çok sayıda işçi için yeni iş fırsatları ortaya çıkarmaları ekonomik gelişme için büyük fayda sağlamaktadır. Bir ülkedeki nükleer teknolojinin gelişimi, sadece nükleer alanı için değil, aynı zamanda diğer savunma, havacılık, uzay gibi yüksek teknoloji endüstrileri için de yararlı olacaktır. Yerli sanayinin katılımının artırılması, bölgesel ekonominin büyümesine verilen destek, ihracat kapasitesi için yaratılan fırsatlar, yerli tedarikçilerin geliştirdiği yetenekler ve küresel pazarda rekabetçi oyuncular haline gelmek nükleer teknoloji kullanımı ile kazanılabilecek diğer önemli faydalardır.



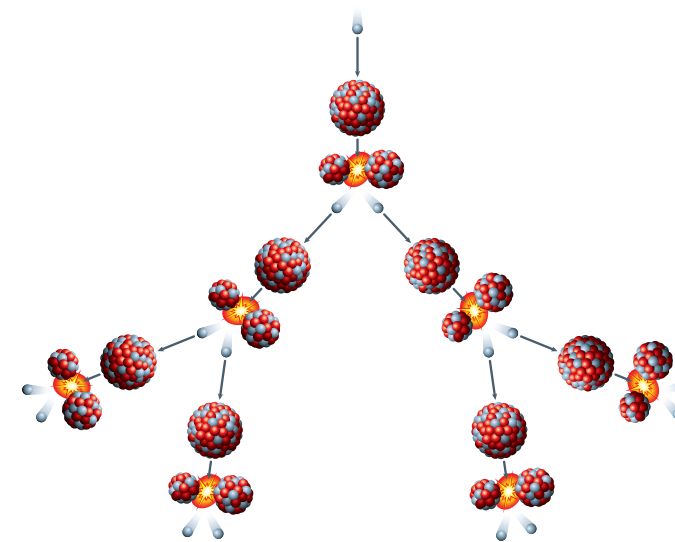
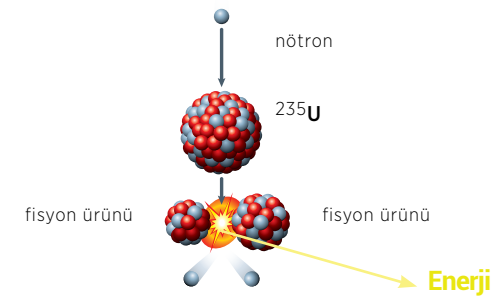
NÜKLEER ENERJİNİN TEMELLERİ

2. Nükleer Enerjinin Temelleri

Nükleer güç santralleri (NGS) ile elektrik üretimi, kömürle çalışan güç santralleri ile aynı termodinamik prensiplere dayanır. Temel çalışma prensibi basitçe aşağıdaki gibidir;

1. Suyun ısıtılmasıyla buhar üretimi,
2. Buhar vasıtasıyla türbinlerin döndürülmesi,
3. Enerji hatları boyunca jeneratörler vasıtasıyla üretilen elektriğin iletimi.

NGS'lerde suyu ısıtmak için uranyum adı verilen radyoaktif bir yakıt kullanılır ve bu santrallerde kritik birçok güvenlik tedbirinin alınmasının sebebi budur. NGS'lerin içerisinde bulunan ve nükleer yakıtın içerisinde tutulduğu reaktörün kalbinde oluşan yüksek sıcaklık, uranyumun fisyon tepkimesine girmesi ile ortaya çıkar. Nükleer fisyon, bazı ağır atom çekirdeklerinin bir nötronla çarpıştıktan sonra ikiye ayrıldığı süreçtir. Uranyumun bölünmesi için nötronlar uranyum çekirdeğine çarparlar ve çarpışma sonrasında daha çok serbest nötron ve daha çok küçük çekirdek meydana çıkar. Fisyon sonrasında serbest bırakılan nötronlar, diğer uranyum çekirdekleriyle çarpışırlar ve bu süreç yakıtın fisyonu tamamlanıncaya kadar devam eder. Dolayısıyla her aşama bir öncekine bağlıdır ve bu nedenle bu sürece zincirleme nükleer reaksiyon denir.



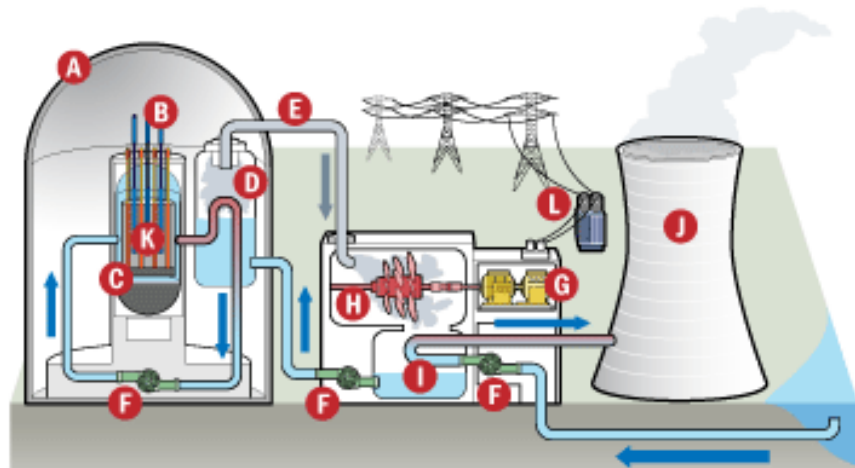
Bir nötron, fisil izotop uranyum-235 atomuna çarpar ve iki yeni küçük çekirdeğe bölünerek üç yeni nötron ve yüksek miktarda enerji salınır. Yeni nötronlar, daha sonra fisyonla uğrayacak ve daha fazla nötron, küçük çekirdekler ve daha fazla enerji açığa çıkaracak şekilde başka uranyum-235 atomlarıyla çarpışır. Çarpışmalar arasında açığa çıkan bu enerji reaktörlerde önemli derecede sıcaklık artışına neden olur.

Şekil 1: Zincirleme Nükleer Reaksiyon [1]

Zincirleme nükleer reaksiyon devamlı olarak kontrol altında tutulmalıdır. Reaksiyonun her bir aşaması bir önceki aşamaya göre iki katından fazla tepkimeye sebep olur ve bu süreç de kontrol altında tutulmadığı takdirde her bir aşamada üretilen enerji miktarının bir öncekinden iki katından fazla artmasına neden olur. Her bir aşama saniyenin milyonda birinden daha az sürede gerçekleşir ve bu nedenle üretilen ısı enerjisi olağanüstü seviyelere çıkabilir. Tüm bu tepkimeler sürecinde sabit enerji çıkışına ihtiyaç duyuluyorsa, her fisyon tepkimesi esnasında sadece bir nötronun başka bir fisyon reaksiyonuna girmesine izin verilmelidir. Bu reaksiyonları kontrol etmek için kontrol çubukları kullanılır. Kontrol çubukları genellikle, nötronları soğurabilecek ve nötronların sayısını azaltabilecek bor, gümüş, indiyum, kadmiyum ve hafniyum gibi kimyasal elementler kullanılarak üretilir ve böylece reaktör çalışırken enerji seviyesini kontrol etmede, gerektiğinde fisyon tepkimesini sonlandırmada kullanılır [2]. Kontrol çubuklarının seviyesi nükleer yakıtta ne kadar yaklaştırılırsa o kadar çok nötron soğurur ki bu da nükleer reaksiyonların sayısını azaltır. Acil bir durum olduğunda, sistemi kapatmak için kontrol çubukları tamamen reaktörün içine indirilir.

Reaktörün çalışması esnasında, yakıt çubukları etraflarındaki suyun ısınmasına neden olur. Isınan su yüksek sıcaklık ve basınçta buhar oluşturmak için buhar üreticisine aktarılır. Buhar, buhar hatlarından türbine beslenir ve yüksek enerjili buhar türbin kanatlarına çarparak türbin şaftını döndürür ve böylece bağlı jeneratörün elektrik enerjisi üretmesine neden olur. Son aşama olarak da elektrik enerjisi şehir şebekesine elektrik hatları vasıtasıyla aktarılır.

Inside a Nuclear Power Plant ©2011 HowStuffWorks



- | | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| A Koruma Binası | G Jeneratör |
| B Kontrol Çubukları | H Türbin |
| C Reaktör | I Soğutma ve Su Yoğuşturucusu |
| D Buhar Jeneratörü | J Soğutma Kulesi |
| E Buhar Hattı | K Yakıt Çubukları |
| F Pompa | L Transformatör |

Şekil 2: Örnek Bir Nükleer Güç Santralinin Ana Bileşenleri [3]

NGS ana ekipmanlarının çoğu reaktör koruma binaları (veya nükleer ada) ve türbin binalarının (türbin adası) içerisinde yer almaktadır. Reaktör koruma binası, içerisinde tüm radyoaktif ürünleri içerdiğinden özellikle önemlidir. Reaktör koruma binası, normal çalışma süresince, geçici arızalar ve kazalar esnasında radyoaktif maddenin hapsedilmesini, reaktörün doğal ve insan kaynaklı dış etkilere karşı korunmasını sağlamak üzere tasarlanmaktadır ve kritik önem arz etmektedir.

Reaktör koruma binası aşağıdaki ana bileşenleri içerir [4] [5] [6]:

- *Reaktör Kabı* (reactor vessel); reaktör kuru ve nötron yavaşlatıcı/soğutucu içeren sağlam çelikten oluşan basınçlı kaplıdır,
- *Uranyum Yakıtı*; peletler haline getirilmiş uranyum maddesi, zirkonyumdan yapılmış metal tüplerin içerisine yerleştirilir. Ardından bu çubuklar reaktör korundaki yakıt demetine yerleştirilir,
- *Yavaşlatıcı (moderator)*; nükleer reaktörün korunda bulunan ve fisyon sonucu ortaya çıkan hızlı nötronların hızını yavaşlatarak termal nötronlar haline getiren ve böylece daha fazla tepkimeye girmelerini sağlayan ortamdır. Genellikle sudur, ancak ağır su ya da grafit de olabilir.
- *Kontrol Çubukları (control rods)*; kadmiyum, hafniyum ya da bor gibi nötron emici maddelerden yapılırlar ve reaksiyon oranını kontrol etmek ya da durdurmak için kora sokulur ya da kordan çıkartılırlar,
- *Basınçlandırıcı (pressurizer)*; soğutma sıvısının (su) kaynamasını önleyerek devamlı sıvı halde tutmak için kullanılan basınçlı su reaktörünün bir bileşenidir,
- *Buhar Üretici (steam generator)*; bir nükleer reaktör korunda üretilen ısı vasıtasıyla besleme suyunu buhara dönüştürmek için kullanılan ısı değiştiricileridir,
- *Reaktör Soğutma Pompaları (reactor coolant pump - RCP)*; bu pompalar, soğutma suyunu basınçlandırarak reaktör soğutma sisteminde dolaşımını sağlar. Bu dolaşım, ısıyı reaktör korundan buhar üreticisine aktarır.

Türbin binasında, yüksek basınçlı buharla oluşan ısı enerjisi jeneratörü çalıştırmak için kullanılan mekanik işe dönüştürülür. Türbin binası aşağıdaki ana bileşenleri içerir;

- *Buhar Türbini (steam turbine)*; yüksek basınçlı buhardan ısı enerjisi elde eden ve jeneratöre bağlı bir dönen şaft üzerinde mekanik iş yapmakta kullanan cihazdır,



Şekil 3: Buhar Türbini

- *Jeneratör*; buhar türbininin mekanik enerjisi jeneratörlerde elektrik enerjisine dönüştürülür,
- *Yoğuşturucu (condenser)*; türbinden çıkan su ve buhar karışımını yoğuşturmak için kullanılır,
- *Yoğuşma-Besleme Suyu Sistemi (Condensate-Feedwater System)*; bu sistemlerin iki önemli fonksiyonu bulunmaktadır; buhar üreticisine yeterli miktarda yüksek kaliteli su sağlamak ve su sıcaklığını doyum noktasına yakın derecelere ayarlamaktır.

Kıyılarda kurulu birçok NGS yoğuşturucu içerisinde soğutma sağlamak için genellikle deniz veya nehir suyunu kullanmaktadır, ancak soğutma kuleleri de NGS'lerde soğutma suyu sağlamak amacıyla kullanılabilir.



Şekil 4: Soğutma Kulesi



DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE NÜKLEER ENERJİ

3. Dünyada ve Türkiye'de Nükleer Enerji

3.1. Nükleer Enerjinin Tarihi

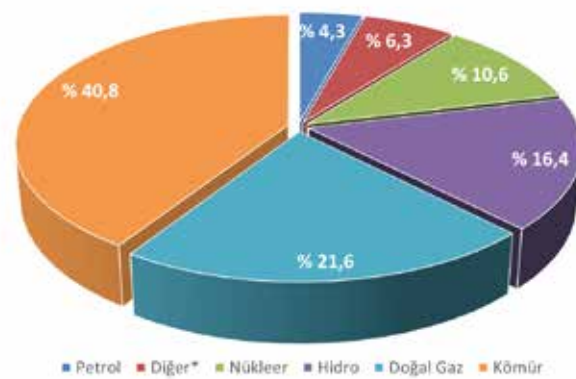
Tablo 1: Genel Nükleer Enerji Tarihi [7] [8] [9] [10]

YIL	TARİHÇE
1930'lar	Nötronlar keşfedildi.
	Uranyum atomları nötronlar ile bölündü, fisyon tepkimesi keşfedildi.
1940'lar	Fermi tarafından kendi kendine devam eden ilk zincirleme nükleer reaksiyonu gerçekleşti.
	Little Boy (küçük çocuk) lakaplı atom bombası Hiroşima, Japonya'ya atıldı. Üç gün sonra, bir diğer bomba, Fat Man (Şişman Adam) Nagasaki, Japonya'ya atıldı. 15 Ağustos'ta Japonya'nın teslim olmasıyla İkinci Dünya Savaşı sona erdi.
1950'ler	1946 yılında yürürlüğe giren Atom Enerjisi Yasası, nükleer enerji çalışmalarını denetlemek ve nükleer enerjinin barışçıl amaçlarla kullanımını sağlamak amacıyla Atom Enerjisi Komisyonu'nu (AEC) oluşturdu.
	Arco, Idaho'da Deneysel Üretken Reaktör I (EBR-I), dört ampulü aydınlatarak ilk defa nükleer enerjiden elektrik enerjisini üretti.
1960'lar	ABD donanmasının ilk nükleer denizaltısı Nautilus nükleer güç ünitelerini ilk kez çalıştırdı.
	Obninsk'de dünyanın ilk nükleer enerji ile çalışan elektrik jeneratörü faaliyete geçti. AM-1 (Atom Mirny - barışçıl atom) reaktörü, 30 MWT veya 5MWe tasarım kapasitesine sahip, su soğutmalı ve grafit moderatörlüydü.
1970'ler	Başkan Eisenhower Atom Enerjisi Yasası'nın ilk büyük eki olan 1954 Atom Enerjisi Yasası'nı imzaladı, böylece sivil nükleer enerji programına nükleer teknolojiye daha fazla erişim imkânı tanındı.
	1.000 nüfuslu Arco, Idaho, deneysel kaynar sulu reaktörü BORAX III tarafından nükleer enerjiyle elektrik sağlanan ilk şehir oldu.
1980'ler	Birleşmiş Milletler, nükleer enerjinin barışçıl kullanımını teşvik etmek ve dünya çapında nükleer silahların yayılımını önlemek amacıyla Viyana, Avusturya'da Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nı (IAEA) kurdu.
	Uzaydaki ilk nükleer reaktör (SNAP-10A) Amerika Birleşik Devletleri tarafından gönderildi ve bir nükleer pil ay üzerinde üç yıl boyunca kesintisiz çalıştı.
1990'lar	Petrol krizi sonrası Fransa büyük bir nükleer enerji programı başlattı.
	ABD tarihinin en büyük nükleer kazası olan Three Mile Adası reaktör kazası meydana geldi. Kaza, mekanik arıza ve insan hatası birleşiminden dolayı reaktör korundan gelen soğutma suyunun kaybindan kaynaklandı. Yetkililer tarafından kazanın ardından aşırı radyasyona maruz kalınmadığı belirtildi.
2000'ler	Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk defa nükleer enerji ile petrolden daha fazla elektrik üretildi.
	Yüksek seviyeli nükleer atık deposu geliştirilmesini onaylayan 1982 Nükleer Atık Politikası Yasası imzalandı.
2000'ler	Eski SSCB'de (şu anki Ukrayna topraklarında) Çernobil nükleer santralinde dünyanın en büyük nükleer reaktör kazası meydana geldi.
	İlk yüksek seviyeli nükleer atık deposu çalışması için Nevada'daki Yucca Dağı seçildi.
2000'ler	20.000 nükleer silahın enerjisini elektriğe çevirecek "Megatonlardan Megawattlara" programı başlatıldı. 2000 yılına kadar, ABD elektriğinin yaklaşık %10'u sökülün Rus savaş başlıklarından sağlandı.
	Dünyanın en eski nükleer güç santrali Obninsk tek reaktörünü kapattı.
2000'ler	11 Mart 2011 tarihinde, 9.0 şiddetinde bir deprem ve sonrasında oluşan tsunami yüzünden Fukushima nükleer santrali enkaza döndü, gıda ve suya bulaşan ve kitlesel tahliyelere neden olan nükleer erimeyi tetikledi.

3.2. Faaliyette Olan ve Yapım Aşamasındaki Nükleer Güç Santralleri

31 ülkede 449 nükleer enerji reaktörü bulunmaktadır [11]. Tablo 2, faaliyette olan reaktörlerin detaylarını ve bu enerji santrallerinin elektrik üretme kapasitelerini göstermektedir. Dünya üzerindeki toplam 391.386 MWe net nükleer reaktör kapasitesi 2.441 milyar kWh elektrik üretmektedir ki bu da toplam dünya elektrik üretiminin yaklaşık %11'ine karşılık gelmektedir.

Şekil 5'te gösterilen "2016 Key World Energy Statistics" verilerine göre, nükleer enerji %11 paya sahiptir ve %38 payla kömür halen elektrik üretiminde bir numaralı kaynaktır. Belirsiz maliyetler, güvenlik endişeleri, atık bertarafı ve radyasyon yayılma riski nükleer enerjinin gelecekteki durumunu öngörmeyi zorlaştırmaktadır ancak IAEA 2030 yılına kadar %17 ile %94 arası bir büyümeye işaret etmektedir ki yüksek %94'lük öngörü küresel üretim kapasitesinin iki katına çıkması anlamına gelmektedir.



*Diğer kaynaklar jeotermal, güneş, rüzgar vb. kaynaklardır.

Şekil 5: Kaynak Bazında 2014 Dünya Elektrik Üretimi [12]

Dünya genelinde faaliyette olan reaktörlerle ilgili bazı faktörler şu şekildedir;

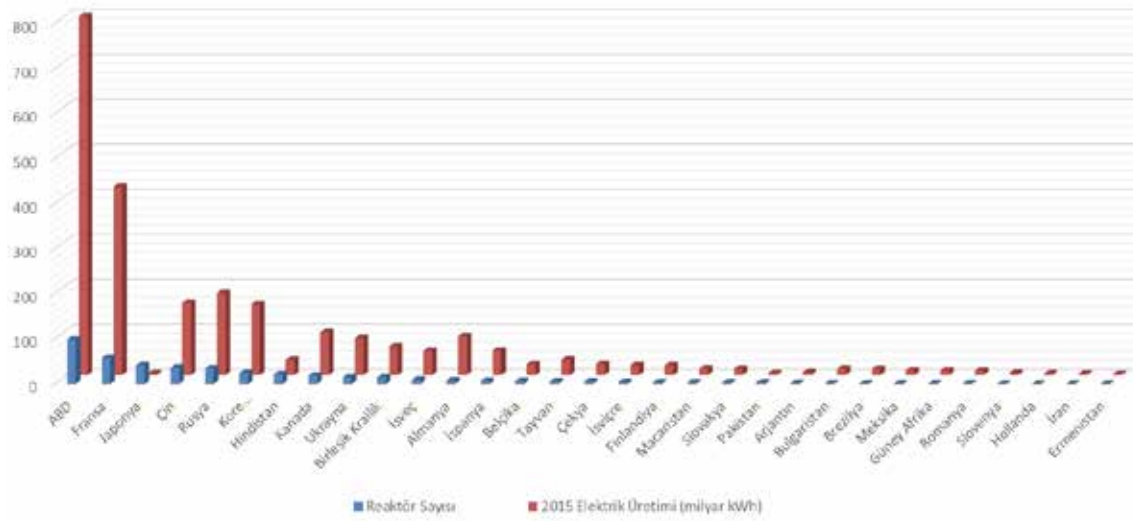
- En fazla sayıda reaktöre sahip ülke ABD'dir (99) ve bundan dolayı en yüksek nükleer elektrik üretim kapasitesine (798 milyar kWh) sahiptir.
- Fransa, nükleer enerjiye en bağımlı ve bu kaynaktan en fazla yararlanan ülkedir. Fransa, enerjisinin %76,3'ünü nükleer enerjiden sağlamaktadır.
- Macaristan, Slovakya ve Ukrayna enerjilerinin %50'den fazlasını nükleer enerjiden sağlamaktadır.
- Çekya, Finlandiya, İsveç, İsviçre ve Slovenya enerjilerinin %30'dan fazlasını nükleer enerjiden sağlamaktadır.
- Batı Avrupa ve Kuzey Amerika nükleer enerjiden elektrik üretiminde (her biri yaklaşık 112.000 MWe) baş aktörlerdir ve arkalarından Asya - Uzak Doğu (yaklaşık 100.000 MWe) gelmektedir.

Tablo 2 ve Şekil 6, faaliyette olan nükleer reaktörlerin ülke bazında toplam elektrik üretimini göstermektedir.

Tablo 2: Faaliyette Olan Reaktörler [13] [14]

ÜLKE	NÜKLEER ENERJİDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ 2015		FAALİYETTE OLAN REAKTÖRLER	
	milyar kWh	% e	Sayı	net MWe
Arjantin	6.50	4.80	3	1627
Ermenistan	2.60	34.50	1	376
Belçika	24.80	37.50	7	5943
Brezilya	13.90	2.80	2	1901
Bulgaristan	14.70	31.30	2	1926
Kanada	95.60	16.60	19	13553
Çin	161.20	3.00	37	32402
Çekya	25.30	32.50	6	3904
Finlandiya	22.30	33.70	4	2764
Fransa	419.00	76.30	58	63130
Almanya	86.80	14.10	8	10728
Macaristan	15.00	52.70	4	1889
Hindistan	34.60	3.50	22	6219
İran	3.20	1.30	1	915
Japonya*	4.30	0.50	42	39752
Kore Cumhuriyeti (Güney)	157.20	31.70	25	23017
Meksika	11.20	6.80	2	1600
Hollanda	3.90	3.70	1	485
Pakistan	4.30	4.40	4	1040
Romanya	10.70	17.30	2	1310
Rusya	182.80	18.60	35	26865
Slovakya	14.10	55.90	4	1816
Slovenya	5.40	38.00	1	696
Güney Afrika	11.00	4.70	2	1830
İspanya	54.80	20.30	7	7121
İsveç	54.50	34.30	10	9740
İsviçre	22.20	33.50	5	3333
Tayvan	35.10	16.30	6	4927
Ukrayna	82.40	56.50	15	13107
İngiltere	63.90	18.90	15	8883
ABD	798.00	19.50	99	99535
TOPLAM	2441	11.5	449	391386

* Japonya'da faaliyette olan 44 reaktör mevcuttur, ancak bunların 42'si kontrol maksadıyla devre dışı durumda olmakla birlikte potansiyel olarak yeniden çalıştırılabilirler [15].



Şekil 6: Nükleer Reaktör Sayıları ve Ülke Bazında Elektrik Üretimi (2015)



Şekil 7: Dünyadaki Faaliyette Olan Reaktörlerin Haritası [16]

Tablo 3'te görüldüğü üzere dünya çapında yapım aşamasında bulunan toplam 64.500 MW kapasiteli 60 nükleer reaktör bulunmaktadır [11]. Hâlihazırda nükleer güç santralleri bulunan birçok ülke yeni reaktörler inşa etmeyi planlamakta (Fransa (1), Finlandiya (1), ABD (4) ve Arjantin (1)) ve hızlı büyüyen ekonomilere ve buna paralel olarak hızla yükselen elektrik talebine sahip Doğu Avrupa, Orta Doğu ve Uzak Doğu'da 60 reaktörden 53'ü yapım aşamasındadır. Planlanan reaktörlere gelindiğinde bu resim büyümeye devam etmektedir; dünyada inşası planlanan toplamda 168 reaktörden 133'ü bu bölgelerde planlanmaktadır.

Tablo 3: Yapım Aşamasındaki ve Planlanan Reaktörler [13]

ÜLKE	YAPIM AŞAMASINDAKİ REAKTÖRLER		PLANLANAN REAKTÖRLER		URANYUM İHTİYACI ton U
	Sayı	brüt MWe	Sayı	brüt MWe	
Arjantin	1	27	2	1950	215
Ermenistan	0	0	1	1060	88
Bangladeş	0	0	2	2400	0
Belarus	2	2388	0	0	0
Belçika	0	0	0	0	1015
Brezilya	1	1405	0	0	329
Bulgaristan	0	0	1	950	327
Kanada	0	0	2	1500	1630
Çin	22	24166	40	45700	5338
Çekya	0	0	2	2400	565
Mısır	0	0	2	2400	0
Finlandiya	1	1700	1	1200	1126
Fransa	1	1750	0	0	9211
Almanya	0	0	0	0	1689
Macaristan	0	0	2	2400	356
Hindistan	5	3300	20	18600	997
Endonezya	0	0	1	30	0
İran	0	0	2	2000	178
Japonya	2	2756	9	12947	680
Ürdün	0	0	2	2000	0
Kazakistan	0	0	2	600	0
Kore Cumh. (Güney)	3	4200	8	11600	5013
Meksika	0	0	0	0	282
Hollanda	0	0	0	0	102
Pakistan	3	2662	0	0	270
Polonya	0	0	6	6000	0
Romanya	0	0	2	1440	179
Rusya	7	5904	25	27755	6264
Slovakya	2	942	0	0	917
Slovenya	0	0	0	0	137
Güney Afrika	0	0	0	0	304
İspanya	0	0	0	0	1271
İsveç	0	0	0	0	1471
İsviçre	0	0	0	0	521
Tayvan	2	2700	0	0	783
Türkiye*	0	0	8	9280	0
Ukrayna	0	0	2	1900	2251
BAE	4	5600	0	0	0
İngiltere	0	0	4	6100	1734
ABD	4	5000	18	8312	18161
Vietnam	0	0	4	4800	0
TOPLAM	60	64500	168	175324	63404

* Toplam 4480 MW kapasiteli 4 reaktörlü Sinop Projesi ve toplam 4800 MW kapasiteli 4 reaktörlü Akkuyu Projesi.



