

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TÜRKİYE’DE KURULMASI PLANLANAN NÜKLEER
SANTRALLERDE KULLANILACAK NÜKLEER YAKITLARIN
VE ATIKLARIN TEKNOEKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet POLATOĞLU
(141135102)**

**Bölüm: Enerji Sistemleri Mühendisliği
Anabilim Dalı: Yenilenebilir Enerji Sistemleri**

Danışman: Doç. Dr. Hikmet ESEN

KASIM-2016

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE'DE KURULMASI PLANLANAN NÜKLEER SANTRALLERDE
KULLANILACAK NÜKLEER YAKITLARIN VE ATIKLARIN
TEKNOEKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet POLATOĞLU

(141135102)

Bu tez, 24/11/2016 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile başarılı / ~~başarısız~~ olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hikmet ESEN
Üye : Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ
Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdem IŞIK

A. ESEN
Resul Çötel
Erdem Işık

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ___/___/2016 tarih ve ___ sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda ve akademik hayatımda desteğini benden esirgemeyen yüksek lisans tez danışmanı hocam Doç. Dr. Hikmet ESEN'e, tecrübeleriyle çalışmalarımda bana yol gösteren kıymetli arkadaşım Arş. Gör. Enes GÜL'e ve manevi desteği için değerli eşime teşekkür ederim.

Ahmet POLATOĞLU
ELAZIĞ, 2016



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VII
KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
2. NÜKLEER ENERJİ VE TEMEL KAVRAMLARI	3
2.1. Nükleer Enerjinin Temelleri	3
2.2. Atom Parçacıkları	5
2.2.1. İzotop Atomlar	5
2.2.2. Fisil ve Fertil İzotoplar	6
2.3. Radyasyon ve Yarılanma Ömrü	7
2.4. Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği	8
2.5. Nükleer Tepkimeler	10
2.6. Nükleer Reaktörler	12
2.6.1. Nükleer Reaktör Türleri	12
2.6.2. Nükleer Reaktörün Ana Bileşenleri	16
2.6.3. Nükleer Santrallerin Çalışma Prensibi	17
2.6.4. Nükleer Reaktörlerin Gelişim Süreci	19
2.7. Dünyada ve Türkiye’de Enerji İstatistikleri ve Nükleer Enerji	21
2.7.1. Dünyanın Enerji Durumu	21
2.7.2. Türkiye’nin Enerji Durumu	25
3. NÜKLEER YAKITLAR, ÇEVİRİMLER VE ATIKLAR	27
3.1. Nükleer Yakıt Olarak Kullanılan Elementler	27
3.1.1. Uranyum	27
3.1.2. Plütonyum	32
3.1.3. Toryum	33
3.2. Nükleer Yakıt Çevrimi	36

3.2.1.	Uranyum Madenciliği, Arıtma ve Dönüştürme Tesisleri.....	38
3.2.2.	Dönüştürme ve Zenginleştirme Tesisleri	40
3.2.3.	Nükleer Yakıt Fabrikasyonu	43
3.3.	Kullanılmış Nükleer Yakıtlar (KNY) ve Atıklar.....	45
3.3.1.	Yeniden İşleme ve Kullanım (Reprocess &Recycle).....	45
3.3.2.	Atıkların Tasfiyesi.....	49
3.4.	Türkiye’de Nükleer Atık Yönetimi ve Geleceği	55
3.4.1.	Düşük ve Orta Seviyeli AtıklarınTasfiyesi	55
3.4.2.	Yüksek Aktiviteli Atıkların Tasfiyesi	56
3.5.	Yakıt Çevriminde Yeni Yaklaşımlar	59
4.	TÜRKİYE’DEKİ NÜKLEER ÇALIŞMALAR.....	60
4.1.	Nükleer Çalışmalarda Son Durum	60
4.2.	Mersin Akkuyu Nükleer Santrali	61
4.3.	VVER Reaktörleri	64
4.3.1.	İlk Dönem VVER’ler	65
4.3.2.	VVER-1200 Tasarımı ve Teknolojisi.....	66
4.4.	Sinop ve Planlanan Diğer Santraller	67
5.	NÜKLEER SANTRAL EKONOMİSİ VE MALİYETLERİ.....	71
5.1.	Dünya Nükleer Ekonomisi	71
5.2.	Mersin Akkuyu’nun Mali Analizi	75
5.2.1.	Akkuyu Santrali’nin Elektrik ve İlk Yatırım Maliyeti	75
5.2.2.	Akkuyu’nun Yakıt Maliyeti	76
5.2.3.	Akkuyu’nun Atık Maliyeti	76
5.2.4.	Akkuyu’nun İşletmeden Çıkarma Maliyetleri.....	77
6.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	78
	KAYNAKÇA	82
	EKLER.....	86
EK 1:	NÜKLEER ENERJİ TARİHİ KRONOLOJİSİ	86
EK 2:	NÜKLEER ENERJİ SÖZLÜĞÜ	89
EK 3:	DÜNYADAKİ NÜKLEER SANTRALLERDEN ÖRNEKLER	92
	ÖZGEÇMİŞ.....	94