Şekil 8: Dünyada Yapım Aşamasındaki Reaktörlerin Haritası [16]

Yeni nükleer güç santrali inşa projelerine ilaveten ülkeler tarafından yürütülen çok sayıda yükseltme/ iyileştirme faaliyeti de mevcuttur [17]. Örneğin,

- İsveç'te beş reaktörün kapasitesi %13,4 artırılmıştır.
- ABD'de Nükleer Düzenleme Komisyonu, 1977'den bu yana 140'tan fazla model için toplamda 6500 MWe üzerinde yükseltmeyi onaylamıştır.
- İspanya'da dokuz reaktörün %13'e kadar geliştirerek nükleer kapasitesine 810 MWe (%11) ekleme programı yer almaktadır. Artışın büyük kısmı hâlihazırda gerçekleşmiştir.
- Finlandiya, Olkiluoto santralının kapasitesini %29 artırarak 1700 MWe'ye yükseltmiştir. Bu santral, 1978 ve 1980 yıllarında iki 660 MWe'lik İsveç BWR'leri ile hizmete girmiştir. İki VVER-440 (PWR) reaktörlü Loviisa santralının kapasitesi 90 MWe (%10) yükseltilmiştir.
- İsveç, üç santralin de modelini yükseltmiştir. Ringhals santrali 2006'da yaklaşık 305 MWe yükseltilmiştir. Oskarshamn 3 reaktörü, 313 milyon avro maliyetle %21 oranında yükseltilecek 1450 MWe'ye ulaşmıştır. Forsmark 2 reaktörü, 2013 yılına kadar 120 MWe (%12) yükseltilmiştir.

3.3. Nükleer Yakıt

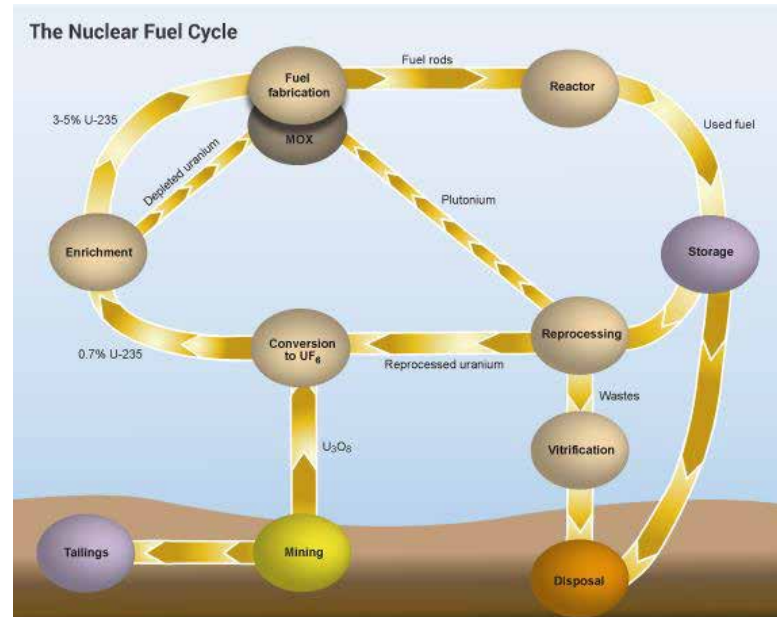
Nükleer güç üretimi için kullanılan ana ham madde uranyumdur. Uranyum yer kabuğunda az bulunan bir element olmamakla beraber kalay, tungsten ve molibden kadar bol bulunur. Doğal uranyum (U_{NAT}) içerisinde %99,3 oranında U-238 ve %0,7 oranında U-235 izotopu bulunmaktadır. Çoğu nükleer reaktör tipi için doğal uranyum direkt kullanılmaya uygun değildir ve özel işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Doğal uranyum içerisinde az miktarda bulunan U-235 izotopu nükleer reaktörlerde fisyon reaksiyonunu gerçekleştirmek için kullanıma hazırken, daha çok bulunan U-238 izotopu özel işlemlerden geçmedikçe direkt olarak nükleer reaktörlerde kullanılamaz. Bu nedenle, doğal uranyumdaki U-235 oranı zenginleştirme işlemleri ile %3-4 kadar artırılır.

Farklı enerji maddelerinin enerji içerikleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu verilerden de görüldüğü gibi, uranyum buhar üretiminde kullanılmak üzere oldukça yoğun enerji sağlar ve bu sayede buhar türbini ve jeneratör sisteminde elektrik üretilir.

Tablo 4: Farklı Maddelerin Enerji İçerikleri [18]

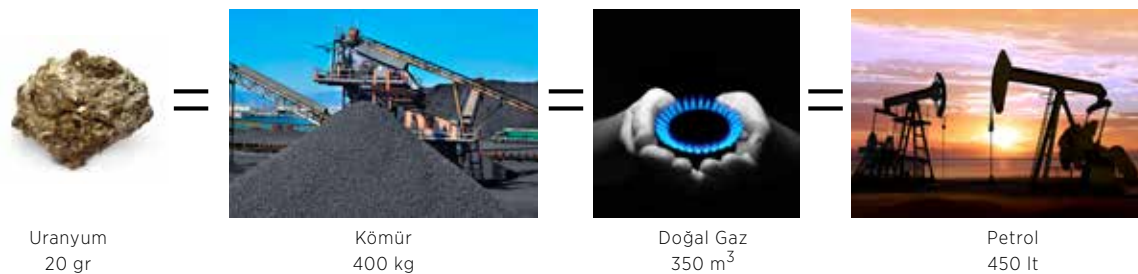
	Isı Değeri	Karbon %	CO ₂
Hidrojen (H₂)	120-142 MJ/kg	0	0
Metan (CH₄)	50-55 MJ/kg		
Metanol (CH₃OH)	22.7 MJ/kg 18 MJ/L	37	
Dimetil Eter (CH₃OCH₃)	29 MJ/kg 19 MJ/L		
Petrol/benzin	44-46 MJ/kg 32 MJ/L		
Dizel yakıt	45 MJ/kg 39 MJ/L		
Ham petrol	42-44 MJ/kg 37-39 MJ/L	89	70-73 g/MJ
Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)	49 MJ/kg	81	59 g/MJ
Doğal gaz (İngiltere, ABD, Avustralya)	38-39 MJ/m ³	76	51 g/MJ
Doğal gaz (Kanada)	37 MJ/m ³		
Doğal gaz (Rusya)	34 MJ/m ³		
LNG olarak doğal gaz (Avustralya)	55 MJ/kg		
Antrasit (IEA tanımı)	>23.9 MJ/kg		
Antrasit (Avustralya ve Kanada)	c 25.5 MJ/kg	67	90 g/MJ
Alt-bitümlü kömür (IEA tanımı)	17.4-23.9 MJ/kg		
Alt-bitümlü kömür (Avustralya ve Kanada)	c 18 MJ/kg		
Linyit/kahverengi kömür (IEA tanımı)	<17.4 MJ/kg		
Linyit/kahverengi kömür (Avustralya, elektrik)	c 10 MJ/kg	25	1.25 kg/kWh
Yakacak odun (kuru)	16 MJ/kg	42	94 g/MJ
Doğal uranyum, LWR'de (normal reaktör)	500 GJ/kg	0	0
Doğal uranyum, LWR'de U & Pu geri dönüşümlü	650 GJ/kg	0	0
Doğal uranyum, FNR'de	28,000 GJ/kg	0	0
%3,5'e kadar zenginleştirilmiş Uranyum, LWR'de	3900 GJ/kg	0	0

Nükleer yakıtın çıkartılıp, işlenip, ömrünü tamamlamasına kadar geçen yaşam döngüsüne "Nükleer Yakıt Çevrimi" adı verilir. Yakıt döngüsünün ön ucu olarak adlandırılan süreç, Şekil 9'da gösterildiği gibi, uranyumun reaktörde kullanılmak amacıyla çıkartılmasını (mining), dönüşümünü (conversion), zenginleştirilmesini (enrichment) ve yakıtın imalatı (fuel fabrication) aşamalarından oluşmaktadır. Santralin elektrik üretmeye başlaması ile beraber yaklaşık 3 yıl sonra ortaya çıkacak olan kullanılmış yakıt reaktörden çıkartılır ve depolama (storage), yeniden işleme (reprocessing) ve kalıcı imha (disposal) gibi yakıt döngüsünün arka ucu diye adlandırılan süreç gerçekleştirilir.



Şekil 9: Nükleer Yakıt Çevrimi [19]

Tipik bir basınçlı su reaktörü korunda yaklaşık 200 yakıt grubu, 55.000'den fazla yakıt çubuğu ve 22.000.000 yakıt peleti bulunmaktadır. Şekil 10'da gösterildiği gibi her bir pelet yaklaşık 20 gramdır ve yaklaşık 350 m³ doğal gaza eşdeğer enerji üretebilmektedir.



Şekil 10: Tek Bir Uranyum Peletinin Enerji Eşdeğeri

3.4. Uranyum Kaynakları ve Üretimi

Uranyum bol miktarda bulunan bir hammaddedir ve Tablo 5'te gösterildiği gibi, pek çok ülkede bilinen önemli miktarda uranyum kaynağı bulunmaktadır.

Tablo 5: Bilinen Uranyum Kaynağı Olan Ülkeler [20]

ÜLKE	Ton U	Payı	ÜLKE	Ton U	Payı
Avustralya	1.664.100	%29	Moğolistan	141.500	%2
Kazakistan	745.300	%13	Özbekistan	130.100	%2
Kanada	509.000	%9	Ukrayna	115.800	%2
Rusya Federasyonu	507.800	%9	Botsvana	73.500	%1
Güney Afrika	322.400	%6	ABD	62.900	%1
Nijer	291.500	%5	Tanzanya	58.100	%1
Brezilya	276.800	%5	Ürdün	47.700	%1
Çin	272.500	%5	Diğer	232.400	%4
Namibya	267.700	%5	Dünya toplamı	5.718.400	

Türkiye, Temrezli Yozgat'ta 4.700 tonluk uranyum kaynağına sahiptir ve madenin 12 yıl boyunca çalıştırılması planlanmaktadır.

Tablo 6, dünyadaki son dokuz yıllık uranyum üretimini göstermektedir. Açıkça görüldüğü üzere Avustralya, Kanada ve Kazakistan gibi önemli uranyum rezervleri olan ülkeler uranyum üretiminde büyük bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, Kazakistan yıllar içerisinde uranyum üretimini önemli oranda artırmış ve son yıllarda dünyadaki bir numaralı uranyum üreticisi haline gelmiştir. Bu senaryonun önümüzdeki yıllarda da bu şekilde devam etmesi beklenmektedir.

Tablo 6: Çeşitli Ülkelerde Yıllık Uranyum Üretimi (ton) [21]

ÜLKE	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Kazakistan	6637	8521	14020	17803	19451	21317	22451	23127	23800
Kanada	9476	9000	10173	9783	9145	8999	9331	9134	13325
Avustralya	8611	8430	7982	5900	5983	6991	6350	5001	5654
Nijer	3153	3032	3243	4198	4351	4667	4518	4057	4116
Rusya	3413	3521	3564	3562	2993	2872	3135	2990	3055
Namibya	2879	4366	4626	4496	3258	4495	4323	3255	2993
Özbekistan (tahmini)	2320	2338	2429	2400	2500	2400	2400	2400	2385
Çin (tahmini)	712	769	750	827	885	1500	1500	1500	1616
ABD	1654	1430	1453	1660	1537	1596	1792	1919	1256
Ukrayna (tahmini)	846	800	840	850	890	960	922	926	1200
Güney Afrika	539	655	563	583	582	465	531	573	393
Hindistan (tahmini)	270	271	290	400	400	385	385	385	385
Çekya	306	263	258	254	229	228	215	193	155
Romanya (tahmini)	77	77	75	77	77	90	77	77	77
Pakistan (tahmini)	45	45	50	45	45	45	45	45	45
Brezilya (tahmini)	299	330	345	148	265	326	192	55	40
Fransa	4	5	8	7	6	3	5	3	2
Almanya	41	0	0	8	51	50	27	33	0
Malavi	0	0	104	670	846	1101	1132	369	0
Dünya Toplamı	41.282	43.764	50.772	53.671	53.493	58.489	59.331	56.041	60.496
Ton U₃O₈	48.683	51.611	59.875	63.295	63.084	68.976	69.969	66.089	71.343
Dünya Talep Yüzdesi	%64	%68	%78	%78	%85	%86	%92	%85	%90

3.5. Türkiye'nin Nükleer Tarihi

1950'lerde nükleer çalışmalara başlayan Türkiye, bilimsel, teknik ve politik çalışmaları yapmak üzere gerekli oluşumu hızla sağlamıştır. Ülkemiz 1955'ten beri nükleer teknoloji yeteneğini kazanmak için büyük çaba göstermektedir ve bu yönde adım atan ilk ülkelerden biridir.

Türkiye, nükleer teknoloji faaliyetlerine başlayan ilk ülkelerden olmasına rağmen bugüne kadar somut adımlar atılmadığına da dikkat çekilmelidir. Birçok ihale açılmış, yetkililer tarafından olumlu açıklamalarda bulunulmuş ancak bu konu 2000'li yıllara kadar ciddi bir proje olarak ortaya çıkamamıştır. 1950'lerin başlarında Güney Kore'de olduğu gibi kararlı, istikrarlı siyasi irade nükleer alanda Türkiye'nin sesini duyurmasını destekleyecektir.

Türkiye'nin nükleer tarihine ilişkin bazı önemli kilometre taşları aşağıdaki gibidir;

Tablo 7: Türkiye Nükleer Enerji Tarihi [22] [23] [24]

YIL	TARİHÇE
1950'ler	Türkiye, Cenevre'de atom enerjisinin barışçıl kullanımına ilişkin anlaşmayı imzalayan ilk ülkelerden oldu. Bu anlaşma sonrasında, Türkiye nükleer teknoloji için bilimsel ve teknik altyapı ile insan gücünü geliştirmeye başladı. Türkiye, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'na üye oldu.
1960'lar	Türkiye'nin ilk araştırma reaktörü TR-1, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde 1 MW nominal güçle çalışmaya başladı.
1970'ler	Yapılan araştırmalara göre, Türkiye'nin ilk nükleer santralini Akkuyu'da kurulması ve 600 MW güce sahip olması gerektiği belirlendi. Akkuyu en güvenli deprem bölgesi seçildi ve nükleer santral lisansını aldı. Teklif incelemelerinin tamamlanmasının ardından 600 MW Kaynar Sulu Reaktör (BWR)'ü için İsveç şirketleri ASEA-ATOM ve STAL-LAVAL'dan oluşan konsorsiyum seçildi. Siyasi faktörler ve İsveç hükümetinin kredi garantisi vermemesi nedeniyle müzakereler iptal edildi. 250 kW TRIGA Mark II reaktörü İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü'nde devreye alındı. Bu reaktör, araştırma ve eğitim faaliyetleri amacıyla kullanıldı.
1980'ler	İkinci araştırma reaktörü TR-2, 5 MW nominal güçle kritik seviyesine ulaştı. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti, Atomic Energy Canada Ltd. (AECL)-Kanada ve Siemens&Kraft Werk Union (KWU)-Almanya şirketlerinin Sinop'ta birer reaktör (1.185 MW); General Electric (GE)-ABD şirketinin Akkuyu'da iki reaktör (665 MW ve 990 MW) kuracağını açıkladı. Sinop'ta sonradan yapılan deprem araştırmaları, ilk yatırım maliyetinin artmasına ve projenin durmasına neden oldu. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti Akkuyu proje tipini anahtar teslimden yap-işlet-devret modeline çevirdikten sonra, Siemens KWU müzakerelerden geri çekildi. 1987'ye kadar AECL ile müzakereler sürdürüldü ancak siyasal faktörler ve kredi garantisi bulunmaması nedenleriyle müzakereler iptal edildi. Çernobil kazası ülke içerisinde nükleer enerjiye karşı muhalefeti artırdı.
1990'lar	Raporlar, Türkiye enerji kaynaklarını çeşitlendirmede 2010 yılında enerji krizinin yaşanacağını gösterdi. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılan çalışmalara göre 2010 yılında 3.100 MWe ve 2030 yılında 15.000 MWe nükleer enerji kapasitesine ihtiyaç duyulacağı belirtildi. Nükleer enerjinin ülke gündeminin en önemli üçüncü maddesi haline gelmesi ile nükleer güç santralleri tekrar konuşulmaya başlandı ve Bakanlık tarafından yeni bir teklif talebi hazırlandı. Akkuyu NGS için yeniden ihaleye çıkıldı ve AECL, NPI (Nuclear Power International/Siemens ve Framatome konsorsiyumu) ve Westinghouse (Mitsubishi ile ortak) tekliflerini sundular. Teklifler sırasıyla 665 MWe kapasiteli iki PWHR, 1.482 MWe kapasiteli bir PWR ve 1.218 MWe kapasiteli bir PWR oldu. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti kararını birkaç kez erteledi ve ekonomik koşullardan dolayı planlardan vazgeçildi.

YIL	TARİHÇE
2000'ler	Bakanlık, nükleer güç santralleri kurma ve işletme kriterlerini belirlemek üzere Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nu (TAEK) görevlendirdi. Bakanlık ve TAEK toplamda 5.000 MW gücünde üç nükleer reaktörün duyurusunu yaptı. Bir reaktörün 2012 yılında açılacağı belirtildi. Karadeniz kıyısında bulunan Sinop, ticari nükleer güç santrali sahası olarak seçildi. Bu saha, buradaki soğutma suyu sıcaklığının Akkuyu'nun yaklaşık 5°C altında olması avantajından dolayı termal ünitelerden güç çıkışı verimliliğinde %1 daha fazlasına izin vermesi sebebiyle seçildi. 2008 yılında, Atomstroyexport-Inter Rao-Park VVER teknik grubunun Rus VVER tip reaktörünün TAEK tarafından istenen 9 kriteri karşıladığı duyuruldu ancak kWh başına 21,16 sentlik fiyat pahalı bulundu ve süreç durduruldu. Mayıs 2010'da Rosatom'un Akkuyu nükleer güç santralinde dört adet 1.200 MWe VVER120 biriminde yap-işlet-devret modelini uygulaması için Türk ve Rus devlet başkanları hükümetler arası bir anlaşma imzaladılar. Anlaşmaya göre üretilen elektrik Rus proje sahibinin olacak ve 15 yıllık satın alma garantisi verecektir. Mayıs 2013'te, Sinop nükleer güç santralindeki dört adet 1.120 MWe reaktör için Türk ve Japon devlet başkanları hükümetler arası bir anlaşma imzaladılar. Kasım 2014'te, Çin Devlet Nükleer Güç Teknoloji Kurumu (SNPTC) ve Westinghouse arasında üçüncü güç santrali projesi için protokol imzalandı. Bu protokol, iki AP1000 ve CAP1400 reaktörü için geliştirme, yapım, işletme, nükleer yakıt, bakım, mühendislik, tesis hizmetleri ve hizmet dışına çıkarmayı içermektedir.

Çernobil ve Fukushima'da yaşanan trajik olaylar nedeniyle Türk halkının en büyük endişelerinden biri, kendilerinin veya yakınlarının yaşadıkları yerlere yakın nükleer güç santrali kurulmasıdır. Ancak şunu belirtmek gerekir ki, Türkiye'de yaşayan halkın büyük çoğunluğu sınırın çok yakınında bazı nükleer güç santralleri olduğunun farkında değildir. Şekil 11 Ukrayna, Bulgaristan, Romanya ve Ermenistan'da bulunan bazı reaktörler ile Türkiye'nin iki büyük şehri olan Ankara ve İstanbul'a olan mesafelerini göstermektedir. Trajik olayların yaşanması haklı olarak nükleer karşıtı bir bakış yaratsa da insanlar farkında olmadan çevrelerinde nükleer enerjiyle birlikte yaşamaktadırlar.



Şekil 11: Türkiye Komşularının Reaktör Konumları

3.5.1. Türkiye'nin Nükleer Enerji Stratejisi

Türkiye, özellikle son on yılda önemli büyüme oranına sahip bir ülkedir. Bu da, artan enerji talebini beraberinde getirmektedir. Tarihsel verilere bakıldığında enerji, dış ticaret açığının ana kaynağıdır. Dışa ve özellikle doğal gazla bağımlılık %90'ı aşmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti, elektrik üretiminde çeşitliliği artırmak için NGS projelerine hız vermiştir. Aslında, Türkiye'deki enerji çeşitliliğinde nükleer enerjinin entegrasyonu, Türkiye'nin elektrik üretimi için başta Rusya ve İran olmak üzere ithal enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltma stratejisinin kilit noktasıdır.

Yukarıdaki bölümde de açıklandığı üzere, bu stratejiyle iki NGS projesi başlatılmıştır. Bu girişimlere paralel olarak, T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı nükleer stratejiyi desteklemek üzere ilave adımlar planlanmıştır;

- Uranyum ve toryum kaynaklarının araştırılması,
- Nükleer enerjiyle ilgili yasal ve kurumsal altyapının tamamlanması ve gerekli plan ve programların hazırlanması.

Kaynakların çeşitlendirilmesine ve elektrik üretimine katkıda bulunulmasına ilaveten NGS girişimlerinde Türkiye Cumhuriyeti hükümetinin bir diğer motivasyonu da NGS'ler için gereken tedarik zincirini geliştirerek yerel ve ulusal ekonomiye katkıda bulunmaktır. Bu tedarik zincirinin, Türkiye ekonomisinde ek istihdam yaratması ve gayri safi katma değeri artırması beklenmektedir. Aynı zamanda yerel nükleer tedarik zincirinin küresel pazarda da önemli rol oynaması arzu edilmektedir.

Devlet üçüncü nükleer güç santralini yerel katkı oranını en yüksek seviyede kullanarak kurmaya niyetlidir. Bununla birlikte, nihai hedef yurt içinde tasarlanmış bir nükleer reaktörün geliştirilmesi, tasarımı ve inşasıdır.

3.5.2. Planlanan ve Önerilen Nükleer Güç Santralleri

1976 yılında, birçok fizibilite çalışması ve geliştirme planlarından sonra Mersin Akkuyu sahası ve 2006 yılında da Sinop nükleer santrallere ev sahibi olmak üzere seçilmişlerdir. Nükleer enerji geliştirme planı ve Nükleer Güç Santrallerinin Kurulması ve İşletilmesi ile Enerji Satışına İlişkin Kanun'a göre, hükümet, Türkiye'nin enerji çeşitliliğinde nükleerlerin payını artırmak ve enerji ithalatını azaltmak için bu iki alanda nükleer santrallerin yapımını planlamaktadır.

Türkiye Cumhuriyeti hükümeti, Akkuyu sahasında nükleer güç santrali yapımı için Rusya hükümeti ile anlaşma yapmıştır. Anlaşmaya göre, Rosatom, bu güç santralini, dört VVER_1200/AES-2006

reaktör ünitesini yap-sahip ol-işlet modelinde işletecek ve enerji satın alma anlaşması (PPA) uyarınca 15 yıl boyunca üretilen elektriğin büyük bölümünü devlet elektrik ticaret şirketi TETAŞ'a satacaktır.

İkinci nükleer güç projesi Sinop'ta gerçekleştirilecektir. Türk ve Japon yetkililer arasında hükümetler arası anlaşma imzalanmıştır. Projenin nihai ayrıntıları Ev Sahibi Hükümet Anlaşması (HGA) ile belirlenmiştir. Konsorsiyum Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Itochu, Engie ve Türk devleti kuruluşu EÜAŞ'tan oluşmakta ve dört adet ATMEA1 reaktörü Sinop sahasında inşa edilecektir.

3.5.2.1. Akkuyu

Mart 2008'de TETAŞ Akkuyu'daki ilk NGS için ihaleye teklif çağrısında bulundu. Tek teklif Atomstroyexport ile birlikte Inter RAO (ikisi de Rusya'dan) ve Park Teknik (Türkiye) tarafından verildi ve bir anlaşma yapıldı. 2009 yılında, TAEK Rosatom ile bir anlaşma imzaladı ve TETAŞ Atomstroyexport'un teklifini iptal etti. Bunun ardından 2010 yılında, Rosatom'un Akkuyu santralinde dört adet 1200 MWe AES-2006 reaktörünü yap-sahip ol-işlet modelinde işletmesi için Türkiye ve Rusya arasında hükümetler arası anlaşma imzalandı. 2011 yılında proje şirketi NPP JSC olduğu tescil edildi. Aralık 2011'de proje şirketi inşaat izinleri ve güç jeneratörü lisansları için başvurularını yaptı. Aralık 2012'de Rusya Devlet Başkanı, Rusya'nın 20 milyar dolardan büyük olan projeyi tamamen finanse edeceğini açıkladı. Türkiye Cumhuriyeti Başbakanı, JSC Akkuyu NPP'nin öz sermayesinin 2,4 milyar dolara yükseltildiğini ve proje kapsamındaki toplam yatırımın 22 milyar dolar olacağı ve yakıtın Rosatom tarafından tedarik edileceği belirtildi.

2012 yılı ortalarında Rosatom maliyetin 25 milyar doları bulabileceğini açıkladı. Yine 2012 yılı ortalarında şirket saha lisansı aldı ve Şubat 2013'te saha çalışmaları için ilk büyük sözleşmeye izin verdi. Revize edilmiş çevresel etki değerlendirmesi (ÇED)

Temmuz 2014'te dördüncü defa yeniden gönderildi ve Kasım ayı sonunda onaylandı.

Ekim 2014'te Enerji Bakanı inşaat lisansı verildiği takdirde bazı inşaatların Nisan 2015'te başlayabileceğini açıkladı. Her ne kadar şirket ilk ünitenin 2021 yılında faaliyete geçebileceğini belirtse de Mart 2014'te Enerji Bakanı ünitenin 2019'da faaliyete geçmesini beklediğini söyledi. 2013 itibarıyla Rosatom tarafından proje için 1,3 milyar dolarlık masraf bütçelendi.

Akkuyu NGS'de kurulması öngörülen VVER reaktörü, hem soğutucu hem yavaşlatıcı olarak hafif su kullanan, dünya çapında en yaygın olarak kullanılan tipteki bir Basınçlı Su Reaktörüdür (PWR). Akkuyu'da inşa edilmesi planlanan VVER_1200 reaktörlerinin ana performans özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Birim Başına Kurulu Kapasite: 1198 MWe
- Reaktörün Isıl Gücü: 3212 MWt
- Hizmet Süresi: 60 yıl
- Emre Amadelik: >%90
- Santral Verimliliği - Brüt: %37
- Santral Verimliliği - Net: %34,5

3.5.2.2. Sinop

2008 Şubat ayından beri, Karadeniz kıyısında bulunan Sinop'ta 1,7 milyar avruluk bir teknoloji merkeziyle birlikte, ikinci nükleer santral kurulumu için hazırlık çalışmaları sürdürülmektedir. Sinop NGS'nin yaklaşık 22-25 milyar dolara mal olması beklenmektedir. Mayıs 2013'te, Mitsubishi Heavy Industries (MHI) ve Areva'nın, Itochu ile birlikte oluşturduğu konsorsiyumun her biri 1.120MWe güçte toplam 4.480 MWe kapasiteli dört ATMEA1 reaktörü için verdiği teklif hükümet tarafından kabul edilmiştir. Ardından Japonya'yla hükümetler arası "nükleer güç santrali yapımı için ayrıcalıklı müzakere hakları" anlaşması imzalanmış ve proje yapısı yap-işlet-devret modeli olarak belirlenmiştir. EÜAŞ, proje şirketi Mitsubishi, Itochu ve Engie arasında paylaşılan hisselerin %49'unu almayı talep etmiştir. MHI, fizibilite çalışmalarını yürütmek, sözleşmeleri müzakere etmek, finansmanı hazırlamak ve Türkiye'deki diğer fonksiyonları üstlenmek üzere Sinop Nükleer Enerji Şirketi adında yeni bir şirket kurmuştur.

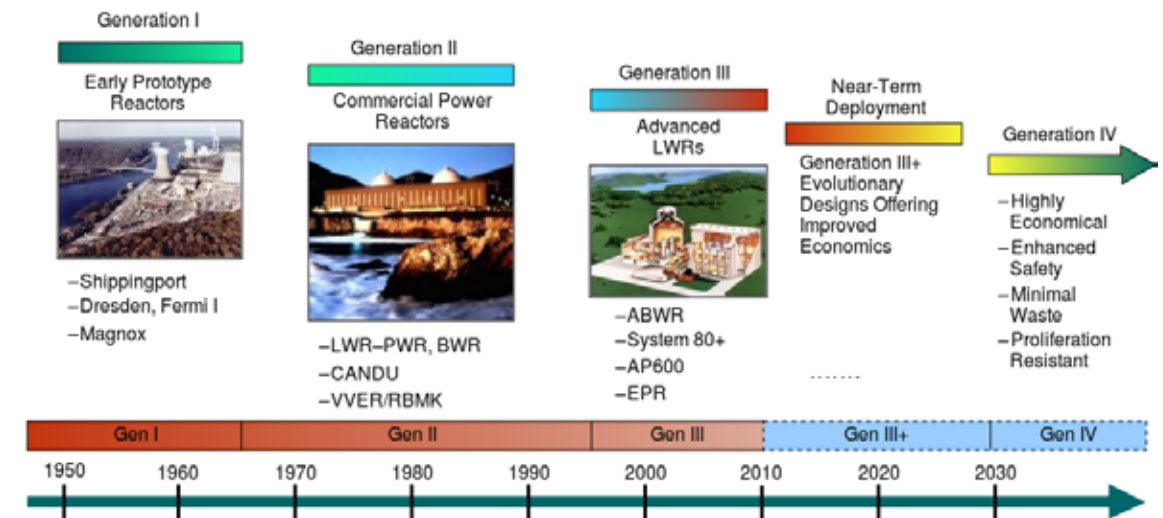
Sinop NGS'deki ATMEA1 reaktörünün 60 yıl ömrü olması beklenmektedir. ATMEA1, iyi bilinen ve kanıtlanmış PWR teknolojisine dayanmaktadır. Yeni tasarım özellikleri sayesinde sistemin emniyet ve güvenilirliği geliştirilmiştir. Reaktör kabı, kullanım ömrü boyunca kırılma önleyecek şekilde ciddi ölçüde korunmuştur. Santralin %92 gibi yüksek bir emre amadelige sahip olması ve ısı verimliliğinin buhar jeneratörünün özel tasarımı ile birlikte %37 oranında olması beklenmektedir.

ATMEA1 bazı özel nitelikler sağlamaktadır. Konvansiyonel PWR'ler 4'lü çevrim sistemi olarak tasarlanmıştır. ATMEA1 ise üçlü çevrim sistemi olarak tasarlanmıştır. Her bir ünite, reaktör basınçlı kabına bağlı üç buhar jeneratörü ile donatılmış ve bunlar da üretilen buharı buhar türbinine aktarmaktadır. Sistem güvenilir aktif emniyet sistemleri tarafından desteklenmektedir. Kor tutucu ve hidrojen birleştiriciler ilave özellikleri arasındadır.

4. Nükleer Teknolojinin Tarihsel Gelişimi

1950'lerde nükleer santrallerin geliştirilmeye başlamasından bu yana nükleer reaktörler sürekli olarak gelişim içerisinde. Nükleer reaktör tasarımları, önceki nesille karşılaştırıldığında her biri önemli bir teknolojik gelişimi (maliyet ya da güvenlik) temsil eden "nesil (generation)" tabiriyle sınıflandırılırlar. Bu reaktörler, 1950-60'larda geliştirilen I. Nesil reaktörlerden 1990'larda geliştirilen III. Nesil tasarımlarına

kadar uzanır. I. Nesil reaktörler adı verilen ilk reaktörler İngiltere dışında kullanılmamaktadır. Dünya çapında kullanımdaki reaktörlerin büyük çoğunluğu, II. Nesil'dir. III. ve III+. Nesil tasarımlar çeşitli ülkelerde faaliyette olan ya da halen geliştirilmekte olan reaktörlerdir. IV. Nesil adı verilen reaktör tasarımları halen geliştirme aşamasındadır ve 2030'dan önce faaliyete geçmeyecektir.



Şekil 12: Nükleer Reaktörlerin Tarihsel Gelişimi [25]

Dünya nükleer elektriğinin yaklaşık %85'i, başlangıçta denizaltılar ve büyük donanma gemilerini yüzdürebilmek için geliştirilen tasarımlardan türetilen reaktörler tarafından üretilmektedir. En yaygın reaktör tasarımları Basıncılı Su Reaktörü (PWR) ve Kaynar Sulu Reaktör (BWR)'dür. Her iki tip de nötronları yavaşlatmak için soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hafif su kullanır.

Nükleer reaktörler soğutucunun ve yavaşlatıcının niteliğine ve ilaveten gerek duyulursa diğer tasarım özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Dünya çapında faaliyette olan 449 reaktör arasında %96'sı su soğutmalı, %3'ü gaz soğutmalı ve %0,6'sı ise hızlı reaktörlerdir. Ticari faaliyetteki nükleer reaktörlerin farklı tipleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

NÜKLEER TEKNOLOJİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Tablo 8: Ticari Faaliyetteki Nükleer Reaktörler [26]

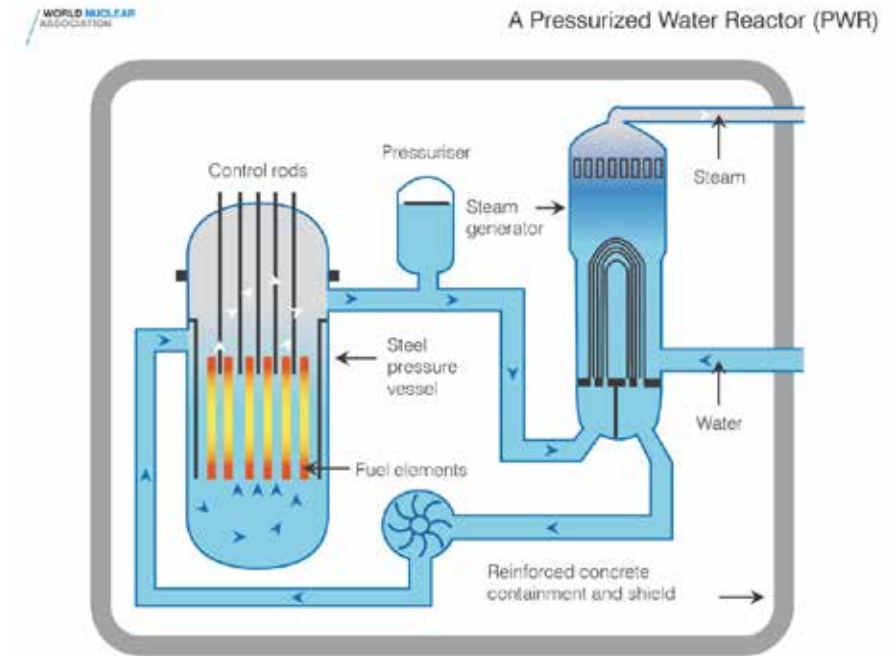
Reaktör Tipi	Ana Ülkeler	Sayı	GWe	Yakıt	Soğutucu	Yavaşlatıcı
Basınçlı Su Reaktörü (PWR)	ABD, Fransa, Japonya, Rusya, Çin	290	273	Zenginleştirilmiş UO ₂	Su	Su
Kaynar Sulu Reaktör (BWR)	ABD, Japonya, İsveç	78	75	Zenginleştirilmiş UO ₂	Su	Su
Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR)	Kanada, Hindistan	49	25	Doğal UO ₂	Ağır Su	Ağır Su
Gaz Soğutmalı Reaktör (AGR&Magnox)	İngiltere	14	8	Doğal UO ₂ (metal), Zenginleştirilmiş UO ₂	Co ₂	Grafit
Hafif Sulu Grafit Reaktör (RBMK & EGP)	Rusya	15	10	Zenginleştirilmiş UO ₂	Su	Grafit
Hızlı Nötron Reaktörü	Rusya, Çin	3	1,4	PuO ₂ ve UO ₂	Sıvı Sodyum	Yok
	TOPLAM	449	392			

GWe = bin megavat olarak kapasite (brüt)

4.1. Basınçlı Su Reaktörü (PWR)

PWR'ler, 290 civarında kullanımla Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkelerinde en yaygın olarak kullanılan nükleer reaktördür. PWR'ler (tipik olarak hafif su reaktörleri (LWRler) olarak adlandırılırlar), soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hafif su kullanırlar. Bu tip reaktörde birincil soğutma döngüsünde su yaklaşık 325°C'de basınç -suyun kaynamasını engellemek için- altında tutulur ve türbini çalıştırmak için de ikincil döngüde buhar üretir. Rusya'da bunlar

VVER tipi olarak bilinirler. PWR'ler yakıt olarak zenginleştirilmiş U-235 kullanır. Büyük bir PWR'de yaklaşık 80-100 ton uranyum ile 150-200 yakıt demeti bulunur. Her yakıt demeti reaktör korunda dikine yerleştirilmiş yaklaşık 200-300 yakıt çubuğuna sahiptir [27]. Türkiye'de kurulacak olan Nükleer Güç Santrallerinden Akkuyu'da VVER-1200 reaktörleri, Sinop'ta ATMEA1 reaktörleri olmak üzere 4 adet LWR tipi reaktör bulunması planlanmaktadır.



Şekil 13: Basınçlı Su Reaktörü (PWR) [28]



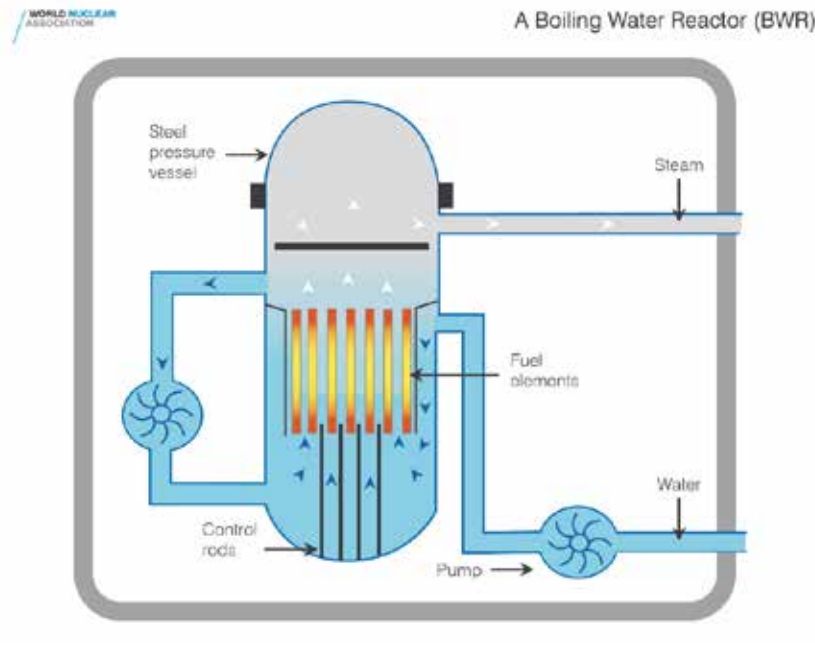
Şekil 14: Fransa'daki Saint Laurent Nükleer Güç Santrali (PWR) [29]

4.2. Kaynar Sulu Reaktör (BWR)

BWR'ler birçok yönden PWR'lere benzerler, tek fark birincil döngüdeki su daha düşük basınç altındadır ve böylece 285°C'de kaynar. Bu sıcaklıkta kaynamaya başlayan suyun sonucunda oluşan buhar türbine gönderilerek elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. PWR'ler gibi, BWR'ler de yakıt olarak zenginleştirilmiş

uranyum kullanırlar. BWR'ler dünyadaki diğer tasarımlar arasında ikinci en yaygın kullanılan reaktör tipleridir.

Bir BWR'de yaklaşık 140 ton uranyum ile 750 yakıt demeti bulunur. Her yakıt demeti yaklaşık 90-100 yakıt çubuğundan oluşur [27].



Şekil 15: Kaynar Sulu Reaktör (BWR) [28]



Şekil 16: İspanya'daki Cofrentes Nükleer Güç Santrali (BWR) [30]

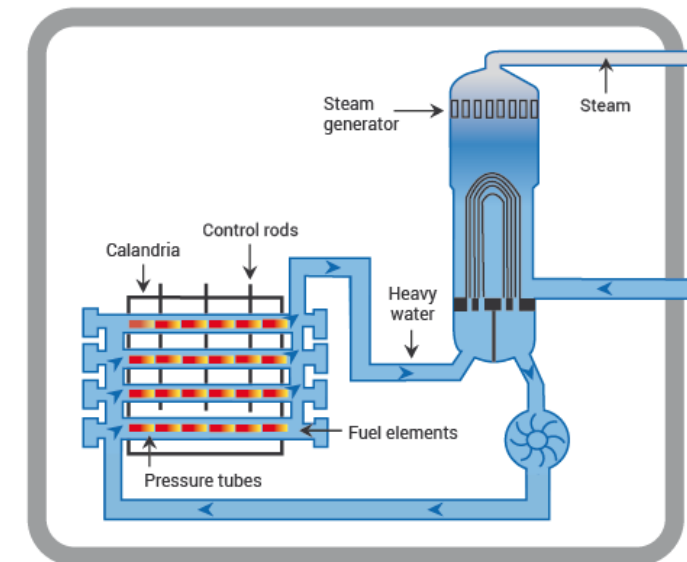
4.3. Basıncılı Ağır Su Reaktörü (PHWR)

PHWR'ler soğutucu ve yavaşlatıcı olarak, yakıt olarak doğal uranyum oksidin (%0,7 U-235) zenginleştirilmeden kullanılmasını sağlayan ağır su (döteryum oksit D2O) kullanır. PHWR, 1950'li yılların başından itibaren CANDU adıyla Kanada'da ve 1980'lerden itibaren de Hindistan'da geliştirilen bir reaktör tipidir. PWR'lerde olduğu gibi, bu reaktör tipinde de yüksek sıcaklıklarda kaynamasını önlemek için basınç altında tutulan ağır su bulunur. Birincil soğutucu ikincil döngüdeki türbinleri çalıştırmak için buhar üretir [27].

Ağır su, hafif sudan önemli miktarda daha pahalı olmasına rağmen, PHWR'ler pahalı yakıt

zenginleştirme işlemlerine ihtiyaç duymadan çalıştırılabilirler. Diğer yandan, yakıtın daha sık değiştirilmesini gerektiren doğal uranyum zenginleştirilmiş uranyuma kıyasla daha az enerji açığa çıkardığından çok daha fazla miktarda kullanılmış yakıt üretir [31]. PHWR'lerin bir diğer avantajı da, yakıt değiştirmek için santralin kapatılmasının gerekmemesidir.

PHWR'lerin yeni türü olan Gelişmiş CANDU Reaktör (ACR) tasarımlarında yavaşlatıcı olarak ağır su, soğutucu olarak hafif su ve düşük oranda (%2,1-2,4) zenginleştirilmiş uranyum kullanılır [27].



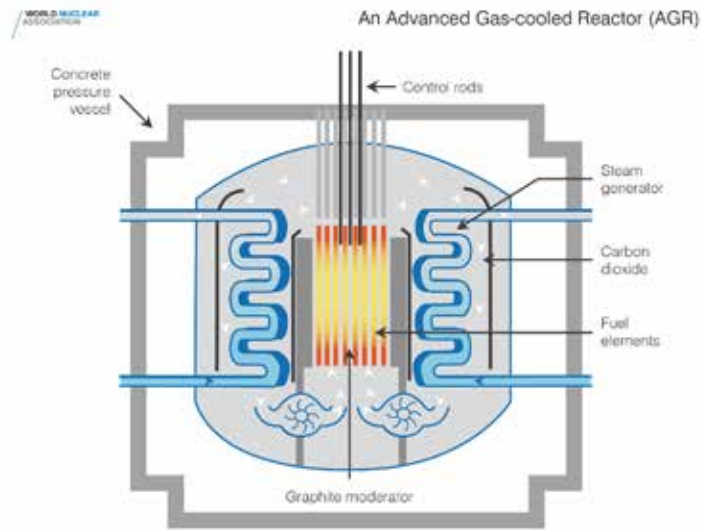
Şekil 17: Basıncılı Ağır Su Reaktörü (PHWR) [28]

4.4. Gelişmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (AGR)

AGR'ler, İngiltere'de kullanılan yavaşlatıcı olarak grafit ve soğutucu olarak karbondioksit kullanan II. Nesil gaz soğutmalı reaktörlerdir. AGR, metal biçimdeki doğal uranyumu kullanan MAGNOX reaktöründen geliştirilmiştir. AGR'de yakıt olarak paslanmaz çelik borular içerisinde %2,5-3,5 seviyesinde zenginleştirilmiş uranyum oksit peletleri bulunur [27].

AGR, yaklaşık %41 oranındaki santral verimi için tasarlanmıştır. Bu oran PWR'ler için %34'tür. CANDU'da olduğu gibi, AGR'ler de yakıt değiştirmek için santralin kapatılmasını gerektirmeyecek şekilde tasarlanmıştır [32].

Birçok ülke tarafından soğutucu olarak Helyum gazını kullanan gelişmiş Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör (HTGR) tasarımlarının geliştirilmesine devam edilmektedir. Geliştirilmekte olan bu tasarımlar, yüksek verimlilikle elektrik ve yüksek sıcaklık proses ısı uygulamalarına yönelik ısı enerjisi üretebilen tasarımlardır. Çin, Endonezya, Japonya, Kazakistan, Kore Cumhuriyeti, Rusya, Güney Afrika ve Amerika Birleşik Devletleri şu anda çeşitli HTGR araştırma reaktörleri üzerinde çalışmaktadır [33].



Şekil 18: Gelişmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (AGR) [28]



Şekil 19: İskoçya'da Torness Güç Santrali (AGR) [34]

4.5. Hafif Su Soğutmalı Grafit Yavaşlatıcılı Reaktör (RBMK)

Sovyetler Birliği tarafından tasarlanan RBMK reaktörü, BWR tasarımında olduğu gibi, yavaşlatıcı olarak grafit ve soğutucu olarak da 290°C'de kaynamaya izin verilen basınçlı su kullanır. Bu reaktörler, Sovyetler Birliği'nin nükleer silah programına plütonyum üretmek için kurduğu reaktörlerin ticarileşmesi ve evrimleşmesi ile ortaya çıkmıştır. 1986 yılındaki Çernobil kazasına neden olan RBMK reaktörlerinde, yakıt

olarak düşük oranda zenginleştirilmiş (%2-2,4) uranyum dioksit kullanılır. Çernobil kazasından sonra, tasarımdaki hataların giderilmesi amacıyla reaktörde önemli değişiklikler yapılmıştır. Dünyada halen faaliyette olan, tamamı Rusya'da 11 adet RBMK reaktörü bulunmakta olup, bu santrallerde Çernobil kazası sonrası işletme güvenliğini iyileştirmek üzere değişiklikler uygulamaya konulmuştur [35].



Şekil 20: Rusya'da Leningrad Nükleer Güç Santrali (RBMK) [36]

4.6. Hızlı Nötron Reaktörleri (FNR)

FNR'ler, zincirleme fisyon tepkimesini sürdürmek için yavaşlatıcı olmaksızın hızlı nötronları kullanırlar. Hızlı reaktörler, çoğunlukla yakıt olarak plütonyum kullanır, çünkü plütonyum fisyonun devam etmesini sağlamak için hızlı nötronları daha verimli kullanır. Bu reaktörlerde, nötron yavaşlamasını önlemek ve yüksek ısı kapasite sağlamak için sıvı bir metal soğutucu (çoğunlukla sodyum) kullanılır.

Eğer hızlı nötron reaktörleri, tükettiklerinden daha

fazla yakıt üretmek için yapılandırıldıysa Hızlı Üretken Reaktörler (FBR) adını alırlar.

FNR, doğal uranyumdan normal reaktörlere kıyasla 60 kat daha fazla enerji elde etmek için tasarlanmıştır. Diğer yandan, yakıt zenginleştirme işlemi pahalı bir işlem olduğundan, bu reaktörlerin yapım ve işletme maliyetleri yüksektir. IV. Nesil reaktörler çoğunlukla hızlı reaktörlerdir ve bu reaktör tasarımları için çok taraflı uluslararası işbirliği yapıları kurulmuştur [27].



Şekil 21: Fransa'da Superphenix Nükleer Güç Santrali (FBR) [37]

4.7. Gelişmiş Nükleer Güç Reaktörleri

Nükleer Reaktör teknolojisi uluslararası alanda sürekli gelişmektedir. I. Nesil tasarımlar çalışma ömürlerinin sonuna gelirken gelişmiş nükleer güç reaktörleri halen geliştirilmekte veya faaliyete geçirilmektedir. III. Nesil reaktörlerin ilk üretimleri 1996 yılında Japonya'da Gelişmiş Kaynar Sulu Reaktör olarak geliştirilmiştir. III. Nesil reaktörler, II. Nesil reaktörlere ileri güvenlik özelliklerinin eklenmesi ile evrimleşmiştir. Yeni nesil tasarımlar düşük sermaye maliyetleri ve daha basit tasarım özellikleriyle geliştirilmektedir. Yakıt verimliliği ve güvenlik, bu gelişmiş reaktörlerin sağlayacağı diğer avantajlardandır.

IV. Nesil olarak adlandırılan gelecek nesil tasarımlar, halen araştırma ve geliştirme veya konsept aşamasında olup, bu reaktörlerin 2030 itibarıyla ticari olarak faaliyete geçirilmesi beklenmektedir. Tablo 9'da gösterilen bu reaktörlerden çoğu, halihazırda kullanılan su soğutmalı reaktörlere nazaran çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışacaklardır [27].

IV. Nesil reaktörler için, geleceğin reaktör teknolojisini belirlemek üzere üç büyük uluslararası işbirliği programı başlatılmıştır [38]:

- ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) ve Fransa Nükleer Güvenlik Kurumu (ASN)

tarafından, çok uluslu kodları, standartları ve güvenlik hedeflerini, çok uluslu işbirliğini geliştirmek ve Çok Uluslu Tasarım Değerlendirme Programı (MDEP) ürünlerini gerçekleştirerek yeni reaktörlerin lisanslamalarını kolaylaştırmak amacıyla 2006'da MDEP kurulmuştur. MDEP, 15 farklı ülkenin nükleer düzenleyici otoritelerini içermekte ve 5 tasarım çalışma grubu ile 3 konu odaklı çalışma grubunun bulunduğu bir programdır.

- 2001 yılında kurulan Nesil IV Uluslararası Forum (GIF) kapsamında 2030 yılı itibarıyla ticari kullanıma sunulacak yedi reaktör teknolojisi geliştirilmeye başlanmıştır. Aşağıdaki tabloda listelenen bu reaktörlerin, nükleer enerjinin geleceğini şekillendireceği düşünülmektedir. Bu reaktörler temelde, güvenlik, maliyet, etkinlik ve temizlik hususları doğrultusunda artan enerji taleplerini karşılamaya yönelik seçilmişlerdir.
- 2001 yılında IAEA tarafından kurulan Uluslararası Yenilikçi Nükleer Reaktörler ve Yakıt Döngüleri Projesi (INPRO), nükleer teknolojinin güvenli, sürdürülebilir, ekonomik ve yayılmaya dirençli olma hedeflerini desteklemeyi amaçlamaktadır.