ÖZET

Türkiye’de nükleer santral kurma çabalarının yaklaşık 50 yıllık bir geçmişi vardır fakat yasal çerçeve 2007 yılında 5710 numaralı kanunun kabulüyle oluşturulmuştur. Bu anlamda, kurulacak santralin türü, modeli ve kullanılacak yakıt ciddi anlamda önem arz etmektedir. Nükleer santral teknolojisinde henüz hiçbir tecrübesi olmayan Türkiye bu alanda daha gelişmiş ülkeleri takip etmek zorundadır. Nitekim Mersin Akkuyu mevkiine, bir Rus şirketi olan ROSATOM tarafından kurulacak santral Türkiye’nin ilk nükleer santrali olacaktır.

Nükleer atıklar ve bunların depolanması, nükleer santrallerde önemli olan diğer bir konudur. Nükleer santrallerden düşük ve yüksek seviyede atıklar çıkmaktadır. Düşük seviyeli atıklar kolaylıkla işlenir ve imha edilirler. Yüksek aktiviteli atıklar reaktör korundan çıkan kullanılmış yakıt demetleridir. Kullanılmış yakıtlar reaktör yakınındaki havuzlarda depolanır ve soğumaya bırakılırlar. Kullanılmış yakıtlar içerisinde %97 oranında nükleer yakıt açısından değerli madde barındırmaktadır. Kullanılmış nükleer yakıtlar için dünyada açık ve kapalı çevrim olmak üzere iki metot kullanılmaktadır. Açık çevrimde kullanılmış yakıtlar atık kabul edilir ve yeraltına gömülür. Kapalı çevrimde ise yanmış bu yakıtlar yeniden işlenerek değerli malzemeler ayrıştırılır. Arta kalan atık ise camlaştırılıp ardından yer altına gömülür. Ekonomik olduğu için dünyada en çok açık çevrim kullanılmaktadır. Kullanılmış yakıtlar uzun yıllar boyunca depolama havuzlarında bekletilebilir. Türkiye için en uygun olan yakıt çevrimi tez içerisinde tartışılmıştır.

Bu tez çalışmasında, Türkiye ve dünyadaki enerji durumu ile nükleer santraller hakkında genel ve güncel bilgiler verilmiş, Türkiye’deki nükleer çalışmalar karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiş; yakıtlar ve rezervlerinin kullanılabilirliği, maliyeti ve atıkların daha uygun yöntemlerle depolanmasına dair öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Türkiye, Nükleer, Yakıt, Atık, Depolama, Uranyum, Toryum, Rezerv, Güvenlik.

SUMMARY

THECNOECONOMICAL INVESTIGATION OF NUCLEAR FUEL AND NUCLEAR WASTE AT NUCLEAR POWER PLANTS THAT PLANNED TO ESTABLISH IN TURKEY

The efforts to build a nuclear power plant in Turkey has nearly 50 years of history, but the current legal framework was created in 2007 with the adoption of the law numbered 5710. So, the type, model and fuel of nuclear power plant have got very critical importance. Turkey has not any experience about nuclear power plant technology. Therefore, Turkey must follow the more advanced countries in the nuclear technology. Indeed, Turkey's first power plant in Mersin Akkuyu site to be built by a Russian company ROSATOM.

Another important issue of nuclear power plants is nuclear waste and its storage. Low and high activity level waste are occurred from nuclear power plant. Low level wastes are easily processed and liquidated. High activity level wastes are spent fuels that are stored in the pool near the reactor core and its allowed to cool. Spent fuels contain % 95 valuable materials for nuclear fuel. Two methods are used that open and closed cycle in the World for spent fuel storage. Spent fuels are accepted waste at open cycle and they are buried underground. But it is not a waste for closed cycle and then it is reprocessing and separated valuable materials. The remaining waste is firstly vitrified and then it is buried underground. Open cycle is generally used in the world because of lower cost. Spent fuels can be stored in the storage pool for many years. The most appropriate fuel cycle for Turkey has been discussed in the thesis.

This study provides general and current data about nuclear power plants and energy status of world and Turkey. Then nuclear programmes in Turkey are investigated in a comparative way. Finally, availability, cost and waste storage of fuel and reserves are investigated and then it is offered suggestions for more convenient methods.

Keywords: Turkey, Nuclear, Fuel, Waste, Storage, Uranium, Thorium, Reserve, Safety.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Zincirleme nükleer tepkime	4
Şekil 2.2. Atomun iç yapısı	5
Şekil 2.3. Fisyon tepkimesi	10
Şekil 2.4. Füzyon tepkimesi	11
Şekil 2.5. Dünya genelinde kullanılan reaktör türleri	15
Şekil 2.6. Nükleer reaktörlerin bölgelere göre dağılımı.....	15
Şekil 2.7. Yakıt peletleri ve yakıt çubuğu	16
Şekil 2.8. Tipik bir nötronun yutulma tepkimesi tesir kesiti	17
Şekil 2.9. PWR tipi reaktörün çalışma prensibi.	18
Şekil 2.10. Nükleer reaktörlerin gelişim süreci	19
Şekil 2.11. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....	21
Şekil 2.12. 2013 yılı dünyadaki birincil enerji kaynakları dağılımı.....	22
Şekil 2.13. 2014 yılı birincil enerji kaynaklarından dünya genelinde elektrik üretimi	22
Şekil 2.14. Tahmini dünya elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payları.....	23
Şekil 2.15. Türkiye’de kaynaklara göre elektrik üretimi 2015.....	25
Şekli 3.1. En yaygın bulunan uranyum cevheri – uraninite	28
Şekil 3.2. Uranyum madenlerinin ülkelere göre dağılımı	29
Şekil 3.3. Türkiye’deki uranyum ve toryum kaynakları	30
Şekil 3.4. Plütonyumun dönüşüm ve bozunum zinciri.....	32
Şekil 3.5. Kanada’nın hızlı üretken toryum reaktörü (MAPS).....	35
Şekli 3.6. LWR açık yakıt çevrimi (Tek geçişli).....	37
Şekil 3.7. LWR yeniden işleme (Kapalı çevrim)	38
Şekil 3.8. In situ Madenciligi	39
Şekil 3.9. Uranyum dönüşüm aşamaları.....	40
Şekil 3.10. Uranyumun doğal, yakıt ve yanmış halinin içeriği	41
Şekil 3.11. Merkezkaç ayrıştırma yöntemi.....	42
Şekil 3.12. 17x17 PWR nükleer yakıt demetleri	43
Şekil 3.13. VVER yakıt demeti	44
Şekil 3.14. Dünyanın en büyük nükleer atık geri kazanım tesisi, Fransa.....	46
Şekil 3.15. Kullanılmış yakıt taşıma kabı.....	47