Tablo 9: GIF Tarafından Geliştirilmekte Olan IV. Nesil Reaktör Tasarımları [39]

REAKTÖR TİPİ	Nötron Spektrumu (Hızlı/Termal)	Soğutucu	Sıcaklık (°C)	Basınç*	Yakıt	Yakıt Döngüsü	Boyut (S) (MWe)	Kullanım Alanları
Gaz soğutmalı hızlı reaktörler	hızlı	helyum	850	yüksek	U-238 +	kapalı, sahada	1200	elektrik & hidrojen
Kurşun soğutmalı hızlı reaktörler	hızlı	kurşun veya Pb-Bi	480-570	düşük	U-238 +	kapalı, bölgesel	20-180** 300-1200 600-1000	elektrik & hidrojen
Erimiş Tuz Hızlı Reaktörleri	hızlı	florür tuzları	700-800	düşük	tuzdaki UF	kapalı	1000	elektrik & hidrojen
Erimiş tuz reaktörü - Gelişmiş yüksek sıcaklık reaktörleri	termal	florür tuzları	750-1000		prizmadaki UO ₂ parçacıkları	açık	1000-1500	hidrojen
Sodyum soğutmalı hızlı reaktörler	hızlı	sodyum	500-550	düşük	U-238 & MOX	kapalı	50-150 600-1500	elektrik
Süper kritik su soğutmalı reaktörler	termal veya hızlı	su	510-625	çok yüksek	UO ₂	açık (termal) kapalı (hızlı)	300-700 1000-1500	elektrik
Çok yüksek sıcaklık reaktörleri	termal	helyum	900-1000	yüksek	UO ₂ prizma veya küresel yakıt	açık	250-300	hidrojen & elektrik

*yüksek = 7-15 MPa

+ = bazı U-235 veya Pu-239 ile

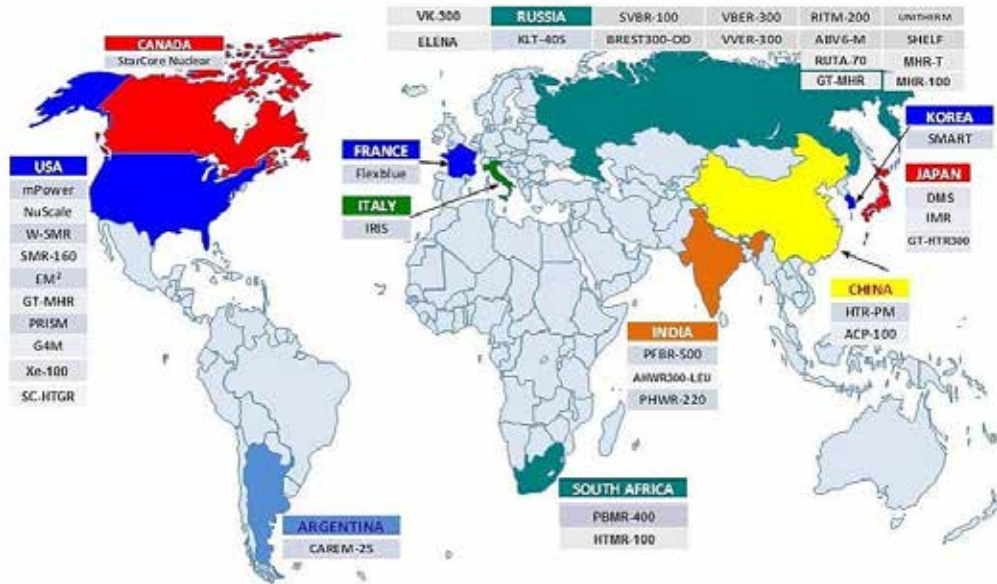
** uzun süreli kartuş kor ömrü (15-20 yıl) ile 'pil' modeli veya değiştirilebilir reaktör modülü

4.8. Küçük Modüler Reaktörler (SMR)

SMR'ler, fabrikalarda üretilebilecek ve nükleer santral sahasına kamyon veya trenle taşınabilecek şekilde modüler teknoloji ile tasarlanmış, 300MW(e)'ye kadar elektrik üretebilen nükleer reaktörler olarak tanımlanırlar. Küçük ve daha basit yapıdaki reaktörlerin geliştirilmesindeki temel amaç; yüksek santral maliyetlerini azaltmak ve daha geniş yelpazedeki kullanıcılar için esnek güç üretimi ihtiyacını karşılayabilmektir. Daha küçük birimlerin geliştirilmesi, şu anki 5 ila 8 yıl süren inşaat sürelerini asgariye indirirken ilk kurulum maliyetlerini de azaltmaktadır. SMR tasarımları arasında, hızlı nötron reaktörleri ile sıvı metal soğutmalı reaktörler olduğu kadar, su soğutmalı reaktörler, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler de bulunur [40]. Arjantin'de CAREM-25 (prototip) ve Rusya'da KLT-40S isimli iki SMR halihazırda geliştirme aşamasında olan reaktörlerdir [41].

Gelecekteki güç üretimi ve enerji güvenliği için bir seçenek olan SMR'lere ilgi büyüyerek devam etmektedir. Halihazırda farklı uygulama alanları için 45'ten fazla SMR tasarımı geliştirme aşamasındadır. Bununla birlikte, ticari olarak elverişli olabilmesi için SMR'lerin ilk kurulum aşamasından itibaren, güvenlik ve ekonomi kriterleri açısından avantajlı olduğunu kanıtlanması beklenmektedir. Santrallerin ilk kurulum maliyetleri yüksek olduğu için bu durum teknoloji geliştiriciler için bir sorundur. Dolayısıyla, SMR kurulumlarının ilk aşamasına destek vermek üzere kamu-özel ortaklık anlaşmalarına ihtiyaç duyulabilir. SMR tasarımlarının öngörülen hayata geçme zamanı 2025-2030 yıllarına uzanmaktadır [42].

Şekil 22 SMR geliştirilmesi ile ilgilenen ülkeleri göstermektedir.



Şekil 22: SMR Geliştiren Ülkeler [42]

2009 yılında IAEA'nın INPRO programı, 2030 yılında dünya çapında en fazla 96, en az 43 SMR'nin faaliyette bulunabileceği hakkında bir değerlendirmede bulunmuştur [43].

Tablo 10: Faaliyetteki SMR'ler [43]

İsim	Kapasite	Tip	Geliştirici
CNP-300	300 MWe	PWR	CNNC, Pakistan ve Çin'de faaliyette
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, Hindistan
EGP-6	11 MWe	LWGR	Bilibino, Sibirya'da (yakında kullanımdan çıkarılacak)

Tablo 11: Kurulum Aşamasındaki SMR Tasarımları [43]

İsim	Kapasite	Tip	Geliştirici
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rusya
CAREM-25	27 MWe	entegre PWR	CNEA & INVAP, Arjantin
HTR-PM, HTR-200	2x105 MWe	HTR	INET, CNEC & Huaneng, Çin
ACPR50S	60 MWe	PWR	CGN, Çin

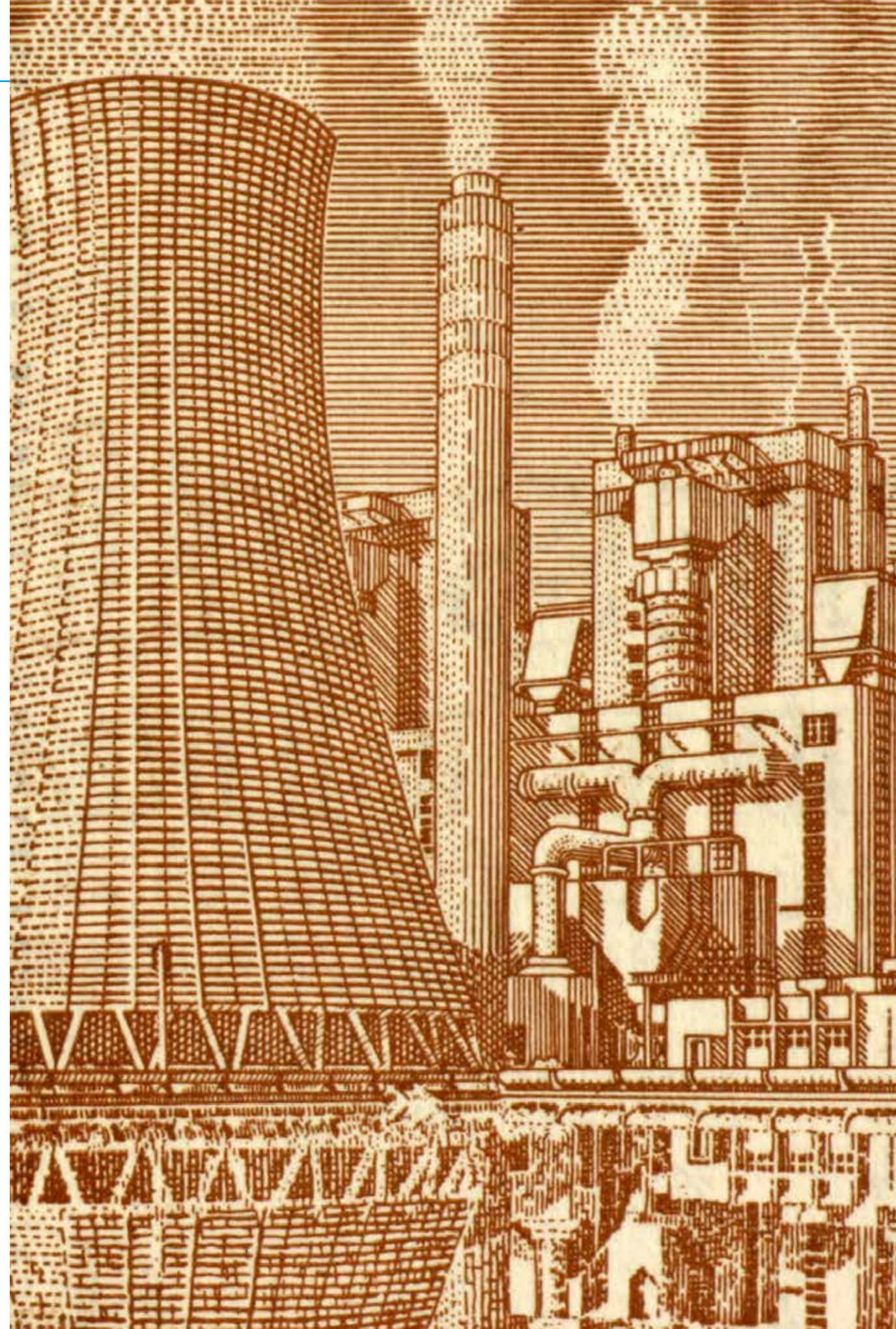
Tablo 12: Kısa Vadede Konuşlandırılacak SMR'ler (25 MW(e)'ye kadar) [43]

İsim	Kapasite	Tip	Geliştirici
VVER-300	300 MWe	PWR	OKBM, Rusya
NuScale	50 MWe	entegre PWR	NuScale Power + Fluor, ABD
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, ABD
ACP100	100 MWe	entegre PWR	NPIC/CNNC, Çin
SMART	100 MWe	entegre PWR	KAERI, Güney Kore
Prism	311 MWe	sodyum FNR	GE Hitachi, ABD
ARC-100	100 MWe	sodyum FNR	ARC, ABD
Integral MSR	192 MWe	MSR	Terrestrial Energy, Kanada
BREST	300 MWe	kurşun FNR	RDIPE, Rusya
SVBR-100	100 MWe	kurşun-Bi FNR	AKME-engineering, Rusya

Tablo 13: Başlangıç Aşamalarındaki SMR Tasarımları (ya da Beklemede Olan) [43]

İsim	Kapasite	Tip	Geliştirici
EM2	240 MWe	HTR, FNR	General Atomics (ABD)
VK-300	300 MWe	BWR	NIKIET, Rusya
AHWR-300 LEU	300 MWe	PHWR	BARC, Hindistan
CAP150	150 MWe	entegre PWR	SNERDI, Çin
ACPR100	140 MWe	entegre PWR	CGN, Çin
IMR	350 MWe	entegre PWR	Mitsubishi Heavy Ind, Japonya
Westinghouse SMR	225 MWe	entegre PWR	Westinghouse, ABD*
mPower	195 MWe	entegre PWR	BWXT, ABD*
PBMR	165 MWe	HTR	PBMR, Güney Afrika*
Xe-100	48 MWe	HTR	X-energy, ABD
U-Battery	4 MWe	HTR	Urenco-led Konsorsiyum, İngiltere
Starcore	20 MWe	HTR	Starcore, Quebec
Gen4 Modülü	25 MWe	kurşun-Bi FNR	Gen4 (Hyperion), ABD
Sealer	3 MWe	kurşun FNR	LeadCold, İsveç
MCFR	bilinmiyor	MSR/FNR	Southern Co, ABD
TMSR-SF	100 MWt	MSR	SINAP, Çin
PB-FHR	100 MWe	MSR	UC Berkeley, ABD
Integral MSR	192 MWe	MSR	Terrestrial Energy, Kanada
Moltex SSR	150 MWe	MSR/FNR	Moltex, İngiltere
Moltex SSR Global	40 MWe	MSR	Moltex, İngiltere
Thorcon MSR	250 MWe	MSR	Martingale, ABD
Leadir-PS100	36 MWe	kurşun soğutmalı	Northern Nuclear, Kanada

* Beklemede olan ileri safhalardaki tasarımlar



NÜKLEER ENERJİYE İLİŞKİN RİSKLER VE FAYDALAR

5. Nükleer Enerjiye İlişkin Riskler ve Faydalar

Diğer bütün enerji faaliyetlerinde olduğu gibi, nükleer enerji kullanımı da beraberinde bazı risk ve faydalar getirmektedir. Enerji çeşitliliğine

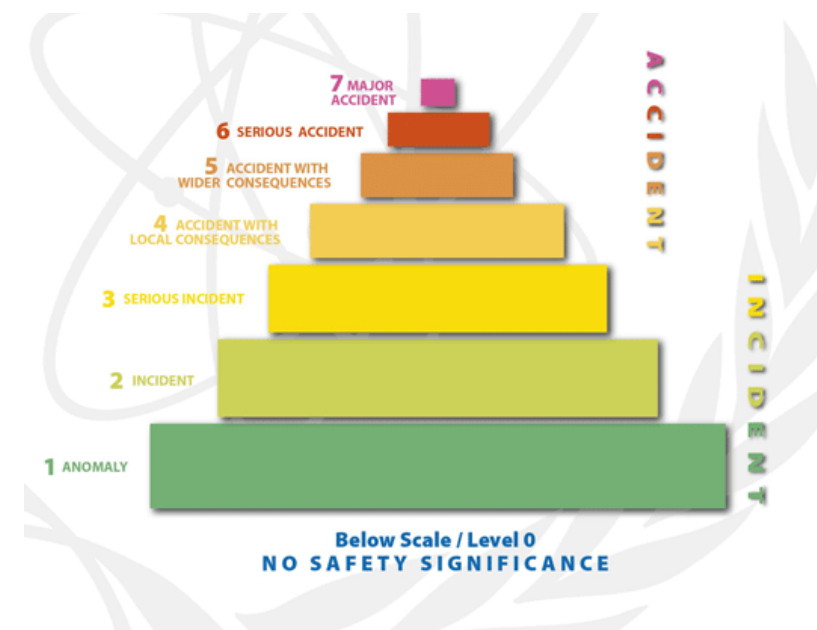
nükleer enerjiyi ekleme kararı sonucunda da bu maddeler gündemde yoğun olarak tartışılmaya başlanmaktadır.

5.1. Riskler ve Endişeler

5.1.1. Kazalar

Her ne kadar nükleer reaktörler güvenli ve çevreye radyasyon yayımını önlemeye yönelik tasarlansalar da, arızalar ve kazalar sonucunda ciddi sonuçlara neden olan durumlar mevcuttur. Diğer birçok endüstrinin aksine, nükleer endüstrisi uluslararası organizasyonlar ve yerel düzenleyici kuruluşlar tarafından ciddi bir şekilde düzenlenmekte, NGS'lerde meydana gelen en küçük olay ya da kaza ilgili makamlarca

kayıt altına alınmakta ve gerekli iyileştirmeler ivedilikle yapılmaktadır. Bu, sektörde kabul gören açık ve şeffaf bir uygulamadır. Nükleer tesislerde gerçekleşebilecek muhtemel, Şekil 23'te gösterildiği gibi sonucunun şiddetine göre Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından 0 ile 7 arasında sınıflandırılmış ve Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (INES) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 23: Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği [44]

Tablo 14: Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği [44]

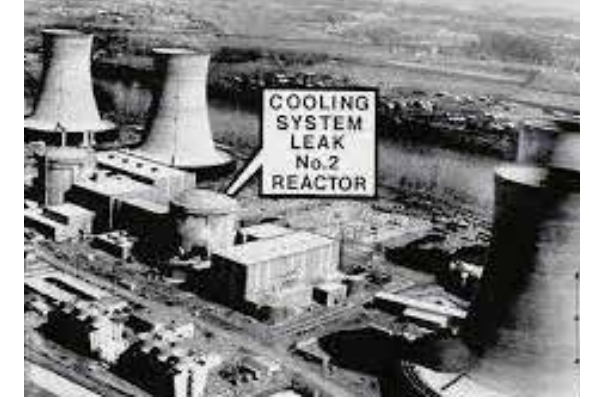
Seviye	Tanım
Seviye 0 - Sapma	Güvenlik sorunu yok
Seviye 1 - Anomali	Düşük aktiviteli radyoaktif malzeme, cihaz ya da taşıma paketinin çalınması veya kaybolması, halktan birinin yıllık izin verilenin üzerinde radyasyon dozu alması.
Seviye 2 - Olay	İnsanlar ve çevre üzerinde etki, güvenlik sistemleri üzerinde radyolojik bariyerler.
Seviye 3 - Ciddi Olay	<ul style="list-style-type: none"> Saha dışında en çok etkilenen kişi üzerinde milisievertin onda biri oranında doza neden olan, izin verilen sınırların üzerinde harici radyoaktivite yayılımı. İşçiler üzerinde akut sağlık etkileri yaratmaya yetecek kadar doza maruz kalma ve/veya kirliliğin ciddi şekilde yayılmasına sebep olan saha olayları; örneğin yayılan birkaç bin bekerellik aktivitenin ikinci bir koranak altına alınarak tatmin edici bir saklama alanına geri götürülmesi. Güvenlik sistemlerinin arızalanmasının kaza koşullarına yol açabileceği olaylar ya da bazı tetikleyicilerin ortaya çıkması durumunda güvenlik sistemlerinin bir kazayı engelleyemeyeceği bir durum.
Seviye 4 - Yerel Sonuçları Olan Kaza	<ul style="list-style-type: none"> Saha dışında en çok etkilenen kişi üzerinde bir kaç milisievertlik doza neden olan radyoaktivitenin harici yayılımı. Böyle bir yayımda, yerel gıda kontrolü dışında genellikle saha dışı koruyucu önlemler almaya gerek yoktur. Nükleer tesiste önemli hasar. Bu tür bir kaza, bir güç reaktöründe kısmi kor erimesi ve reaktör dışındaki tesislerde benzer olaylar gibi büyük dahili kurtarma problemlerine yol açabilecek nükleer santralde hasar oluşması durumunu içerebilir. Bir ya da daha fazla işçide yüksek olasılıkla aşırı dozdan erken ölüme neden olabilecek radyasyon yayılımı.
Seviye 5 - Geniş Sonuçları Olan Kaza	<ul style="list-style-type: none"> Radyoaktif malzemenin harici yayılımı (radyolojik olarak 100'lerce ya da 1000'lerce tera bekerlele eşit miktarda iyodin-131). Nükleer tesiste ciddi hasar. Bu durum, bir güç reaktörü korunun büyük bölümünde ciddi hasar, tesiste büyük miktarlarda radyoaktivite yayılımına sebep olan büyük bir kritik kaza veya büyük yangın ya da patlamayı içermektedir.
Seviye 6 - Ciddi Kaza	Radyoaktif malzemenin harici yayılımı (radyolojik olarak 1000'lerce ya da 10.000'lerce tera bekerlele eşit miktarda iyodin-131) Bu tür bir yayılım, ciddi sağlık etkilerini önlemek için yerel acil durum planlarında yer alan tüm karşı tedbirlerin uygulanmasıyla sonuçlanabilir.
Seviye 7 - Büyük Kaza	Büyük bir tesisteki radyoaktif malzemenin (örneğin, bir güç reaktörünün kuru) büyük kısmının harici yayılımı (radyolojik olarak 10.000'lerce tera bekerelden daha fazla miktarda iyodin-131). Böyle bir yayılım, akut sağlık sorunları olasılığına, muhtemelen birden fazla ülkeyi kapsayan geniş bir alanda ileride ortaya çıkabilecek sağlık etkilerine, uzun vadeli çevresel sonuçlara yol açabilmektedir.

Günümüze kadar gerçekleşmiş küçük veya büyük ölçekli birçok nükleer kaza bulunmaktadır. Bunlar arasında üç önemli kazaya aşağıda değinilmiştir [45]. Bunlar;

1. Three Mile Adası (TMI) Kazası:

Kaza, 28 Mart 1979 tarihinde Harrisburg, Pensilvanya, ABD'de meydana geldi. Bir pompa arızasından dolayı, reaktör koruna soğutma için yeterli su gönderilemedi. Aşırı basınç olduğundan dolayı emniyet vanalarından biri açıldı, ancak bu vana düzgün çalışmadığından dolayı açık kaldı, bu sebeple kordaki su tamamen boşaldı ve kordaki sıcaklık önemli ölçüde yükseldi. Operatörler, izleme araçlarının yanlış yönlendirmesinden dolayı acil soğutma sistemini kapattılar. İlk pompa arızasından yaklaşık iki saat kırk beş dakika sonra, radyasyon alarmları devreye alındı ve acil durum ilan edildi. Bu olay esas olarak operatör hatalarından kaynaklanmakla beraber bazı tasarım faktörlerinin de etkisi bulunmaktadır.

reaktör kuru sebebiyle radyoaktivite çevreye yayıldı ve kaza sonrası görülen hastalıklar kazaya atfedildi. Bu kaza, Seviye 5 olarak sınıflandırıldı.



Şekil 24: Three Mile Adası Nükleer Güç Santrali [46]

Bu kaza, soğutma kaybı kazası olarak sınıflandırıldı. Soğutma devresindeki kopukluk nedeniyle, soğutma suyu gelmedi ve reaktör kuru soğutulamadı. TMI kazası sonucunda eriyen

2. Çernobil Kazası:

Bu kritik kaza, 26 Nisan 1986'da Ukrayna'da, RBMK tipi su soğutuculu ve grafit yavaşlatıcılı Çernobil reaktöründe meydana geldi. Kazanın sonucunda buhar patlaması ve yangın gerçekleşti. Reaktör, koruma binası ile çevrelenmediğinden dolayı çevreye önemli radyoaktivite yayılımı gerçekleşti. Kazadan önce, santraldeki güç kaybını test eden bir deney yapılmaktaydı ve bu kapsamda otomatik güvenlik sistemleri kısmen devre dışı bırakıldı. Güç yükseltilmesi esnasında, sıcaklıklar önemli ölçüde arttı ve kor erimesi başladı. Aşırı sıcaklık artışıyla buhar patlaması meydana geldi, bu da reaktör binasının parçalanmasına neden oldu. Müteakiben grafit yangınıyla ikinci bir patlama oldu ve bu da diğer binalardaki yangını başlattı. Sonuçta, olay yıkıcı bir faciaya dönüştü ve INES'te Seviye 7 "Büyük Kaza" olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 25: Çernobil Nükleer Güç Santrali [47]

3. Fukushima Daiichi Kazası:

11 Mart 2011 tarihindeki Fukushima felaketi, en büyük depremlerden biri olan ve akabinde tsunamiye neden olan Tohoku depremi tarafından tetiklendi. Yıkıcı depremin ardından tsunami oluştu. Depremın başlaması ile civardaki tüm reaktörler sismik sistemler tarafından kapatıldı. Fukushima Daiichi NGS'de altı reaktör birimi bulunmakta ve deprem esnasında sadece üç ünite çalışmaktaydı. Tüm üniteler güvenle kapatıldı ancak acil durum dizel jeneratörleri ile soğutma suyunu sağlayan bazı bileşenler tsunamiden zarar gördü ve sular altında kaldı.

Acil durum yedek akü sistemleri devreye girdi ancak bu sistemler ile yalnızca belirli bir süre için güç sağlanabildi. Bu süre zarfında, nükleer reaktör radyoaktif bozunma sürecinde ısı üretmeye devam etti ve yedek akülerin sağladığı güç tükendikten sonra bozunma ile ortaya çıkan ısı etkili bir biçimde düşürülemedi. Sonuç olarak, 1, 2 ve 3 numaraları reaktörler kısmi koruması ve hidrojen patlamalarıyla hasar gördü. Fukushima Daiichi Kazası, INES ölçeğine göre Seviye 7 "Büyük Kaza" olarak sınıflandırılmıştır.

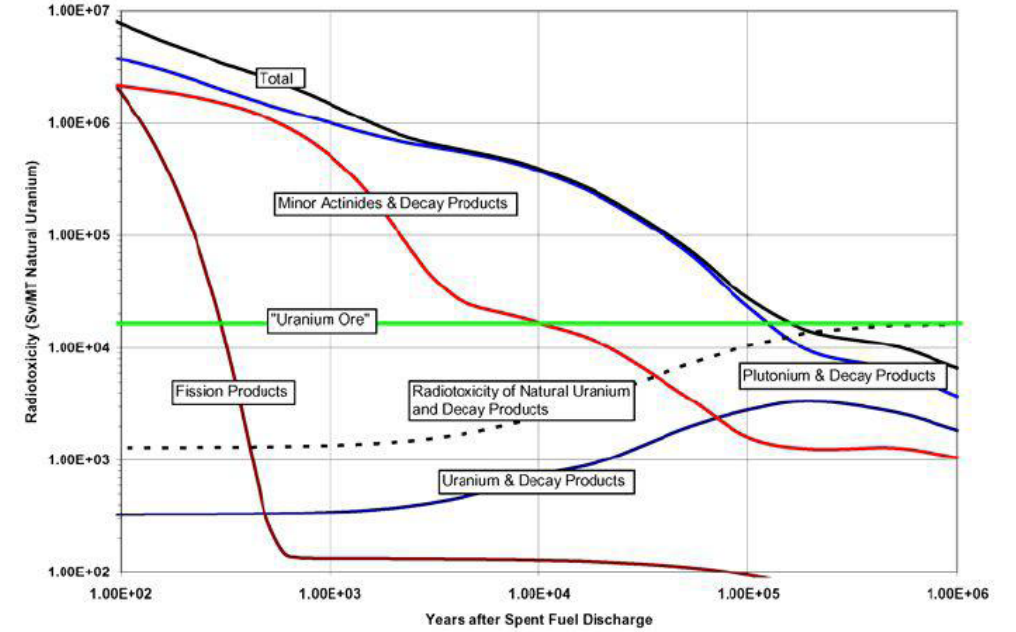


Şekil 26: Kaza Sonrası Fukushima Daiichi Nükleer Güç Santrali [48]

5.1.2. Kullanılmış Yakıtların Depolanması ve Atık Bertarafı

Nükleer atıklar, nükleer enerji ile ilgili en önemli ve en çok endişe edilen konulardan bir tanesidir. Nükleer yakıt, reaktör korundan boşaltılana dek 4 yıldan daha uzun bir süre boyunca korda bekletilir ve radyasyon ışıması yapar. Bu süre

zarfında fisil izotopların büyük kısmı fisyonu uğrar ve yüksek radyoaktiviteye sahip aktinidler ile fisyon ürünlerine dönüşür. Kullanılmış yakıtın radyoaktivitesi uzun süreler boyunca, Şekil 27'de gösterildiği gibi oldukça yüksek seviyelerde kalır.



Şekil 27: Farklı Nükleer Malzeme ve Yan Ürünlerde Zamanla Gözlemlenen Radyotoksinite Değişimi [49]

NGS'lerin faaliyette kaldıkları süre içerisinde üretilen atık çeşitleri düşük, orta ve yüksek seviyeli olarak tanımlanmıştır:

Tablo 15: NGS'lerde Üretilen Atık Çeşitleri

Atık Türü	Menşei	Miktar (1000 MW'lık reaktör için)	İmha Yöntemi
Düşük Seviyeli Atık (DSA)	Reaktör bakım çalışmaları sırasında ortaya çıkar.	50 m ³ /yıl (paketlenmesi dahil)	Varillere kapatma ve toprağa gömme
Orta Seviyeli Atıklar (OSA)	Reaktör çalıştırılırken ortaya çıkar.	50 m ³ /yıl (paketlenmesi dahil)	Varillere kapatma ve toprağa gömme
Yüksek Seviyeli Atıklar (YSA)	Kullanılmış nükleer yakıttan çıkartılan radyoaktif ürünlerdir	3 m ³ /yıl (paketlenmesi dahil)	Camlaştırılıp metal silindirlerde ve yer altı depolarında saklama

Kullanılmış yakıtın radyoaktivitesinin uranyum cevherinin radyoaktivite seviyesine düşürülmesi 100.000 yıldan daha uzun bir zaman alır. Bununla birlikte, ticari faaliyetler nedeniyle ortaya çıkan ilk kullanılmış yakıtın tarihi yalnızca 60 yıl öncesine dayanmaktadır. Kullanılmış yakıtın ne şekilde işleneceği ülkeler tarafından benimsenen stratejiye bağlıdır. Kullanılmış yakıtlar, sonrasında reaktörlerde yakıt olarak tekrar kullanmak üzere, ya değerli aktinidler ve fisil/fertil izotoplar elde etmek üzere yeniden işlenir ya da kalıcı olarak uygun bir şekilde

bertaraf edilmesi gerekmektedir. Kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi pahalı ve zor bir süreç olmakla beraber bu yöntem İngiltere, Fransa, Belçika, Rusya, Hindistan ve Japonya gibi birçok ülkede büyük ölçekte uygulanmaktadır. ABD'de ise Carter yönetiminin kararıyla 1970'lerden beri ticari nükleer kullanılmış yakıtlar yeniden işlenmemektedir.

Kullanılmış nükleer yakıtların depolanması ve taşınması için Şekil 28'deki örnekteki gibi özel donanım ve tesisler gerekmektedir.



Şekil 28- Kullanılmış Yakıt Depolama Havuzu [50]

Diğer bir seçenek ise yakıtın kalıcı olarak bertarafıdır. Bu durumda, kullanılmış yakıtlar reaktörlerin yanındaki depolama havuzlarında, en az 10 yıl süreyle geçici olarak depolanırken son derece sağlam varillerde saklanır ve özel olarak belirlenen coğrafi alanlarda bertaraf edilir. Bu durumda, kullanılmış yakıt yüksek seviyeli

atık (YSA) olarak kabul edilir. Bertaraf edilmeyip yeniden işlenen atıklar da muhtemel bir YSA kaynağıdır. Sıradan bir 1000 MWe hafif su reaktörü, 25-30 ton vitrifiye atık üretir. Bu atığın hacmi kabaca üç metre küptür. Tablo 16'da gösterildiği üzere yakın yüzey veya derin jeolojik bertaraf seçenekleri bulunmaktadır [51].

Tablo 16: Yakın Yüzey ve Derin Jeolojik Bertaraf Örnekleri

Seçenek	Örnekler
Yeryüzü seviyesinde veya yeryüzü seviyesinin altındaki mağaralarda (on metrelik derinliklerde) yakın yüzey atık bertarafı	<ul style="list-style-type: none"> Çekya, Finlandiya, Fransa, Japonya, Hollanda, İspanya, İsveç, İngiltere ve ABD de dahil olmak üzere birçok ülkede DSA için uygulanmaktadır. DSA ve kısa süreli OSA için Finlandiya ve İsveç'te uygulanmaktadır.
Derin jeolojik bertaraf (yer altı depoları için 250 ile 1000 m derinliklerde, kuyular için 2000 ile 5000 m derinliklerde)	<ul style="list-style-type: none"> Pek çok ülke yüksek seviyeli ve uzun ömürlü radyoaktif atıklar için derin jeolojik bertaraf sahalarını seçmektedir ve bu strateji pek çok ülkede resmi politika olarak benimsenmektedir. Savunma sektörüne yönelik OSA için ABD'de uygulanmaktadır. YSA için Fransa, İsveç, Finlandiya ve ABD'de bu tür sahalar tercih edilmektedir. İngiltere ve Kanada'da atıkların bertarafı için jeolojik depolama sahaları seçilmeye başlanmıştır.

Tablo 17, ülkelerin YSA yönetimine ilişkin ulusal politikalarını göstermektedir.

Tablo 17: Ülkelerin Ulusal YSA Yönetim Politikaları [52]

Ülke	İzlenen Politika	Nihai Depolara Yönelik Tesisler ve İlerleme
Belçika	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> Dessel'de merkezi atık depolama yer almaktadır. 1984 yılında Mol'de yer altı laboratuvarı kurulmuştur. Depo inşaatı yaklaşık 2035 yılında başlayacaktır
Kanada	Doğrudan bertaraf	<ul style="list-style-type: none"> 2002 yılında Nükleer Atık Yönetimi Kuruluşu kurulmuştur. Atıkların geri alınabileceği derin jeolojik depolama politikası kabul edilmiştir. 2009'da depolama sahasına yönelik çalışmalar başlamış, deponun 2025 yılında kullanımda olması beklenmektedir.
Çin	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> Lan Zhou'da kullanılmış yakıtlar için merkezi bir depo bulunmaktadır. Depolama sahası 2020'ye kadar belirlenecektir. 2020 itibarıyla yer altı araştırma laboratuvarının çalışmaya, 2050 itibarıyla da bertarafın başlaması planlanmaktadır.

Ülke	İzlenen Politika	Nihai Depolara Yönelik Tesisler ve İlerleme
Finlandiya	Doğrudan bertaraf	<ul style="list-style-type: none"> Program 1983'te başlatılmış, iki adet kullanılmış yakıt deposu mevcuttur. Posiva Oy organizasyonu, derin jeolojik depolama sürecini yönetmek amacıyla 1995'te kurulmuştur. Onkalo yer altı araştırma laboratuvarı inşaat halindedir. Olkiluoto yakınlarındaki depolama tesisinin 2023'te açılması planlanmaktadır.
Fransa	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> Kil ve granit yataklarında yer altı kaya laboratuvarları bulunmaktadır. 2006 tarihli parlamento kararı gereğince derin jeolojik depolama tesislerindeki atık muhafazalarının geri alınabilir olması gerekmektedir. Bure kil depolama sahasının 2015 yılında lisans almasıyla beraber 2025 yılında faaliyete geçmesi beklenmektedir.
Almanya	Yeniden işleme ancak doğrudan bertarafa geçiliyor	<ul style="list-style-type: none"> Ahaus ve Gorleben tuz kubbelerinde kullanılmış yakıt depolanmaktadır. 2025'ten sonra Gorleben'de jeolojik depolamaya geçilebilecektir.
Hindistan	Yeniden işleme	YSA için derin jeolojik depolama araştırmaları devam etmektedir.
Japonya	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> Mizunami granit yataklarındaki yer altı laboratuvarı 1996'dan bu yana faaliyettedir. Rokkasho'daki kullanılmış yakıt ve YSA depolama tesisi 1995'ten beri faaliyettedir. Mutsu'da kullanılmış yakıt deposu inşaatı sürmekte, işletme tarihi 2018 olacağı değerlendirilmektedir. 2000'de kurulan NUMO'nun derin jeolojik depolama sahası seçimini 2025'te tamamlaması ve tesisin 2035 itibarıyla faaliyete geçmesi planlanmaktadır.
Rusya	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> Krasnoyarsk bölgesindeki granit veya gnays yataklarına kurulması planlanan yer altı laboratuvarının depoya dönüştürülmesi söz konusudur. Kola yarım adasındaki depolama sahaları ile ilgili araştırmalar sürmektedir. Zheleznogorsk'ta 1985'ten beri VVER-1000 yakıtı depolanmaktadır. 2012'den itibaren Zheleznogorsk'ta kullanılan RBMK ve diğer yakıtlar için kuru depolama yapılmaktadır. Çeşitli ara depolama tesisleri faaliyettedir.

Ülke	İzlenen Politika	Nihai Depolara Yönelik Tesisler ve İlerleme
Güney Kore	Doğrudan bertaraf, değiştirilmek isteniyor	<ul style="list-style-type: none"> Atık programı 1998'de kabul edilmiş, KRWM 2009'da kurulmuştur. Merkezi ara depolamaya geçilmesi planlanmaktadır.
İspanya	Doğrudan bertaraf	<ul style="list-style-type: none"> 1984'te kurulan ENRESA'nın planı 1999'da kabul edilmiştir. 2016 itibarıyla Villar de Canas'ta merkezi ara depolamaya geçilmesi planlanmaktadır.
İsveç	Doğrudan bertaraf	<ul style="list-style-type: none"> Merkezi kullanılmış yakıt depolama tesisi CLAB 1985'ten beri faaliyettedir. YSA deposu için Aspö'deki yer altı araştırma laboratuvarı kullanılmaktadır. Osthammar bölgesi 2028'de açılması planlanan depo sahası için seçilmiştir.
İsviçre	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> ZZL Wurenlingen'de 2001'den beri kullanılmış ve YSA yakıtlar depolanmaktadır. Beznau'da daha küçük bir kullanılmış yakıt deposu mevcuttur. 1983'ten beri Grimsel'deki yüksek seviyeli atık deposu amaçlı yer altı araştırma laboratuvarı faaliyettedir. 2020 itibarıyla atık muhafazalarının geri alınabileceği derin depolama sahalarına geçilmesi beklenmektedir.
İngiltere	Yeniden işleme	<ul style="list-style-type: none"> 1959'dan beri düşük seviyeli atık deposu faaliyettedir. Yeniden işlenmeden elde edilen YSA vitriyifiye edilerek Sellafield'da depolanmaktadır. Nihai deponun yeri halkın onayına sunulacaktır. NDA bünyesinde jeolojik bertaraf birimi kurulmuştur.
ABD	Doğrudan bertaraf (değerlendirilmektedir)	<ul style="list-style-type: none"> Kullanılmış yakıtlar 1998'den beri Enerji Bakanlığının sorumluluğunda, atık fonu 32 milyar dolara ulaşmıştır. Nevada Yucca Dağı'ndaki kaynaklanmış tüf sahasında kayda değer AR-GE çalışmaları yürütülmüştür. Jeolojik depolamanın Yucca Dağı'nda yapılmasına yönelik 2002 tarihli karar 2009'da kongre tarafından bozulmuştur. Kullanılmış yakıtlar için merkezi ara depolama yoluna gidilmesi muhtemeldir.

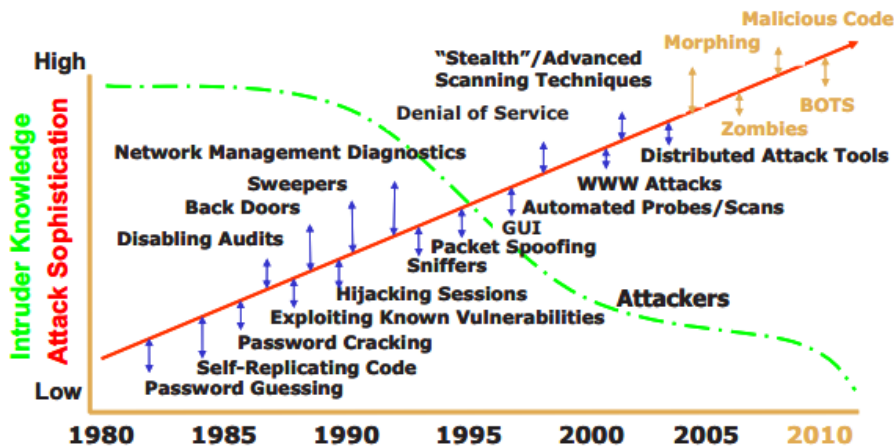
5.1.3. Nükleer Siber Güvenlik

Nükleer güvenlik, doğrudan veya dolaylı olarak şahıslara, mülke veya çevreye zarar vermeyi hedefleyen, nükleer malzeme veya tesislere yönelik, kasıtlı veya kasıt olmadan gerçekleştirilen eylemlerin tespiti ve önlenmesi için gerekli eylemleri içermektedir [53].

Siber güvenlik günümüzde internetin ve internet üzerinden gerçekleştirilen iletişimin yaygınlaşmasıyla büyük önem kazanmıştır. Bilgisayar virüsleri ile bilgisayarlar sistemlerine izinsiz girişler devlet sistemlerinde olduğu kadar özel ve ticari uygulamalarda da yaygınlaşmaktadır. Siber güvenlik, nükleer endüstrideki kritik güvenlik tehditlerinden biri olarak addedilmektedir. Bununla birlikte, nükleer

güç santralleri ve halk için tehlike unsuru teşkil eden sonuçlardan kaçınmak için çeşitli önlemler mevcuttur. NGS'lerde bilgisayar sistemlerinin izolasyonu, internet bağlantısının kullanılmaması, yedek bilgisayar sistemlerinin benimsenmesi, sıkı erişim kontrollerinin uygulanması veya mobil cihazların kullanılmaması gibi tedbirler bu bağlamda ele alınmaktadır. Potansiyel tehditlerin bertarafı için kapsamlı güvenlik risk değerlendirmeleri de gerekmektedir.

Şekil 29 sayısı gün geçtikçe karmaşıklığı artan saldırıları ve bu tip saldırıları gerçekleştirmek için gereken bilgi seviyesindeki düşüşü göstermektedir.



Şekil 29: Tehditlerdeki Artan Karmaşıklık [53]

2010 yılında özellikle endüstriyel bilgisayar sistemlerine saldıran Stuxnet isimli kötü amaçlı yazılım nükleer tesislere yönelik siber saldırılara örnek gösterilebilir. İran'ın yürüttüğü nükleer program da bu yazılımın hedefleri arasındaydı ve uranyum zenginleştirme tesisi Natanz siber saldırıdan zarar görmüştür. İstatistiklere göre zenginleştirme için kullanılan aktif santrifüjlerin sayısı virüsün etkisiyle %10 düşmüş ve IR-1 santrifüjünün hızı 1.064 hertzden 1.410 hertze yükselmiştir. Bu hız mekanik olarak santrifüjlerin pervanesinin dayanabileceği maksimum hıza eşittir [54].

Nükleer güç santrallerindeki siber güvenlik önlemleri, kritik reaktör ekipmanının imalatı kadar ciddiye alınması gereken bir konudur. Nükleer

tesislerin sayısal sistemlere gittikçe artan oranda bağımlı hale gelmesiyle birlikte siber güvenlik riski büyümekte, bu da santrallerin saldırılara ve çalışanların kasıtlı veya kasıtsız eylemlerine karşı savunmasızlığını artırmaktadır. Potansiyel siber saldırılardan asgari hasarla çıkmak için çalışanlardan yöneticilere kadar nükleer güç santralının sınırları içerisindeki herkesin bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Tüm nükleer santrallerinin, tesislerin en üst düzey yöneticisi tarafından onaylanmış ve uygulanmakta olan, erişilebilir ve denetlenebilir bir bilgisayar sistemi (veya genel anlamda siber) güvenlik politikası olmalıdır. Bu politika, nükleer güç santralindeki bilgisayar güvenlik hedeflerini tanımlamalıdır [53].

5.1.4. Altyapı ve Eğitimli İş Gücünün Eksikliği

Başarılı bir nükleer programın şartlarından bir tanesi de sağlam ve güvenilir bir altyapı ile iyi eğitilmiş bir iş gücüne sahip olmaktır. Bu unsurlar, nükleer enerji sektörüne yeni giren birçok ülkede mevcut değildir. Bununla birlikte, nükleer enerji kullanımına ilişkin karar verildikten sonra gerekli ortamın oluşturulmasında devlet desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için hükümetlerin mutlaka gerekli finansman ve insan kaynağı desteğini sağlaması gerekmektedir. Bu noktada, nükleer teknolojinin benimsenmesi için belirli bir modelin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Eğer nükleer güç santrallerinin sahibi ve işletmecisi devlet olacaksa hükümetlerin sağlayacağı finansman desteği daha da öne çıkmaktadır. Öte

yandan, Yap İşlet Devret (YİD) veya Yap-Sahip Ol-İşlet (YSİ) modellerinin uygun olduğu diğer durumlarda hükümetlerin rolü ve finansman desteği daha sınırlıdır. Bu durum, altyapı ve insan kaynağının gelişmesinde gecikmeler yaşanmasına sebep olabilmektedir. Bu gibi durumlarda bile, gerekli altyapının oluşturulması için uygun ortamı sağlamak hükümetlerin sorumluluğundadır. Özellikle, eğitim ve öğretim kurumları, lisanslama yetkisine sahip makamlar ile AR-GE kuruluşları hükümet kaynakları ile desteklenmelidir. Bu hususlar, endüstrinin nükleer pazara katılma motivasyonu için de kritik önem arz etmektedir.

5.1.5. Çevreye Yönelik Kaygılar

Nükleer enerji kullanımına ilişkin bir diğer kaygı da çevreye yönelik muhtemel etkileridir. Normal koşullar altında, atmosferik emisyonlar sınırlı olmasına rağmen farklı türlerde katı, sıvı ve gaz boşaltımları mevcuttur ve bunların bazıları belirli ölçüde radyoaktiviteye sahiptir. Dahası, yoğunlaştırıcı soğutma suyunun deşarjı, göl ya da denizlerde yaşayan canlı türlerine yönelik kaygılar doğurmaktadır. Nükleer ile ilgili tüm aktiviteler, gerçekleşen emisyon ve boşaltımlar sıkı düzenlemelere tabi olduğundan ve kontrol altında tutulduğundan çevreye yönelik herhangi bir endişeye mahal vermeden nükleer enerjinin güvenli ve güvenilir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Ayrıca NGS'ler önemli miktarda CO₂ emisyonuna neden olmaksızın elektrik üretimi ile önemli faydalar sağlamaktadır.

Nükleer enerjiye ilişkin bir başka endişe ise nükleer güç santrallerinin işletilmesi esnasında ortaya çıkan atıklardır. Düşük Seviyeli Atıklar (DSA) her türlü kâğıt havlu, bez, önlük, galoş vb. atıkları kapsar. Bunlar çoğunlukla kısa ömürlü izotoplar içeren atıklardır. Radyoaktif atık hacminin yaklaşık %90'ı bu gruptadır ve bunlar toplam radyoaktivitenin yalnızca %1'ini içerir. Orta Seviyeli Atıklar (OSA), iyon değiştirici

reçinelerden, fırın küllerinden ve bazı metal parçalarından gelen uzun ömürlü radyonüklidleri kapsar. Bu tür atıkların hacimleri nispeten daha küçüktür. Yüksek Seviyeli Atıklar (YSA) özel işlem ve izolasyon gerektirir. Bu atıklar çoğunlukla reaktör korundan gelen kullanılmış yakıtlardan oluşmaktadır. Hacimlerinin küçüklüğüne rağmen bu atıklar toplam radyoaktivitenin %99'una sahiptir. Radyoaktif atıkların depolandığı geçici ve nihai depolama tesisleri sıkı kontrollere tabidir ve istenmeyen sonuçları önlemek için içerdikleri radyoaktivitenin yayılımı engellenir. Bu kontroller ulusal nükleer düzenleyici kuruluşlar tarafından düzenlenmektedir.

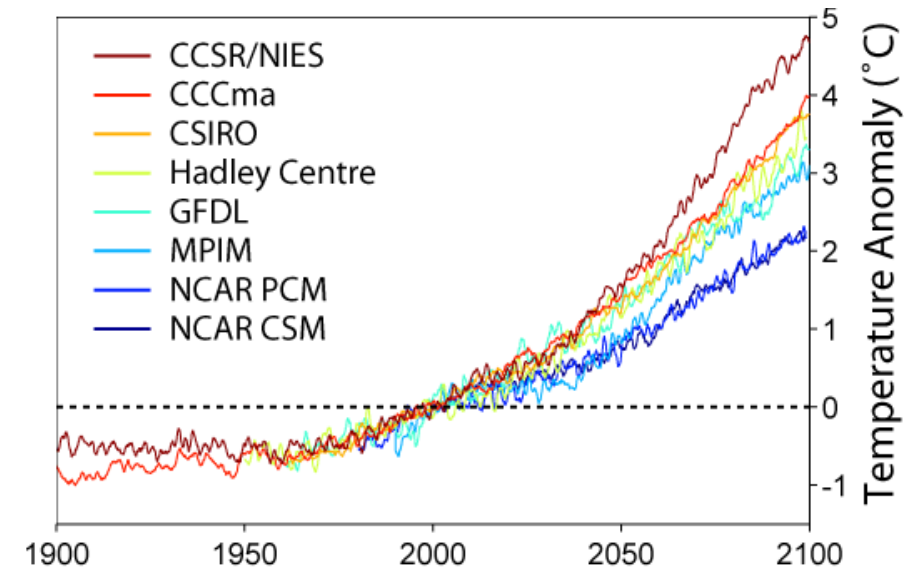
Nükleer enerji üretiminin, önerilen enerji santrali bölgesi çevresindeki ekolojik etkilerini değerlendirmek üzere su kaynakları, besin zinciri, bitki örtüsü, hayvan ve bitki varlığı da dahil olmak üzere geçmişe dönük kapsamlı kontroller ile gerekli çevre analizleri gerçekleştirilir. Yüksek miktardaki soğutma suyu ihtiyacı nedeniyle santralin su kalitesi ve ekolojisi üzerindeki etkileri de değerlendirilir. Ayrıca, nükleer enerji üretiminin çevreye zararlı etkileri olmadığından emin olmak için işletme sırasında da gerekli denetim programları izlenir.

5.2. Faydalar

5.2.1. Düşük Sera Gazı Emisyonu

Küresel ısınma, üzerinde yaşadığımız dünya için önemli bir tehdit olarak değerlendirilmektedir. Şekil 30, 2000 yılı için küresel ortalama sıcaklıklarda gözlemlenen artışı göstermektedir.

Her bir eğri, farklı kuruluşların sıcaklık artışı tahminlerini temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, önümüzdeki yıllardaki küresel ısınmanın ciddi bir şekilde artacağı öngörülmektedir.

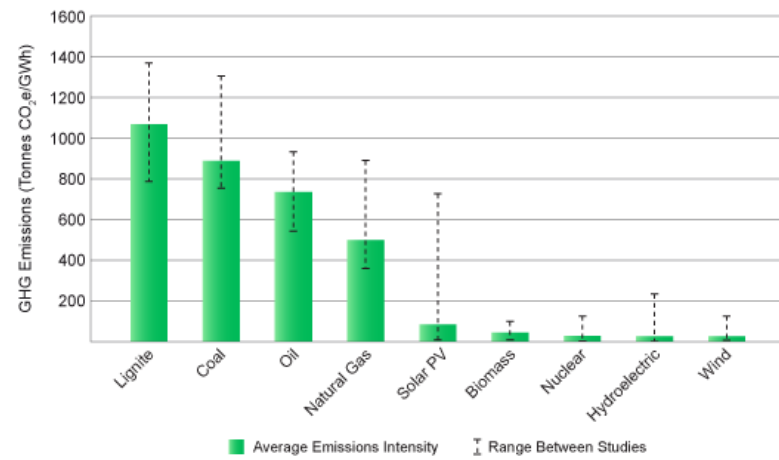


CCSR-NIES: İklim Bilim Araştırma Merkezi - Ulusal Çevre Çalışmaları Enstitüsü
 CCCma: Kanada İklim Modelleme ve Analiz Merkezi
 CSIRO: İngiliz Milletler Topluluğu Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Kurumu
 GFDL: Jeofizik Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı
 MPIM: Max-Planck Meteoroloji Enstitüsü
 NCAR PCM: Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi Paralel İklim Modeli
 NCAR CSM: Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi İklim Sistemi Modeli

Şekil 30: Farklı Kurumların Küresel Sıcaklık Artışı Tahminleri [55]

Küresel ısınmaya neden olan pek çok unsur vardır. Enerji üretimi, çimento, çelik üretimi, nakliye ve tarımsal faaliyetler bu unsurlar arasında öne çıkanlardır. Enerji kaynakları ile yürütülen neredeyse tüm faaliyetler, sera etkisiyle sonuçlanan emisyonların atmosfere salınmasına veya ozon tabakasının delinmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek

miktarlarda CO₂ salınımı yapan termik santraller, iklim değişikliğine neden olan en büyük unsurdur. Şekil 31, GWh elektrik üretimi başına salınan sera gazı emisyonlarını göstermektedir. Bu emisyonlar sadece santrallerin işletilmesinden değil tesislerin kurulumu sırasında da ortaya çıkmaktadır.



Şekil 31: GWh Üretim Başına Farklı Enerji Üretimi Yöntemleri ile Ortaya Çıkan Sera Gazı Emisyonları [56]

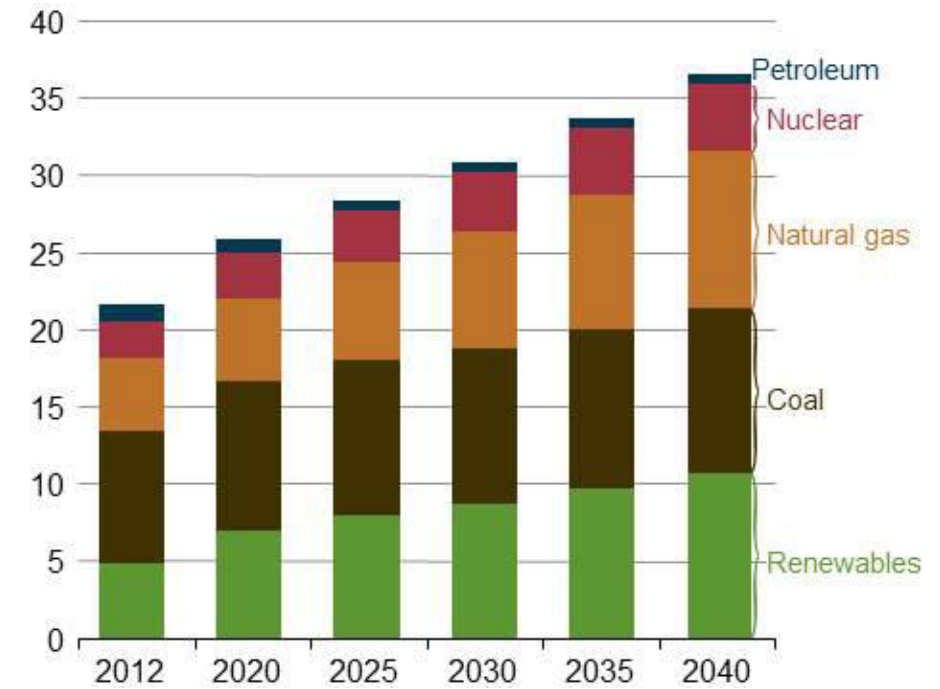
Nükleer enerji, rüzgâr ve hidroelektrik enerjisine benzer şekilde nispeten daha küçük karbon ayak izine sahip, çevre dostu teknolojilerden bir tanesidir. Nükleer enerji CO₂ içermeyen bir enerji kaynağıdır ve bu noktada asit yağmurlarına, kirli hava kütesine ve ozon tabakasının delinmesine neden olmaz. Nükleer güç santralleri ile yakıt çevrimi faaliyetlerinden kaynaklanan radyoaktif emisyonlar mevcuttur, ancak bu salınımlar sıkı düzenlemelere tabidir ve sağlığa yönelik risk yaratabilecek seviyelerin altında tutulmaktadır [57].

2011 yılında tüm dünyadaki nükleer güç santralleri 2.518 TWh (milyar kWh) elektrik üretmiştir. Bu süre zarfında nükleer enerji nedeniyle 73 milyon ton CO₂ üretilirken, kömür enerjisi ile 2.236 milyon ton CO₂ üretilmiştir [56]. Genel anlamda dünya nükleer enerjiden yararlanmasaydı, ortaya çıkan CO₂ emisyonları elektrik üretiminde en az %17, enerji sektöründe ise %8 daha yüksek olacaktı.

5.2.1.1. Elektrik Üretiminde Genel Eğilimler

Küresel ısınmanın çevre için önemli bir tehdit unsuru teşkil etmesinden ötürü zararlı emisyonların önüne geçmek için uluslararası arenada yoğun çabalar sarf edilmektedir. Termik santral kullanımının sınırlandırılmasının zararlı emisyonlardan kaçınma açısından önemli bir çözüm olduğu açıktır. Avrupa'daki çoğu gelişmiş ülke bu seçeneği değerlendirirken rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektedir. Her

ne kadar doğal gaz da sera gazı üreten bir kaynak olsa da doğal gaz kombine çevrim santralleri yüksek verimlilikle işletildiğinden gelecekte bu kaynağın kullanımında artış gözlemleneceği düşünülmektedir. Yenilenebilir ve nükleer enerji kaynaklarının kullanımında da benzer ve nispeten belirgin artışlar beklenmektedir. Şekil 32'de gösterildiği üzere kömür ve doğal gaz önümüzdeki yıllarda önemli kaynaklar olmaya devam edecektir.

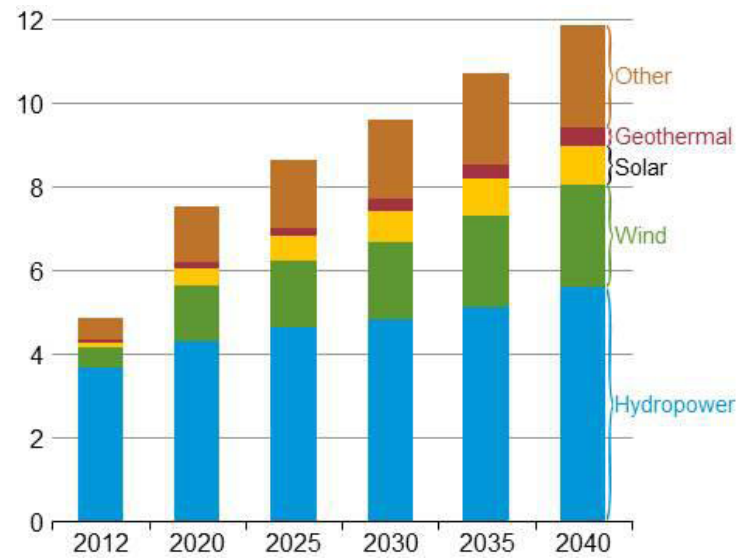


Şekil 32: Elektrik Üretiminde Farklı Kaynakların Kullanımına İlişkin Tahminler [58]

5.2.1.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Rolüne İlişkin Beklentiler

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önümüzdeki yıllarda piyasada daha büyük ölçüde yer alması beklenmektedir. Son zamanlarda maliyetlerin düşmesi, teşviklerin artırılması ve çevre dostu politikaların geliştirilmesi ile yenilenebilir enerji kaynakları gelişmiş ülkelerde yaygınlık kazanmıştır. Bununla birlikte bu yaygınlık gelişmekte olan ülkelerde de gözlemlenecektir.

En yaygın biçimde kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektrik santraller olup dünyanın pek çok yerinde büyük ölçekli barajlar ve hidroelektrik santralleri inşa edilmiştir. Şekil 33, su, rüzgâr, güneş, jeotermal yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar ki gelişim tahminini göstermektedir;

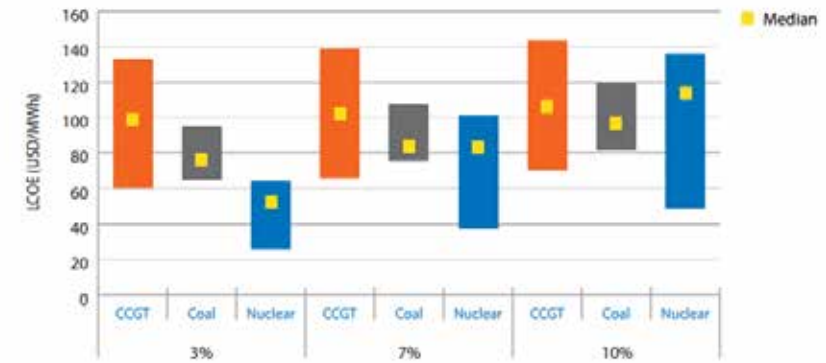


Şekil 33: Dünyanın Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Ürettiği Net Elektrik Miktarı (trilyon kilovat saat) [58]

5.2.2. Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost Of Electricity - LCOE)

LCOE, farklı elektrik üretim yöntemleri arasında karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmakta olan bir ölçüktür. OECD, bu karşılaştırma için özel bir araştırma gerçekleştirmiş ve Şekil 34'te termik enerji üretimi teknolojileri için gerçekleştirilen karşılaştırmanın sonuçları gösterilmektedir (Dikey eksen LCOE değerleri, yatay eksen faiz değerleri; %3, %7, %10). Bu karşılaştırmada faiz oranlarının arttığı durumda bundan en çok

etkilenen elektrik üretim yönteminin nükleer enerji olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, başlangıçtaki büyük yatırım gereksinimi ile uzun süren inşaat sürelerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, tesislerin planlara uygun şekilde zamanında inşa edilmesi nükleer alanında rekabetçi enerji üretimi için kritik önem arz etmektedir [59].



CCGT: Kombine Çevrim Gaz Türbini

Şekil 34: Farklı Faiz Oranlarıyla Termal Teknolojilerin LCOE Maliyetlerinin Karşılaştırılması [59]

Ayrıca, kendi dinamiklerinden dolayı her ülkenin genel olarak farklı LCOE'lere sahip olması beklenmektedir. Analizlere göre, Çin ve Güney Kore Tablo 18'de de gösterildiği üzere diğer ülkeler arasında en düşük LCOE'ye sahiptir.

İncelenen ülkelerde ortaya çıkan LCOE sonuçlarında nükleer altyapı ve endüstrinin iyi

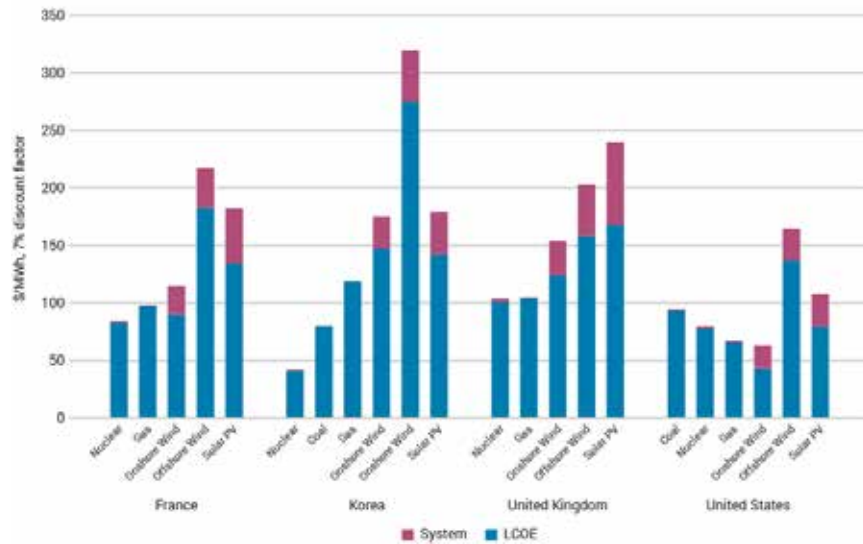
kurulmuş olması bu hususta büyük etkiye sahiptir. Bu nedenle, sektöre yeni giren ülkelerde genellikle yüksek LCOE değerlerinin gözlemlenmesi beklenmektedir. Çin örneğinde olduğu gibi yerli kaynaklarla nükleer faaliyetleri destekleyecek endüstrinin gücü ile rekabetçi fiyatlar da bu durumu etkileyen unsurlar arasındadır.

Tablo 18: 2015-2020 Arasında İnşa Edilen Tesisler İçin Öngörülen Nükleer LCOE Maliyetleri, \$/MWh

Ülke	%3 Faiz Oranı	%7 Faiz Oranı	%10 Faiz Oranı
Belçika	51,5	84,2	116,8
Finlandiya	46,1	77,6	109,1
Fransa	50,0	82,6	115,2
Macaristan	53,9	89,9	125,0
Japonya	62,6	87,6	112,5
Güney Kore	28,6	40,4	51,4
Slovakya	53,9	84,0	116,5
İngiltere	64,4	100,8	135,7
ABD	54,3	77,7	101,8
Çin	25,6 - 30,8	37,2 - 47,6	48,8 - 64,4

Enerji üretim maliyetleri iç dinamiklerden dolayı ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Bu bakımdan LCOE, karşılaştırma yapmak için kullanışlı bir göstergedir. Bu yaklaşıma dayanarak, nükleer enerjinin birçok ülkede Şekil 35'te gösterildiği gibi diğer elektrik üretim yöntemleriyle rekabet edebildiği görülmektedir. Nükleer enerji endüstrisi sermaye yoğun bir sanayidir. Şekilde verilen bilgiler hazırlanırken yıllık faiz oranı %7 olarak alınmış olup daha düşük faiz oranlarıyla nükleer enerjinin

rekabet gücünün daha fazla artış göstereceği öngörülmektedir. İnşaat süreleri de bu bağlamda önemli bir unsur teşkil etmektedir. Normal şartlar altında inşaatların beş ila altı yıl içinde tamamlanması beklenmektedir ancak NGS'lerin inşasında farklı nedenlerden ötürü gecikmeler gözlemlenmektedir. Bu, özellikle yeni projelerle gelen yüksek finansman yükü nedeniyle nükleer enerjide beklenen maliyetlerin sapmasında rol oynayan önemli bir faktördür.



Şekil 35: Temsili Ülkelerdeki Farklı Elektrik Üretim Yöntemleri İçin Sistem Maliyetleri ve LCOE [60]

5.2.3. Yeni Bir Sektörün Kurulması

Ülkeler nükleer teknolojiyi sanayilerine dâhil ederken farklı yöntemler izlemiştir. Kanada, ABD, Fransa, Rusya ve Japonya nükleer enerjiden faydalanırken uzun yıllar boyunca kendi reaktör teknolojilerini de geliştirmiştir. Ancak Çekya ve İspanya gibi ülkelerin oluşturduğu ikinci bir grup, nükleer reaktörlerini diğer ülkelerden ithal etmelerine rağmen bu ülkeler kendi sınırları içerisinde gelişmiş bir nükleer sanayi sektörü de kurmuştur.

Güney Kore örneği, tüm dünya ülkeleri tarafından

örnek alınması gereken bir gelişim göstermiştir. Diğer ülkelerden ithal ettiği nükleer reaktörleri kullanmaya başlayan Güney Kore, nükleer güç santrallerinin faaliyetlerini desteklemek amacıyla yerli nükleer endüstrisini de kurmuştur. Ayrıca, bu süre zarfında kendi nükleer reaktörlerini ve enerji santrallerini tasarlamak üzere güçlü bir insan kaynağı oluşturmaya odaklanmıştır. Güney Kore yakın zaman önce, Birleşik Arap Emirlikleri için anahtar teslim bir nükleer güç santrali projesi imzalamıştır.

Nükleer endüstrinin kurulması aşamalı bir süreçtir. İlk aşama, planlama ve inşaat dönemidir. Hükümetler ağırlıklı olarak stratejik planlama, yol haritaları geliştirme, lisanslama, saha seçimi, düzenleme, değerlendirme ve inceleme süreçlerine dâhil olurlar. Özel sektör ise tasarım, çevre analizi, tedarik, inşaat ve işletmeye alma süreçlerindeki katılım gösterir. Denetleme faaliyetleri özel sektör veya devlet makamları tarafından gerçekleştirilmektedir. Nükleer güç santrallerinin işletilmesi esnasında, kamu ya da özel sektör, işletme, güvenlik, çevre ve atık yönetimi ile bakım çalışmalarına katılır. Benzer şekilde, nükleer güç santralının kullanım ömrü dolduktan sonra hizmetten çıkarma faaliyetleri de ilgili taraflarca gerçekleştirilir. Pek çok ülkede, araştırma reaktörlerinin tasarımı, inşası, işletilmesi ve kullanımı başlıca devlet kurum ve kuruluşları tarafından gerçekleştirilmektedir.

Geçmişte, nükleer enerji üretimi esas olarak kamu birimlerinin sorumluluğundaydı. Ancak, birçok ülkede özelleştirme nedeniyle durum değişmiş, özel kuruluşlar sektörde önemli paydaşlar haline gelmiştir. Nükleer elektrik üretimi özel sektörün sorumluluğunda olmasına rağmen, hükümetler de gerekli altyapının geliştirilmesinde önemli roller üstlenmektedir. Lisanslama yetkisine sahip makamlar ile düzenleyici kurumlar, eğitim

kurumları, araştırma merkezleri, bilgilendirme ve tanıtım ofisleri devlet bünyesinde işleyen temel birimlerdir.

Hükümetler ayrıca stratejik plan ve yol haritaları hazırlamakla da yükümlüdür. Özel sektör ile nükleer endüstrinin makul bir şekilde entegre olması için stratejik hedeflerin özel olarak tanımlanması gerekir. Gerekli adımların zamanında atılması için hükümetlerin gerekli finansman ve insan kaynağı tahsisini de büyük önem arz eden bir husustur. Devlet yetkilileri, gerekli teşvikleri sağlayarak sektörün güçlendirilmesinden sorumludur. Bu teşvikler, AR-GE çalışmalarını, inovasyonu, tasarım çalışmalarını ve yüksek teknoloji içeren ekipmanların üretimini desteklemek üzere verilir.

Farklı yeteneklerdeki firmaların bir araya gelerek oluşturdukları nükleer kümelenmeler, küresel piyasalarda rekabet edebilecek tedarik zincirlerinin gelişmesi için gereklidir. PNB (Pole Nuclear Burgundy, Fransa), Cantabria İspanyol Nükleer Kümesi, Çek Atomex Grubu bu tür kümelere örnektir. Üye şirketler ortak bir altyapı paylaşmakta, ortak eğitim ve sertifikasyon faaliyetleri düzenlemektedir. Bu yapılar aynı zamanda verimli, yüksek kaliteli ve düşük maliyetli üretim için tedarik zincirleri geliştirmektedir. Bu koşullar, şirketlerin küresel pazarda rekabet edebilmelerine imkân sağlar.

5.2.4. Nitelikli İnsan Kaynağı

Nitelikli insan kaynağı nükleer enerji sektörü için kritik önem arz eden bir konudur. Nükleer enerji sektörü, sürdürülebilirliği adına ağırlıklı olarak uzmanlaşmış, eğitilmiş ve motive bir iş gücüne dayanır. Yaşlanmakta olan iş gücü ve azalan öğrenci sayısı ile yeni nükleer programlar

için gerekli nükleer bilgi ve tecrübeyi kaybetme riskindeki artış, bu alandaki insan kaynakları yönetimini etkileyen ciddi zorluklardır. Nükleer enerji üretim faaliyetleri için insan kaynaklarına ihtiyaç duyan tüm kurum ve kuruluşlar Şekil 36'da gösterilmiştir.



Şekil 36: Nükleer Enerji Alanında İnsan Kaynağına İhtiyaç Duyan Kurum ve Kuruluşlar [61]

İster ekipman imalatı, ister enerji santralının inşası veya reaktörün faaliyete geçirilmesi olsun, güvenlik, nükleer enerji faaliyetlerindeki en önemli kaygı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, nükleer enerji ile ilgili tüm faaliyetlerde nitelikli ve eğitilmiş bir iş gücünün istihdamını gerektirir. Nükleer enerji endüstrisi sıkı düzenlemelere tabidir ve şirketleri, gerekli yetkin insan kaynağını kullanmaya zorlar. Nükleer enerji ile bu sektöre ilişkin teknoloji, farklı birçok bilim ve mühendislik alanını kapsamaktadır. Nükleer enerji alanında elde edilecek bilgi birikimi ile tecrübe, ileri teknoloji gerektiren pek çok alana aktarılabilir. Özellikle havacılık ve savunma sanayi, nükleer endüstri ile ortak paydada bulunan alanlardır. Bu,

nitelikli iş gücünün çapraz endüstriler arasında kullanılabilmesi anlamına gelmektedir.

Güçlü bir nükleer endüstrinin gelişiminde birçok firmanın farklı alanlara katılımı gerekmektedir. Büyük ölçekli imalat şirketlerinin yanı sıra küçük ve orta ölçekli şirketler, köklü bir nükleer tedarik zincirinin oluşturulması için önemli roller oynayacaktır. Nükleer sanayi, çalışanları da dâhil tüm paydaşların nitelikli olması gereken bir alandır. Nükleer endüstrinin çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda, kapsamlı eğitim programlarının geliştirilmesinin önemi kolaylıkla görülmektedir. Bu, şirketlerin küresel pazara katılırken sahip oldukları vizyon ve

rekabet gücünü iyileştirecektir. Nükleer enerji endüstrisinde yer alan birçok ülkede iyi uygulama örnekleri mevcuttur. Fransa'daki Uluslararası Nükleer Enerji Enstitüsü (I2EN) ve İngiltere'deki Ulusal Nükleer Yetkinlik Akademisi (NSA) bu tür kuruluşlara örnek gösterilebilir.

I2EN, sanayi, AR-GE ve akademik alanlardaki tüm eğitim ve öğretim faaliyetleri için oluşturulan bir şemsiye kuruluştur. Bu kuruluşun sorumlulukları arasında, stratejik insan kaynağı planlaması, eğitim ve öğretim faaliyetlerinin koordinasyonu, eğitim programlarının desteklenip geliştirilmesi, akreditasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve eğitim tesislerinin kurulması sayılabilir. Kuruluş ayrıca uluslararası faaliyetlere de katılım göstermektedir. İngiltere'deki NSA, koordinasyon ve işbirliği ile gerekli becerileri sağlamak yoluyla nitelikli iş gücü yetiştirerek şirketleri güçlendiren bir kuruluştur.

Türkiye ve BAE gibi nükleer enerji sektörüne yeni giriş yapan ülkelerin nükleer enerji stratejilerini tanımlarken insan kaynakları merkezi önem atfedilmesi gereken bir husustur. Türkiye'nin Akkuyu projesi için ilgilenilmesi gereken en önemli husus bilgi asimetrisidir. Bu sorunla başa çıkabilmek için Türkiye, Rus ortağıyla nükleer mühendislik alanında toplam 600 Türk öğrencinin yetiştirilmesi için anlaşma yapmıştır. 307 öğrenci şu anda Moskova'daki Moskova Mühendislik Fizik Enstitüsü Üniversitesi (MEPHI) ile Obninsk ve St. Petersburg Politeknik Üniversitesi'nde eğitim almaktadır. Bu öğrenciler bir yıllık Rusça eğitimiyle beraber 5,5 yıl lisans eğitimi alacaktır. Diplomalarını alan öğrenciler Rus nükleer güç santrallerinde 1,5 yıl boyunca iş başında eğitim de alacaktır.

Bu tür bir yaklaşım ve insan kaynağının geliştirilmesi için daha fazla zaman ayrılması, Türkiye ile sektöre yeni giren diğer ülkelerin yetkin müşteriler olmasına yardımcı olacaktır.

6. Türkiye'de Elektrik Üretimi ve Nükleer Enerjinin Rolü

Türkiye son on beş yılda oldukça etkileyici bir ekonomik büyüme sergileyerek gelişmekte olan bir ülkedir. Bu büyüme, ülkenin sahip olduğu belirgin nüfus artışıyla birlikte iç enerji talebini doğal olarak tetiklemektedir. Ayrıca, ülkemizin önümüzdeki yıllar için iddialı hedefleri de bulunmaktadır. Bu hedeflere ulaşabilmek için

elektrik tedarikinin planlanması gerekmektedir.

Tablo 19, 2016'da mevcut kaynakların elektrik üretimine olan katkısını göstermektedir [62]. İthal edilen doğal gaz ve kömürün ülkenin elektrik üretiminde %38'lik bir payının olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.

Tablo 19: Türkiye Elektrik Üretiminde Farklı Kaynakların Payı

KAYNAK	ŞUBAT 2017 SONU İTİBARIYLA		
	KURULU KAPASİTE MW	PAY %	SANTRAL #
Akaryakıt + Nafta + Dizel	368,7	0,5	14
Kömür (Taş Kömürü + Linyit Kömürü + Asfaltit)	9.869,9	12,5	29
İthal Kömür	7.473,9	9,5	10
Doğal Gaz + Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG)	22.095,2	28,0	243
Yenilen. + Atık + Piroolitik Yağ	474,5	0,6	82
Çok Yakıtlı Katı + Sıvı	667,1	0,8	23
Çok Yakıtlı Sıvı + Doğal Gaz	3.354,0	4,3	46
Jeotermal	835,9	1,1	32
Barajlı Hidroelektrik Santrali	19.633,1	24,9	116
Nehir Tipi Hidroelektrik Santrali	7.147,9	9,1	482
Rüzgâr	5.867,4	7,4	150
Güneş	12,9	0,0	2
Termik (Ruhsatsız)	87,2	0,1	35
Rüzgâr (Ruhsatsız)	14,9	0,0	25
Güneş (Ruhsatsız)	886,0	1,1	1.120
TOPLAM	78.788,5	100,0	2.409

TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ÜRETİMİ VE NÜKLEER ENERJİNİN ROLÜ

Tablo 20 ise, önümüzdeki 20 yıl boyunca beklenen brüt elektrik tüketimini göstermektedir. Verilen zaman zarfı için düşük, temel ve yüksek olmak üzere elektrik talebine ilişkin üç senaryo sunulmuştur. Tablo verilerine bakıldığında mevcut gidişatı temsil eden temel senaryoda dahi 20 yıl içerisinde elektrik tüketiminin iki katından daha fazla artması beklenmektedir.

Tablo 20: 2017-2026 İçin Brüt Elektrik Talebindeki Değişime İlişkin Tahminler [63]

YIL	DÜŞÜK (TWh)	ARTIŞ	TEMEL (TWh)	ARTIŞ	YÜKSEK (TWh)	ARTIŞ
2017	288,21	-	290,24	-	292,12	-
2018	301,51	%4,6	304,43	%4,9	307,21	%5,2
2019	315,81	%4,7	319,46	%4,9	323,79	%5,4
2020	328,41	%4,0	334,98	%4,9	343,24	%6,0
2021	341,04	%3,8	350,70	%4,7	363,44	%5,9
2022	354,16	%3,8	367,26	%4,7	384,85	%5,9
2023	367,88	%3,9	384,64	%4,7	407,89	%6,0
2024	381,81	%3,8	402,31	%4,6	431,66	%5,8
2025	396,14	%3,8	420,51	%4,5	456,47	%5,7
2026	410,53	%3,6	439,17	%4,4	482,26	%5,7
2027	424,97	%3,5	457,88	%4,3	508,61	%5,5
2028	439,50	%3,4	477,04	%4,2	535,94	%5,4
2029	454,14	%3,3	496,50	%4,1	564,13	%5,3
2030	468,40	%3,1	515,96	%3,9	592,84	%5,1
2031	482,75	%3,1	535,51	%3,8	622,22	%5,0
2032	497,11	%3,0	555,22	%3,7	652,38	%4,8
2033	511,42	%2,9	575,05	%3,6	683,21	%4,7
2034	525,30	%2,7	594,87	%3,4	714,61	%4,6
2035	539,01	%2,6	614,64	%3,3	746,52	%4,5
2036	553,14	%2,6	635,06	%3,3	779,74	%4,5
2037	567,68	%2,6	656,16	%3,3	814,47	%4,5

Elektrik tüketiminde beklenen bu artış, yeni enerji santrallerinin kurulmasıyla dengelenmelidir. Bu anlamda, yavaş ilerleyen nükleer santral projelerinin ivedi bir şekilde enerji kaynaklarımız arasına katılması gerekmektedir. Akkuyu Projesi'nde şimdiden en az dört yıllık bir gecikme beklenmektedir. Başlangıçta, Akkuyu NGS'nin dört biriminin de 2023 itibarıyla hizmete alınması bekleniyordu, ancak günümüz şartları ele alındığında her şeyin planlara uygun ilerlemesi halinde 2023 itibarıyla yalnızca bir birimin hizmete alınabileceği öngörülmektedir. Sinop NGS için hala belirli bir takvim mevcut değildir.

Elektrik tüketimindeki bu artıştan doğan ihtiyacı karşılayabilmek için çeşitli hükümet politikaları geliştirilmektedir. Buna göre, elektrik üretiminde yenilenebilir enerjilerin payı artırılacaktır. Bununla birlikte, yerli kömür kullanımına yönelik önemli miktarda yeni kapasite geliştirme planları mevcuttur. Bu planlanan kapasiteye ulaşabilmesi için yerli kömür yatakları yatırımcılara tahsis edilecek ve toplam yerli kömür kapasitesi önümüzdeki 10 yıl içerisinde yaklaşık 8000-9000 MWe olacaktır. Bu kapasite, yaklaşık olarak Akkuyu ve Sinop projelerinin nükleer kapasitesinin toplamına eşittir.

Yenilenebilir ve termal (nükleer dâhil) enerjinin elektrik üretimi üzerindeki etkisi ise birbirlerinden farklıdır. Güneş, rüzgâr, kömür ve nükleer enerjiye özgü ortalama kapasite faktörleri sırasıyla 18, 33, 75 ve 90'dır. Buna göre, nükleer ve kömür yakıtlı santrallerin kapasite faktörleri diğer kaynaklardan çok daha yüksek olduğu için, bu kaynakların elektrik üretimine gerçek katkısı, kurulu olan kapasitelerdeki kendi paylarından daha fazla olacaktır.

Gelişmiş Avrupa ülkelerine bakıldığında bu ülkelerin elektrik üretimlerini yenilenebilir kaynaklara dönüştürme eğilimleri görülmektedir. Ancak, enerji depolama teknolojilerinde güvenilir gelişmeler olmaksızın, emre amadeliğe ilişkin kısıtlamalar nedeniyle tamamen yenilenebilir kaynaklara güvenmek neredeyse olanaksızdır. Yukarıda bahsedilen kapasite faktörleri nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilecek elektrik enerjisinin kömür yakıtlı veya nükleer santrallerden elde edilecek elektrik enerjisi kapasitesine yetişebilmesi için kurulacak kapasitenin çok yüksek olması gerekmektedir. Bu da, yenilenebilir kaynaklar alanında yatırım maliyetini büyük oranda artırmaktadır.

NÜKLEER ENERJİ PROJELERİNİN EKONOMİK ETKİLERİ

7. Nükleer Enerji Projelerinin Ekonomik Etkileri

7.1. Elektrik Üretimi

Nükleer enerji uygulamasının Türkiye ekonomisine en büyük katkısı elektrik üretimi olacaktır. Şu anda, ileriye yönelik olarak her biri dört adet basınçlı su reaktörüne sahip iki proje mevcuttur; Akkuyu NGS (4 x 1200 MWe VVER) ve Sinop NGS (4 x 1120 MWe ATMEA-1). Bu iki santralin tamamlanmasının ardından ulusal şebekenin kapasitesi 9280 MWe artacaktır. Yıllık ortalama kapasite faktörü %85 olarak alındığında, toplam elektrik üretimi miktarı yıllık 78000 MWh dolaylarında olacaktır. 2016 enerji istatistiklerine göre, bu rakam yıllık elektrik tüketiminin kabaca %25'ine karşılık gelmektedir. Nükleer elektrik üretiminin en önemli etkisi, elektrik üretiminin ithal doğal gaza olan bağımlılığını sona erdirebilecek olmasıdır, ancak yeterli sayıda santral inşa edilmediği sürece elektrik üretiminde ithal doğal gaza bağımlılık devam edecektir.

Dört nükleer reaktörün 2025 yılına kadar tamamlanıp hizmete alınması halinde, nükleer enerjinin toplam kapasiteye katkısı 80000 MW'ın yaklaşık %6'sı olacaktır. Nükleer enerjiye özgü kapasite faktörünün yüksek oluşu dolayısıyla elektrik üretimine olan katkı ise daha yüksek oranlara ulaşacak ve en az yaklaşık %20 olacaktır.

Nükleer enerjinin en önemli avantajlarından biri de üretim maliyetinin istikrarı, ya da yakıt piyasalarına olan bağımlılığın görece ortadan kaldırılmasıdır. Nükleer enerji sektöründe yakıt ve işletme maliyetlerinin elektrik üretim maliyetine etkisi yaklaşık %15'tir. Doğal gaz için ise bu oran yaklaşık %65'tir. Bu, doğal gazla çalışan sistemlerde dalgalanmaların toplam maliyete kolaylıkla yansıtacağı anlamına gelirken, nükleer enerji için böyle bir etki söz konusu değildir.

7.2. Yeni İş İmkanları Yaratılması

Ulusal nükleer programın hayata geçirilmesi ve nükleer güç santrallerin hizmete alınması için nitelikli insan kaynağının geliştirilmesi gerekir. İnsan kaynağı gelişimi, pek çok paydaşın rol aldığı çok boyutlu bir süreçtir. Bununla birlikte, en önemli aktör hükümetlerdir. Nükleer enerji ile ilgili işlere olan ilgiyi artırmak için gerekli düzenlemeleri hazırlayıp eğitim ve öğretim faaliyetlerini teşvik etmek hükümetlerin sorumluluğundadır. Ayrıca, nükleer endüstrideki iş gücünün çeşitli eğitimleri tamamlaması ve belirli koşulları karşılaması oldukça önemli bir gereksinimdir. Bu, nükleer endüstrisinde çalışan iş gücü niteliklerinin çok daha yüksek olduğu ve dolayısıyla bu endüstride

kazancın diğer alanlara göre daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Hizmetteki yüzden fazla sayıda reaktörü ile ABD gelişmiş bir nükleer endüstriye sahiptir. ABD'deki her nükleer santralde ortalama 530 çalışan vardır. Ayrıca, rakamlar bölgelere göre değişiklik gösterse de, nükleer tesislerdeki her doğrudan yüz adet iş kolu için yaklaşık olarak yerel ekonomide ek 66, ülke çapında ise ek 726 iş kolunun yaratılması beklenmektedir. Bu noktada, nükleer endüstrinin gelişmişlik düzeyi önemli bir unsurdur.

Tablo 21, nükleer güç santrallerinde çalışanların unvanlarını ve yeterliklerini göstermektedir.

Tablo 21: Nükleer Güç Santrallerinde Meslek ve Yeterlilik Unvanları

Nitelikli Personel	Mühendislik / Teknik	Teknik
Elektrikçiler	Nükleer mühendisler	Kimyagerler
Kaynakçılar	Makine mühendisleri	Teknisyenler
Boru tesisatçıları	İnşaat mühendisleri	Radyasyondan korunma uzmanları
Sac levha işçileri	Kimya mühendisleri	Reaktör operatörleri
Vinç operatörleri	Sağlık fizikçisi	

Nükleer güç kullanan ülkelerin yerli sanayilerini kurarak santrallerin faaliyetlerini desteklemeye karar vermesi durumunda yaratılan istihdamın boyutları da oldukça önemlidir. Bu durumda, imalat sanayii, bakım faaliyetleri ve hizmet sağlayan şirketler ile mühendislik, tasarım ve danışmanlık şirketleri çok sayıda nitelikli personel ve uzmanı istihdam ederler. Örnek vermek gerekirse, ABD'de nükleer endüstri alanında önümüzdeki beş yıl içerisinde 20.000 kişinin istihdam edilmesi beklenmektedir.

Öte yandan, nükleer güç santralleri inşaatları, içerdikleri birimlerin sayısına bağlı olarak beş

ila on iki yıl sürmektedir. Tek bir reaktörün inşası esnasında, en yoğun dönemde 3.500 kişi istihdam edilir. Bu nedenle, birden fazla reaktör inşa edilirken etkili insan kaynağı kullanımı için iş planlaması büyük önem arz etmektedir.

Akkuyu projesini gerçekleştiren şirkete göre, inşaatın en yoğun döneminde 12.500 işçi istihdam edilecektir. Ayrıca, yaklaşık 4000 çalışanın santralin işletilmesi esnasında, benzer sayıda çalışanın da şirket dışındaki faaliyetleri desteklemek amacıyla yerel olarak istihdam edileceği düşünülmektedir.

Bu kabiliyetler ilgili diğer alanlarda da kolaylıkla benimsenebilmektedir.

Nükleer bileşen imalatı, özel ekipmanların yanı sıra nitelikli işçiliğe de ihtiyaç duyan bir başka alandır. Bu bağlamda hata payı çok düşük, kusursuz üretim elzemdir. Bu da, nükleer bileşen imal eden şirketlerin uzmanlaşmış ve katma değeri yüksek üretim talep eden ülkelerde varlık göstermesine yardımcı olmaktadır. Basınçlı kaplar, basınçlandırıcılar, ana dolaşım türbinleri ve buhar jeneratörleri gibi ağır ekipmanlar nükleer reaktörlerde kullanılan özgün mühendislik

ürünleridir. Bu deneyim ve kabiliyet, büyük endüstriyel tesislerin inşası için de kullanılabilir. Nükleer reaktörler yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Dahası, çalışma ortamındaki radyasyon, kullanılan malzemelerin özelliklerini önemli derecede etkilemekte ve bozmaktadır. Enerji sistemleri, petrokimya tesisleri ve rafineriler

gibi sanayi tesisleri de benzer şiddetli çalışma koşullarına sahiptir. Bu nedenle, nükleer sanayi için gerekli tasarım ve imalat becerileriyle sanayi altyapısının geliştirilmesi, bu tür alanlarda da faydalı olacaktır. Böylelikle, büyük oranda yabancı uzmanlık ve kabiliyetlere dayanan endüstriler yerli kaynaklar tarafından desteklenebilecektir.

Tablo 22, NGS inşası ile ilgili faaliyetleri göstermektedir.

Tablo 22: Nükleer Güç Santrallerinin İnşaatı ile İlgili Faaliyetlerin Dağılımı

Mimarlık, mühendislik	Program Yönetimi
	Teknik Destek
	İnşaat Yönetimi
	Hizmete Alma
İnşaat	Şantiye İşleri
	Sahanın İslahı ve İyileştirilmesi
	Güç İletim Ağı
Nükleer Ada	Reaktör Basınçlı Kap
	Reaktör Kabı İç Parçaları
	Buhar Jeneratörleri
	Basınçlandırıcı
	Atık Yönetim Sistemleri
	Kontrol ve Teçhizatlandırma Sistemleri
	Koruma Sistemleri
	Pompalar ve Valfler
Konvansiyonel Ada	Türbin
	Jeneratör
	Soğutma Suyu Sistemleri
	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
	Destek Sistemler
	Pompalar ve Valfler
Diğer	Mekanik ve Elektrik İşleri
	Diğer Mühendislik İşleri
Lisanslama ve Düzenleyici Faaliyetler	Lisanslama
	Güvenlik ve Risk Analizleri
	Sistem Analizleri
	Denetleme
Danışmanlık Hizmetleri	Mühendislik ve Tasarım Hizmetleri
	İşletme Faaliyetleri
Nitelikli İşçi Eğitimi	Eğitim Faaliyetleri
	Sertifikalandırma

7.4. Yerel Endüstri Katılımı

Nükleer gücün ülke ekonomisine bir diğer büyük katkısı da elektrik üretimine ek olarak, yerli sanayinin de NGS projelerinde yer almasıdır. Nükleer endüstri oldukça küreselleşmiştir ve piyasada güçlü bir rekabet mevcuttur. Öte yandan, nükleer endüstrideki imalat ve hizmetler, tedarikçiler için de oldukça yararlıdır. Bu durum, yüksek kalite standartları ile sertifikasyon gereksinimlerinden doğmaktadır.

Reaktör tasarımlarını pazarlayan ve mühendislik, tedarik ve yapım anlaşmaları gerçekleştiren tedarikçiler genellikle ihtiyaç duydukları ekipmanların tedariği açısından küresel kaynaklara bağımlıdır. Üretici firmalar ise çoğunlukla tedarikçi firmaların veya nükleer güç santrali operatörlerinin bulunduğu ülkelerde konumlanmışlardır. Nükleer sanayinin tarihsel gelişimi boyunca Kanada, Fransa, Almanya, Japonya, Rusya, Güney Kore, İsveç ve ABD gibi ülkeler kendi tedarikçilerini oluşturmuştur. Hitachi, Mitsubishi, Toshiba (Japonya), Rosatom (Rusya Federasyonu), KEPCO (Güney Kore), ASEA-Atom, AECL (Kanada), SNPC (Çin), Framatome, Areva (Fransa), KWU, Siemens (Almanya), ABB (İsveç), General Electric ve Westinghouse (ABD) küresel nükleer sanayiindeki ana oyuncular olmuştur. Framatome, KWU, Siemens ve ASEA-Atom ise artık piyasadan çekilmiştir.

Çekya ve İspanya gibi ülkelerin oluşturduğu ikinci bir gruptan da bahsetmek mümkündür. Bu ülkelerde, nükleer güç santralleri yabancı tedarikçiler tarafından inşa edilmiştir. Ancak, nükleer ağır ekipman imalatı için gerekli altyapı ise, nükleer endüstriyi desteklemek üzere bu ülkelerde geliştirilmiştir. Öte yandan, İtalya gibi kimi ülkelerde nükleer enerjiden yararlanılmamasına rağmen, nükleer endüstri yabancı tedarikçilere üretim sağlamak amacıyla oldukça gelişmiştir.

Nükleer pazarda pek çok fırsat mevcuttur. Bunlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- İnşaat ve montaj
- Çelik dövme ve boru işleri
- Yedek parça temini
- Bakım ve onarım faaliyetleri
- Sarf malzemeleri temini

Türkiye gibi yeni bir yapı ile nükleer enerji sektörüne giren ülkelerde mevcut altyapı ve şirketlerin nükleer pazar için hazır olma ihtimali yoktur. Bunun nedeni, alana özel ihtiyaç ve gereksinimlerin olmasıdır. Tüm şirketlerin gelişmiş ve yeterli kalite yönetim sistemine sahip olmaları beklenmektedir. Faaliyet alanına bağlı olarak güçlü tasarım kabiliyeti ve özel üretim altyapısı da gerekmektedir. Ayrıca, yüksek basınç altında çalışan emniyete ilişkin ekipmanların üretimi için belgelendirme şarttır. Genel olarak kazan, basınçlı kap ve borular için imalat firmalarının ASME (ABD), RCCM (Fransa) ve GOST (Rusya) sertifikalarına sahip olması gerekmektedir. Benzer şekilde, elektrikli ve elektronik cihazlar için RCCE sertifikası geliştirilmiştir. Bu sertifikalar imalat sistemlerinin sertifikalandırılması için kullanılmaktadır. Öte yandan Rus sertifika sistemi olan GOST da ürünün sertifikasyonunda kullanılmaktadır. Maalesef, Türkiye gibi sektöre yeni giren ülkelerde bu sertifikalara sahip aktör sayısı oldukça sınırlıdır, zira bu sertifikaların alınması uzman personel gerektiren, pahalı ve zaman alan süreçlerdir. Bu nedenle, piyasaya girmek isteyen şirketler öncelikle stratejik bir plan geliştirmeli, gerekli finansman ve insan kaynağını tahsis etmelidir. Ön çalışmaların önemli bir kısmı, hangi ürünler üzerinde yoğunlaşılacağına karar vermek için boşluk ve piyasa analizlerinin yapılmasını kapsamaktadır. Bu tür çalışmalar, sistemi rekabetçi hale getirmek için gerekli özel ekipmanların ve ek yatırımların belirlenmesine yardımcı olacaktır.

Ayrıca, şirketler nükleer teknoloji alanında deneyim eksikliği nedeniyle de pazara girmeye hazır olmayabilir. Bu sebeple yerli şirketlerin birçok durumda tecrübeli yabancı şirketler ile ortaklık kurması faydalı bir adım olacak ve şirketlerin görünürlüğüne katkıda bulunacaktır. Süreci hızlandırmak için kullanılacak diğer bir araç de teknoloji transferidir. Bu ise ancak pazarda önemli tecrübe ve pay sahibi yabancı şirketlerle anlaşma yapılarak gerçekleştirilir.

Şirketlerin pazara girme kabiliyetlerini artıran başka bir strateji ise iş kümelerinin oluşturulmasıdır. Bu aynı zamanda şirketlerin birbirlerini tamamlayıcı tedarik zincirleri oluşturmasını teşvik edecektir.

Nükleer endüstrinin geliştirilmesine yönelik çabalar uzun vadede önem arz etmektedir. Böylece yerli tesisler için mal ve hizmet tedariği sağlanırken diğer ülkelere de ihracat potansiyeli ortaya çıkacaktır. Geleceğe yönelik başka bir fırsat ise ülkelerin kendi nükleer reaktörlerini tasarlama yeteneğini destekleyerek sonunda reaktör satıcısı konumuna gelmesidir. Güney Kore hükümeti bu yolda ilerleyen ülkelerdendir. 1970'lerden itibaren Güney Kore'de 24 GWe kurulu güce sahip 25 reaktör inşa edilmiştir. Ülke, günümüzde elektriğinin üçte birini bu nükleer güç santralleri ile üretmektedir. Güney Kore nükleer alanda ilk adımı ABD Combustion Engineering ile teknoloji transferi anlaşması yaparak atmış ve nükleer enerji teknolojisinin %95'i 1995'e kadar yerleştirilmiştir. Yakın zaman önce KEPCO, Birleşik Arap Emirlikleri'nde dört adet APR-1400 inşa etmek üzere bir Mühendislik, Tedarik, İnşaat (EPC) sözleşmesi imzalamıştır. Anahtar teslim sözleşme bedeli yaklaşık 20 milyar ABD doları değerinde olan projede ilk reaktörün 2017'de hizmete alınması beklenmektedir. Ayrıca Güney Kore'nin Küçük Modüler Reaktör (SMR) tasarlama çabası da vardır. Bu reaktörün enerji üretimi ve tuzdan arındırma için Orta Doğu ve Kuzey Afrika ülkelerine ihraç edilmesi düşünülmektedir. Güney Kore örneği, nükleer programların gelişimi adına güzel bir örnektir.

İşe yabancıların yaptığı nükleer güç santrallerinin tasarım ve üretim prosedürlerini öğrenerek başlayan Güney Kore, nükleer teknoloji geliştiren ülkeler arasındaki yerini almıştır. Güney Kore'deki ilk nükleer güç santrali 1977'de hizmete alınmıştır. Yoğun bir nükleer enerji programının geliştirilmesinin arkasında yatan fikir, enerji üretiminin dış ithalata olan yüksek bağımlılığını en aza indirmek olmuştur.

İspanya, nükleer üretim kapasitesine sahip, ancak herhangi bir ulusal tedarikçi firması olmayan bir ülkedir. Öte yandan ülkede nükleer endüstriyi destekleyen nükleer üretim ve hizmet altyapısı gelişmiş vaziyettedir. İspanya şu anda 6 nükleer güç santralindeki 8 reaktörle nükleer elektrik üretmektedir. Nükleerin toplam kurulu kapasitesi 7864 MWe'dir. Bu ülkenin toplam kapasitesinin %7,3'üne denk gelmektedir. Elektrik üretimi bakımından nükleer enerji 2014 yılında 57.304 GWh ile toplam üretimin %20,5'ini karşılamıştır. Bu sayede 30 ila 40 milyon tonluk CO₂ emisyonu önlenmiştir. Ayrıca yılda 100 milyon varil petrol ithalatının önüne geçilmiştir.

İspanyol nükleer endüstri firmaları ağır ekipman imalatı ile nükleer yakıt demetleri konusunda uzmanlaşmıştır. Ülkede ayrıca düşük ve orta seviyeli atık teknolojileri de gelişmiştir. Dahası, İspanya nükleer sanayiye mühendislik ve hizmet sektörlerinde katkı sağlamaktadır. İspanyol nükleer endüstrisi yaklaşık olarak 30.000 kişi istihdam etmektedir.

İspanyol şirketleri, buhar jeneratörleri, türbin jeneratörleri, valfler, borular, vinçler ve yakıt deposu gibi önemli nükleer ekipman ve bileşenleri üretmek için gerekli teknolojik kapasite ve uzmanlığa sahiptir. Ülke 100'den fazla buhar jeneratörü imal etmiş ve bunların %80'ini ihraç etmiştir.



Şekil 37: Nükleer Ağır Ekipman İmalatı [64]

7.5. Bölgesel Ekonomi

NGS inşası, bölgesel ekonomi üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Gayrisafı yurtiçi hasıla (GSYH) artışına ek olarak, net vergi gelirleri de belirgin oranda yükselmektedir. Devlet gelirlerine ek olarak, nükleer güç santrali başına 2.000'den fazla yüksek ücretli ve nitelikli personel ile uzmanın istihdamı, bölgesel ekonomi üzerinde önemli etkiye sahip olup çalışanlar ile beraber onlarla ilişkili kişiler de göz önünde bulundurulduğunda santrallerden yararlanan geniş bir topluluk ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, santrallerin yerel topluluk için 1.300 ek iş yaratması beklenmektedir. Kamu binaları, oteller, okullar, eğitim merkezleri ve hastaneler gibi kamu tesislerinin kurulması da bölgesel ekonomide olumlu bir etkiye sahip olacaktır. Genel anlamda kamu hizmeti sağlayan şirketlerin gerekli tüm altyapının kurulumuna yardımcı olması beklenmektedir. Bütün bu eylemler, daha güçlü bir yerel ekonomiyi teşvik etmeye yardımcı olacaktır.

Toplamda 10.000'den fazla işçi nükleer güç santral inşaatının farklı aşamalarında yer alacaktır. Bu işçilerin önemli bir kısmı yerli iş gücü arasından seçilmekte ve projede istihdam için uygun eğitimi almaktadır. Nükleer alanda alınan bu eğitim faaliyetleri bu insanların yetkinliklerini güçlendirirken gelecekte istihdam bulmalarına da yardımcı olmaktadır. İnşaat ve işletme

aşamalarındaki ortalama maaşların da diğer sektörlerde göre nispeten daha yüksek olduğu gözlenmektedir.

Nükleer enerjinin ulusal şebekeye eklenmesi, ülke içerisindeki elektrik fiyatlarının istikrarına katkıda bulunmaktadır. Eğer bir ülkenin Türkiye'de olduğu gibi yedek enerji kapasitesi yoksa enerji talebindeki hızlı değişimler anlık olarak elektrik fiyatlarını önemli derecede etkileyecektir. Son yıllarda da görüldüğü üzere Türkiye'de elektrik fiyatlarında oldukça belirgin artışlar yaşanmıştır. Bu durum özellikle bölgesel koşullar nedeniyle yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminde çoğunlukla önceden tahmin edilemeyen elektrik eksikliklerinden kaynaklanmaktadır. Bölgesel koşullar (iklim vb.) nedeniyle artan enerji talebi, kamu hizmeti sağlayan şirketler tarafından makul maliyetlerle sağlanamamaktadır. Bu sorunun çözümü, nükleer enerji de dahil olmak üzere elektrik üretiminde taban yük kapasitesini artırmaktır. Böylece elektrik fiyatları daha öngörülebilir seviyelerde tutulabilecektir. Ayrıca nükleer enerji kullanan birçok ülkede nükleer elektrik üretimi maliyeti, diğer yöntemlerle rekabet etme gücüne sahiptir. Bu durum, aynı zamanda piyasadaki elektrik fiyatlarındaki düşüşü de etkilemektedir.

7.6. İhracat Kabiliyeti

Nükleer sanayinin kurulması, sektöre yeni giren ülkeler için uzun ve zorlu bir süreçtir. Bununla birlikte, sanayi nükleer alanda üretim yapmaya ve hizmet sağlamaya başladıktan sonra öncelik görünürlüğün artırılması olmalıdır. Nükleer endüstrideki aktörler rekabetçi fiyatlarla kaliteli üretime geçtiğinde uluslararası pazara girmenin zorlu bir süreç olmayacağı değerlendirilmektedir.

Nükleer sanayideki satıcı ve inşaat şirketlerinin sadece kalite ve fiyatlarla ilgilenmediğini, tedarikçilerinden çevre ve nükleer güvenlik konularında bilinçli olmalarını beklediğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle, tedarikçilerin sahip olduğu tüm iş gücünün çevre yönetimi ve nükleer güvenlik kültürü eğitimlerinden geçmesi gerekir.

Nükleer enerji sektörüne girmeyi düşünen şirketler yalnızca yerel pazara odaklanmamalıdır. Bu şirketler gerekli kabiliyetleri geliştirmelerinin ardından küresel pazarda rekabet edebileceklerdir. Geleceğe dönük nükleer güç santrali inşaatı projelerine bakıldığında bölgede yeni nükleer santraller inşa etmeyi planlayan bir dizi ülkenin bulunduğu görülecektir. Ürdün, Suudi Arabistan ve Mısır bunlardan sadece birkaçıdır. Bu ülkelerdeki mevcut sanayi altyapısı göz önünde bulundurulduğunda satıcı firmaların ekipman ve mallarını diğer ülkelere tedarik etmeleri beklenmektedir. Bu nedenle, kalite ve fiyatlandırma stratejisi Türk firmalarını aday konumuna yükseltecektir.

Güney Kore, tam ölçekli teknoloji geliştirme, araştırma ve güç reaktörlerini diğer ülkelere ihraç etme konusunda birincil örnektir. Bu projeler, Güney Kore'nin uzun vadede bu ülkelerdeki faaliyetlerini desteklemeye devam etmesini

güvence altına almaktadır. Güney Kore kendi reaktör teknolojilerini sektöre yeni giren ülkelere aktif olarak pazarlamaktadır. Pazarda Rusya, Çin ve Güney Kore arasında güçlü bir rekabet bulunmaktadır. Fransa, Japonya ve ABD gibi gelişmiş nükleer teknolojiye sahip ülkelerdeki tedarikçiler de devam etmekte olan projelerde aktif roller almaktadırlar.

İspanya nükleer firmaları çalışmalarını 25 ülkede sürdürmekte, ürettikleri mal ve hizmetlerin %70'ini ihraç etmektedir. Bu firmalar, yirmiden fazla ülkede nükleer güç santrallerinin işletme ve bakım çalışmalarını yürütmektedir. İspanyol firmaları 1985 yılından beri nükleer yakıt demeti imal etmekte ve günümüzde toplam üretimlerinin %65'inden fazlası ihraç edilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, ülkede üretilen buhar jeneratörlerinin %89'undan fazlası ihraç edilmektedir. Mühendislik ve hizmet şirketleri de yıllık üretiminin %60'ını ihraç etmiştir.





SONUÇ

8. Sonuç

Günümüzde 31 ülkede kullanımda olan 449 nükleer reaktör tarafından elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Toplamda dünyada kullanılan elektriğin %11'i nükleer enerjiden üretilmekte ve 2030 itibarıyla IAEA tarafından beklenen enerji üretimindeki büyüme oranı %17 ile %94 arasındadır. Dünya nüfusunun ve sanayileşmedeki artışın sonucunda yükselen enerji talebini karşılamak için birçok ülke nükleer enerji kullanımını kaçınılmaz olarak görmektedir. Bununla birlikte, nükleer enerji kullanım riskleri ve avantajları ile her zaman tartışmalı bir konu olarak gündeme gelmiştir. Büyük kurulu nükleer kapasiteye sahip kimi Avrupa ülkeleri nükleer programlarını kararlılıkla sürdürürken kimi ülkeler de yeni projeleri sınırlamaktadır. Yaşanan nükleer kazalar nedeniyle nükleer enerjiye olan güveni kırılan bazı ülkeler denetim nedeniyle faaliyetlerini duraklatsa da programların ilerleyen dönemlerde tekrar başlatılacağı düşünülmektedir. Uzak Doğu, Orta Doğu ve Doğu Avrupa bölgelerindeki bazı ülkeler, yeni nükleer santral yatırımlarına başlamayı planlamaktadır. Bu bölgelerde, projelendirilen 60 reaktörden 53'ü kurulum aşamasında olup 164 reaktörden 135'i de planlama aşamasındadır. Bu ülkeler arasında yer alan Türkiye de önümüzdeki on yıl içerisinde gerçekleştirmek üzere üç nükleer proje planlamaktadır.

Nükleer reaktör teknolojisi sürekli bir evrim içerisinde. Günümüze kadar geliştirilen çeşitli reaktör tasarımları mevcuttur ve bunların en çok kullanılanları PWR ve BWR'lerdir. Yeni geliştirilen tasarımlar daha düşük maliyetli ve daha basit tasarım özellikleriyle geliştirilmektedir. Yakıt verimliliği ve güvenlik, bu gelişmiş reaktör tasarımlarının sağlayacağı diğer avantajlardandır.

Elektrik tüketim tahminlerine göre önümüzdeki 20 yıl içerisinde talebin iki katından daha fazla artması beklenmektedir, bu nedenle artan talebi

karşılama üzere elektrik üretiminde yeni bir planlama yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik üretiminde kömür, 2014 Dünya Kalkınma Göstergeleri'ne göre %38'lik payıyla birinci sırada yer almaktadır. Türkiye Cumhuriyeti hükümeti, enerji kaynaklarının çeşitliliğini artırmak için yenilenebilir enerjinin payını artırmaya karar vermiştir. Bununla birlikte, yerli kömür kullanımına dair önemli miktarda büyük çaplı kapasite geliştirme planları mevcuttur. Yeni inşa edilen nükleer güç santrali projelerinin entegrasyonu Türkiye'nin enerji portföyünü çeşitlendirerek ithal enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltacaktır. Özellikle çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerji kaynakları ciddi önem arz etmektedir, ancak kömür ve nükleer enerjinin kapasite faktörleri güneş ve rüzgâr enerjisi gibi diğer yenilenebilir kaynaklardan çok daha yüksektir. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilecek elektrik enerjisinin kömür yakıtlı veya nükleer santrallerden elde edilecek elektrik enerjisi kapasitesine yetişebilmesi için kurulacak kapasitenin çok yüksek olması gerekmektedir. Bu da, yenilenebilir kaynaklar alanında yatırım maliyetini büyük oranda artırmaktadır.

Nükleer enerjinin, 1950'lerden beri Türkiye'nin gündeminde olmasına rağmen şimdiki dek somut adımlar atılmaması, nükleer teknolojinin ülkemizde gelişmemesindeki en büyük etmenlerdendir. Uzun yıllar içerisinde farklı ülkelerle yapılan birçok görüşmeden sonra iki nükleer güç santrali projesinin başlanmasına çok yaklaşılmıştır. Elektrik üretiminde kaynak çeşitliliğini artırmak ve doğal gaz gibi ithal enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltmak için Türkiye Cumhuriyeti hükümeti nükleer enerji programları geliştirmeye karar vermiştir. NGS girişimleri için hükümetin bir diğer motivasyonu da santraller için gerekli yerli tedarik zincirini geliştirerek yerel ve ulusal ekonominin büyümesine katkıda bulunmaktır. Bu nükleer tedarik zincirinin, Türkiye

ekonomisinde ek istihdam yaratması ve brüt katma değeri artırması beklenmektedir. Yerli sanayinin katılımını artırmak ve küresel nükleer pazarda rekabetçi aktörler haline gelmek üzere gerekli becerileri geliştirmek yerli tedarikçiler için çok önemli bir fırsat olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, hükümet daha büyük yerli katılımı üçüncü nükleer güç santralini kurma ve kendi çabalarıyla reaktör tasarlama niyetindedir.

Nitelikli iş gücüyle yerli sanayi katılımının iyileştirilmesi aşamalı bir süreçtir. Bu süreçte gerekli finansman ve insan kaynağını tahsis etmekle birlikte stratejik plan ve yol haritaları hazırlamak devletin sorumluluğundadır. Nükleer alanda bir değer zinciri oluşturmak gerçekten faydalı bir adımdır. Nükleer endüstride hizmet ve ürünler diğer sektörlere kıyasla oldukça pahalı olması bu sektörü cazip kılan bir faktördür. Öte yandan, yüksek kalite standartları, sertifikasyon ve nitelikli iş gücü gereksinimleri, şirketler için zorluk teşkil eden ana unsurlardır. Türk şirketlerinin mevcut teknoloji düzeyi ile bu alanda gerekli teknoloji seviyesi arasındaki açığı belirlemek amacıyla, T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) denetiminde ihtiyaç analizi, fizibilite ve yerelleştirme çalışmaları için çeşitli projeler yürütülmektedir. Açık belirlendikten sonra Türk şirketlerinin nükleer endüstrideki katılımını azami düzeye çıkarmak ve bu açığı kapatmak için bir Eylem Planı hazırlanacaktır. Bu plan sertifikalandırma ve standartlara hazırlık, yeni nükleer eğitim merkezleri kurma, yeni ekipman temini, laboratuvar yatırımları, vb. hususları içermesi öngörülmektedir. Bu planın içerisinde yer alacak bazı hedefler Türk firmaları için büyük çaplı yatırımlar gerektirebilecektir. Ancak firmalar, yapacakları yatırımların gelecekteki finansal açıdan muhtemel geri dönüşünü bilmeden bu çapta yatırımlar yapma konusunda çekimser kalabilirler. Dolayısıyla, devlet, nükleer kalkınma ve yerelleştirme için Ulusal Politika (faaliyet alanı, yerlilik oranı, takvim, gerekli kapasite geliştirme çalışmaları ve teşvikler) ve uzun vadeli düşük faizli krediler ile vergi teşviki gibi mali destekler için güçlü ve istikrarlı bir taahhütte bulunmalıdır.

Devlet tarafından sağlanan gerekli teşviklerin yerli sanayiye güçlendireceği değerlendirilmektedir. Nükleer kümelerin oluşumu da, uluslararası rekabet edebilecek tedarik zincirlerinin gelişmesi için gereklidir. Fransız PNB, İspanyol Cantabria ve Çek Atomex Grubu, üye şirketleri ortak bir yapıya sahip olan, düşük maliyetle kaliteli üretim hedefleyen, ortak eğitim ve sertifikalandırma faaliyetleri düzenleyen kümelere örnektir. Bu yapı, küresel olarak rekabet edebilmek açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

İster ekipman imalatı ister enerji santralini inşası veya reaktörün faaliyete geçirilmesi olsun güvenlik, nükleer saha faaliyetlerindeki en önemli kaygı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, nükleer alandaki faaliyetlerde görev alacak insan kaynağının son derece nitelikli, eğitilmiş ve uzmanlaşmış olmasını gerektirir. Nükleer enerji endüstrisi sıkı düzenlemelere tabidir ve şirketleri yetkin insan kaynağı kullanmaya zorlar. Nükleer enerji teknolojisi birçok bilim ve mühendislik alanını kapsamaktadır ve nükleer enerji alanından elde edilecek bilgi birikimi ile tecrübe havacılık ve savunma gibi birçok sektöre aktarılabilir. Nükleer endüstrinin çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda, kapsamlı eğitim programlarının geliştirilmesinin önemi kolaylıkla görülmektedir. Bu durum, şirketlerin uluslararası pazara katılırken sahip oldukları vizyon ve rekabet gücünü iyileştirecektir. Nükleer enerji endüstrisinde yer alan birçok ülkede iyi uygulama örnekleri mevcuttur. Fransa'daki I2EN ve İngiltere'deki NSA bu tür kuruluşlara örnek gösterilebilir. Nükleer güç santrallerinin inşası, birimlerin sayısına bağlı olarak beş ila on iki yıl sürmektedir. Tek bir reaktörün inşası esnasında, en yoğun dönemde 3.500 kişinin istihdam edilmesi tasarlanmaktadır. Akkuyu projesini gerçekleştiren şirkete göre, nükleer santral kurulumunun en yoğun döneminde 12.500 işçinin istihdam edileceği öngörülmektedir. Türkiye ve BAE gibi nükleer enerji sektörüne yeni giriş yapan ülkelerin nükleer enerji stratejilerini tanımlarken insan kaynakları gelişimi merkezi önem atfedilmesi gereken bir husustur. Bununla

birlikte, en önemli aktör hükümetlerdir. Nükleer enerji ile ilgili iş fırsatlarına olan ilgiyi artırmak için gerekli düzenlemeleri hazırlayıp eğitim ve öğretim faaliyetlerini teşvik etmek hükümetlerin sorumluluğundadır.

Nükleer enerjinin getirdiği fayda ve riskler doğası gereği halkın hem ilgisini çekmiş hem de tartışmalara yol açmıştır. Türkiye'deki birçok kişi nükleer güç karşıtı olmakla beraber santralleri tehlikeli ve zararlı olarak görmektedir. Çernobil ve Fukushima'da meydana gelen radyoaktif kazalardan ötürü haklı olarak nükleer güç santrallerinin insan yaşamını ve çevreyi tehdit ettiği düşünülmektedir. Ancak Türkiye'nin halihazırda Ermenistan, Bulgaristan, Ukrayna ve Romanya gibi ülkelerdeki nükleer santrallerle çevrelendiğinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Ermenistan ve Bulgaristan'daki santraller, Türk sınırına oldukça yakındır. Nükleer enerji karşıtları, çözülmemiş atık bertaraf sorunlarının, yayılma tehdidi, nispeten yüksek yatırım maliyeti ve finansman gereksinimlerinin, nükleer santrallerin diğer dezavantajlı ve tehlikeli özellikleri olduğunu savunmaktadırlar. Halkın bilinçlendirilmesi ve nükleer enerjinin gerçekten ne olduğunun, hayatımızda hangi alanlarda kullanıldığının, NGS'lerin günlük hayatımızdaki birçok unsurdan daha az tehlike içerdiğinin devlet tarafından hazırlanacak programlar dahilinde anlatılması gerekmektedir.

Nükleer enerjinin diğer enerji kaynaklarına karşı en önemli avantajı düşük karbon salınımlı bir teknoloji olması ile rekabetçi üretim maliyetleridir. Günümüzde küresel ısınmanın yavaşlatılması için sera gazı salınımlarının olabilecek en düşük seviyelerde tutulması amacıyla artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla çevre dostu enerji kaynaklarına eğilim artmaktadır. Düşük sera gazı salınımı ile çevre dostu bir teknoloji olan nükleer santrallerden de kaynaklanan radyoaktif salınımlar mevcuttur, ancak bunlar sıkı düzenlemelere tabidir ve bu salınımlar insan sağlığına yönelik risk yaratabilecek seviyelerin altında tutulmaktadır. Bu düzenlemeler,

çevreye yönelik herhangi bir endişeye mahal vermeden nükleer enerjinin güvenli ve güvenilir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Nükleer enerjinin en önemli avantajlarından bir tanesi de üretim maliyetlerinde istikrarın sağlanarak pazar fiyatlarından bağımsız fiyatlandırma sunabilmesidir. Türkiye'de olduğu gibi bir ülkenin üretim kapasitesi bulunmuyorsa enerji talebindeki hızlı değişimler anlık olarak elektrik fiyatlarını önemli derecede etkileyecektir. Bu nedenle, kurulması planlanan iki NGS'nin Türkiye elektrik piyasası fiyatlarını belirgin oranda düşürmesi beklenmektedir.

Enerji kaynakları ile yürütülen neredeyse tüm faaliyetler, sera etkisiyle sonuçlanan emisyonların atmosfere salınmasına veya ozon tabakasının delinmesine neden olmaktadır. Termik santraller, küresel ısınma ve iklim değişikliğinde rol oynayan en büyük aktörlerdir. Küresel ısınma çevre için önemli bir tehdit unsuru teşkil ettiği için, Avrupa ülkeleri çoğunlukla termik santrallerini sınırlandırma ve çevreye zararlı salınımları sınırlama yoluna gitmeyi planlamaktadır. Bazı ülkeler yenilenebilir kaynakları desteklerken Çin, Hindistan ve ABD gibi kimi ülkeler nükleer enerjiyi yenilenebilir kaynaklara ek bir seçenek olarak görmektedir. Sonuç olarak yenilenebilir ve nükleer enerji kullanımlarında görece belirgin artışlar beklenmektedir. Ancak doğal kaynaklar ve mevcut altyapı düşünüldüğünde kömür ve doğal gaz gelecekte de önemli enerji kaynakları olmaya devam edecektir.

NGS'lerin inşası, bölgesel ekonomi üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Devlet gelirlerine ek olarak, nükleer güç santrali başına 2.000'den fazla yüksek ücretli ve nitelikli personel ile uzmanın istihdamı, bölgesel ekonomi üzerinde önemli katkı yaratacak ve personel ile beraber ilişkili kişiler de göz önünde bulundurulduğunda santrallerden yararlanılan geniş bir topluluk olacaktır. Genel olarak, santrallerin yerli halk için 1.300 ek iş yaratması beklenmektedir. 10.000'den fazla işçi nükleer güç santral inşasının farklı aşamalarında yer alacaktır.

Nükleer enerji alanına yatırım yapma kararı aşamasında güvenlik, potansiyel kazalar, kullanılmış yakıtların depolanması, radyoaktif atık bertarafı, yüksek yatırım maliyeti ve finansman gereksinimleri gibi diğer konuların da dikkate alınması önem arz etmektedir. Ulusal düzenleyici kurumlar tarafından etkin bir şekilde kontrol edilmemeleri ve denetlenmemeleri halinde nükleer güç santralleri daha önce meydana gelen trajik olaylardaki gibi tehlikeler doğurabilir. Santralin kurulacağı yerin seçiminden başlayarak, ekipman imalatı, santral inşası ve işletimi sırasında gerekli düzenleme ve güvenlik denetimleri sürekli olarak gerçekleştirilmelidir. Atık yönetimi, nükleer kazalardan sonra en çok kaygı doğuran ikinci husustur. Yüksek seviyeli atıklar özel işlem ve izolasyon gerektirmektedir. Hacimlerinin küçüklüğüne rağmen bu atıklar toplam radyoaktivitenin %99'una sahiptir. Kullanılmış yakıtlar için doğrudan bertaraf ve yeniden işleme olmak üzere iki seçenek mevcuttur. Çoğu ülkede, nükleer tesisleri denetleyen, radyoaktif atık bertarafı için ilgili kriterler ve düzenlemeleri belirleyen çeşitli kuruluşlar yapılandırılmıştır. Radyoaktif atıkların depolandığı geçici ve nihai depolama tesisleri sıkı kontrollere tabi olup istenmeyen sonuçları önlemek için içerdikleri radyoaktivitenin çevreye yayılması engellenmektedir.

Nükleer alanına özel ihtiyaç ve gereksinimler nedeniyle, Türkiye gibi nükleer enerji sektörüne yeni giren ülkelerde mevcut altyapının ve yerli firmaların nükleer pazar için hazır olma ihtimali yoktur. Bu alanda faaliyet gösterecek tüm firmaların gelişmiş ve yeterli kalite yönetim sistemine sahip olmaları beklenmektedir. Çalışma alanına bağlı olarak güçlü tasarım kabiliyeti ve alana özel üretim altyapısı da gerekmektedir. Maalesef Türkiye gibi sektöre yeni giren ülkelerde üretim ve ekipman sertifikalarına sahip firma sayısı oldukça sınırlıdır, zira bu sertifikaların alınması pahalı, nitelikli iş gücü gerektiren ve

zaman alan süreçlerdir. Bu nedenle, nükleer pazarına girmek isteyen firmalar öncelikle stratejik bir plan geliştirmeli, gerekli finansman ve insan kaynağını tahsis etmelidir.

Ayrıca, firmalar nükleer teknoloji alanında deneyim eksikliği nedeniyle de pazara girmeye hazır olmayabilir. Bu sebeple, tecrübeli yabancı firmalar ile ortaklık kurulması faydalı bir adım olacak, yabancı firmaların rehberliği altında tecrübe kazanılmasını sağlayacak ve bu durum firmaların pazarda görünürlüğüne katkıda bulunacaktır. Süreci hızlandırmak için kullanılacak diğer bir araç da teknoloji transferidir. Bu ise ancak pazarda önemli tecrübe ve pay sahibi yabancı firmalarla anlaşma yaparak gerçekleştirilir. İşe yabancı firmaların yaptığı nükleer güç santralleri ile başlayan Güney Kore benimsediği strateji ile nükleer teknoloji geliştiren ülkeler arasındaki yerini almıştır. Yoğun bir nükleer enerji programının geliştirilmesinin arkasında yatan fikir, enerji üretiminin dış ithalata olan bağımlılığını en aza indirmektir. Güney Kore hükümeti, nükleer enerjiyi kullanmaya başladıklarından bu yana yerli nükleer sanayinin kurulmasını desteklemiş ve nihayetinde dünyadaki nükleer teknoloji geliştiren ülkelerden biri haline gelmiştir. Tecrübeli yabancı şirketlerle ortaklık kurma stratejisi Türk şirketlerin nükleer enerji üretimi faaliyetlerinde deneyim kazanmasına, kendilerini eğitip geliştirmelerine yardımcı olacak ve bu şekilde projelerdeki yerli katkı oranı artırılabilecektir.

Nükleer ile ilgili tartışmalar dünya genelinde sürmekte ve uzun yıllar sürmeye devam edecektir. Ancak gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde artan elektrik ihtiyacını karşılamak ve dış kaynaklara bağımlılığın en aza indirilmesi amacıyla yenilenebilir kaynaklara ek olarak nükleer enerjinin de ciddi bir biçimde ele alınıp, devletin uzun dönem enerji stratejisinde ana başlıklardan biri olmalıdır.



KAYNAKÇA

- [1] "McMaster Nuclear Reactor," Available: <https://mnr.mcmaster.ca/index.php/about/how-does-it-work>.
- [2] "Türkiye Atom Enerjisi Kurumu," 24 August 2010. Available: <http://www.taek.gov.tr/nukleer-guvenlik/nukleer-enerji-ve-reaktorler/166-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/436-bolum-02-nukleer-enerjinin-temel-prensipleri.html>.
- [3] "How Stuff Works," Available: <http://science.howstuffworks.com/inside-nuclear-power-plant-pictures.htm>.
- [4] "Areva," Available: <http://www.areva.com/EN/operations-4893/heavy-components-to-boost-performance.html#tab=tab5>.
- [5] "Wikipedia," Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pressurizer>.
- [6] "World Nuclear Association," February 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>.
- [7] U. D. o. Energy, "The History of Nuclear Energy".
- [8] "What is Nuclear," Available: https://whatisnuclear.com/articles/nuclear_timeline.html.
- [9] "The Huffington Post," 13 June 2012. Available: http://www.huffingtonpost.com/2012/06/13/timeline-nuclear-power-history-fukushima_n_1593278.html.
- [10] "U.S. Energy Information Administration," Available: https://www.eia.gov/kids/energy.cfm?page=tL_nuclear.
- [11] "World Nuclear Association," January 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>.
- [12] "2016 Key Energy World Statistics," International Energy Agency (IEA), 2016.
- [13] "World Nuclear Association," 1 January 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>.
- [14] "International Atomic Energy Agency," 19 February 2017. Available: <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>.
- [15] "World Nuclear Associations," 8 February 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>.
- [16] "Carbon Brief," 8 March 2016. Available: <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>.
- [17] "World Nuclear Association," February 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>.
- [18] "World Nuclear Association," September 2016. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>.
- [19] W. N. Association, "The Nuclear Fuel Cycle," Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>.
- [20] "World Nuclear Association," December 2016. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>.
- [21] "World Nuclear Association," July 2016. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>.
- [22] "Turkish Atomic Energy Authority," Available: <http://www.taek.gov.tr/en/institutional/affiliates/cekmece-nuclear-research-and-training-center.html>.
- [23] D. U. Adalıoğlu, "Enerji 2023 Derneği," 16 January 2009. Available: http://www.enerji2023.org/index.php?option=com_content&view=article&id=230:tuerkye-de-nuekleer-enerjinn-tarhces&catid=6:nuekleer&Itemid=156.
- [24] "World Nuclear Association," February 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/turkey.aspx>.
- [25] "https://en.wikipedia.org/wiki/Generation_IV_reactor,"
- [26] I. A. E. A. - P. R. I. System, "Operational & Long-Term Shutdown Reactors," Available: <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>.
- [27] W. N. Associations, "Nuclear Power Reactors," February 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>.
- [28] W. N. Associations, "Reactor Diagrams," 29 January 2016. Available: <http://www.world-nuclear.org/gallery/reactor-diagrams.aspx>.
- [29] T.A.F.K.A.S, "Saint-Laurent Nuclear Power Plant," Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Saint-laurent-nouan.JPG>.
- [30] "Wikipedia," Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cofrentes_Nuclear_Power_Plant#/media/File:Central_Nuclear_de_Cofrentes_-_panoramio_\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cofrentes_Nuclear_Power_Plant#/media/File:Central_Nuclear_de_Cofrentes_-_panoramio_(1).jpg).
- [31] "Wikipedia," 07 February 2017. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized_heavy-water_reactor.
- [32] "Wikipedia," March 2017. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_gas-cooled_reactor.
- [33] "IAEA Gas Cooled Reactors," March 2017. Available: <https://www.iaea.org/topics/gas-cooled-reactors>.
- [34] "Wikipedia," Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Torness_Nuclear_Power_Station_-_April_2016.jpg.
- [35] "Wikipedia," 15 March 2017. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/RBMK>.
- [36] "Wikipedia," Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Leningrad_Nuclear_Power_Plant#/media/File:RIAN_archive_305005_Leningrad_nuclear_power_plant.jpg.
- [37] "Wikipedia," Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Superph%C3%A9nix>.
- [38] "World Nuclear Association," January 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>.
- [39] "World Nuclear Association," July 2016. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>.
- [40] "IAEA," 03 March 2016. Available: <https://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/index.html>.
- [41] N. E. Agency, "Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment," OECD, France, 2016.
- [42] IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments," IAEA, Austria, 2014.
- [43] "World Nuclear Association," 17 March 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.
- [44] "International Atomic Energy Agency," Available: <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>.
- [45] J. Haney, Nuclear Energy, arrytown, N.Y., USA: Marshall Cavendish Co., 2012.
- [46] "Resources1," Available: <http://resources1.news.com.au/images/2011/03/13/1226020/656393-three-mile-island.jpg>.
- [47] "Thanhnien News," Available: <http://www.thanhniennews.com/world/the-chernobyl-disaster-61548.html>.
- [48] "Cryptome," March 2011. Available: <https://cryptome.org/eyeball/daiichi-npp/daiichi-photos.htm>.
- [49] N. OECD, "Physics and Safety of Transmutations Systems, A Status Report," OECD, PARIS, 2006.
- [50] "Wikipedia," Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Carso_Fuel_pool.jpg.
- [51] "World Nuclear Association," Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/storage-and-disposal-of-radioactive-wastes.aspx>.

- [52] "World Nuclear Association," March 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>.
- [53] I. A. E. Agency, "Computer Security at Nuclear Facilities," 2011.
- [54] P. B. C. W. D. Albright, "Did Stuxnet Take Out 1,000 Centrifuges at the Natanz Enrichment Plant?," Institute for Science and International Security, 2010.
- [55] "Wikipedia," Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Global_Warming_Predictions.png.
- [56] W. N. Association, "Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources, July 2011," 2011.
- [57] N. E. Agency, "Nuclear Power and Climate Change".
- [58] U. E. I. A. (EIA), "International Energy Outlook 2016," 2016.
- [59] N. a. O. IEA, "Projected Costs of Generating Electricity," 2015.
- [60] "World Nuclear Association," March 2017. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>.
- [61] I. A. Energy, "Managing Human Resources in the Field of Nuclear Energy," Vienna, 2009.
- [62] "Türkiye Elektrik İletim A.Ş.," Şubat 2017. Available: www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls.
- [63] "T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı," Available: <http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FE%2C4%B0GM%20Ana%20Rapor%2FT%2C3%BCrkiye%20Elektrik%20Enerjisi%20Talep%20Projeksiyonu%20Raporu.pdf>.
- [64] "Izhorskiye Zavody OMZ Grup," Available: http://omz-izhora.com/press-center/gallery/index.php?PAGE_NAME=section&SECTION_ID=279.



STM

www.stm.com.tr

[in](#) [t](#) [v](#) [f](#) /STMDefence