Şekil 3.16. PUREX metoduyla nükleer yakıt yeniden işleme süreci	48
Şekil 3.17. Düşük seviyeli atıkların nihai depolanması.	49
Şekil 3.18. Kullanılmış yakıt havuzları çevresinde çalışan personel	51
Şekil 3.19. Kuru depolama tesisi.....	51
Şekil 3.20. Atıkların tasfiye yolları	52
Şekil 3.21. Nükleer santral ile termik santralden çıkan atıkların karşılaştırılması.....	52
Şekil 3.22. Tüm yönleriyle nükleer yakıt çevrimi.....	54
Şekil 3.23. VVER yakıt demeti	56
Şekil 3.24. Olimpik havuza yerleştirilecek yakıt demetleri (Temsili)	57
Şekil 4.1. Mersin Akkuyu nükleer santrali 3D çizimi.....	63
Şekil 4.2. Akkuyu nükleer santrali'nin kurulacağı bölge.....	64
Şekil 4.3. VVER'lerin gelişim süreçleri.....	64
Şekil 4.4. VVER 440/213 modeli.....	65
Şekil 4.5. Sinop nükleer santralinin kurulacağı bölge.....	68
Şekil 4.6. İğneada nükleer santral sahası.....	68
Şekil 4.7. Çin'de kurulmakta olan AP1000 reaktörü	69
Şekil 4.8. CAP1400 tasarımı	70
Şekil 5.1. Nükleer santralin maliyet oranları dağılımı.	74
Şekil 5.2. Nükleer elektrik üretim maliyetlerini oluşturan bileşenler	74
Şekil 5.3. Türkiye elektrik fiyatları değişim grafiği.....	75

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Bazı radyoaktif izotoplar ve yarı ömürleri	8
Tablo 2.2. Müsaade edilen maksimum radyasyon doz miktarları	10
Tablo 2.3. Enerji reaktörleri bileşenlerinin malzemeleri	13
Tablo 2.4. Ülkelere göre nükleer reaktör sayıları ve elektrik üretimindeki payı	24
Tablo 2.5. Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomik potansiyelleri ve kapasite faktörleri	26
Tablo 3.1. Türkiye’de bulunan uranyum rezervleri	29
Tablo 3.2. Kanada’da bulunan uranyum rezervleri	31
Tablo 3.3. Ülkeler bazında dünya genelinde tahmin edilen toryum kaynakları	35
Tablo 3.4. Uranyumun zenginlik oranına göre kullanım alanları	42
Tablo 3.5. Tipik yıllık malzeme dengeleri 1000 MW reaktör	53
Tablo 3.6. Bir VVER reaktörün yakıt boyutları	57
Tablo 4.1. Planlanan ve önerilen nükleer güç santralleri.....	61
Tablo 4.2. VVER-1200 teknik özellikler	66
Tablo 5.1. Enerji santralleri yatırım faktörleri	71
Tablo 5.2. Santrallerin bakım-işletme-yakıt maliyetleri	72
Tablo 5.3. Türkiye için nükleer ve doğalgaz santrali yakıt miktar ve fiyatları.....	76

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANS	: Akkuyu Nükleer Santrali
BWR	: Boiling Water Reactor (Kaynar Sulu Reaktör)
ÇED	: Çevre Etki Değerlendirmesi
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
İDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
KNY	: Kullanılmış Nükleer Yakıt
MTA	: Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü
NEE	: Nükleer Enerji Enstitüsü
NGS	: Nükleer Güç Santrali (NEI)
NPP	: Nuclear Power Plant
PWR	: Pressurized Water Reactor (Basınçlı Su Reaktörü)
ROSATOM	: Rusya Atom Enerjisi Kurumu
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
VVER	: Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor (Soğutma ve Yavaşlatma Su ile olan Enerji Reaktörü)
WNA	: World Nuclear Association (Dünya Nükleer Birliği)

1. GİRİŞ

Nükleer enerji, 1940'lı yıllardan itibaren askeri ve sivil alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Nükleer enerjinin ilk kullanım alanını atom bombasının oluşturması maalesef ki nükleer teknolojinin imajı açısından çok kötü olmuştur. İlk olarak bomba ve denizaltılarında kullanılan nükleer enerji daha sonraki süreçte elektrik üretmek amacıyla kullanılmıştır. Çok az miktardaki yakıt ile çok büyük miktarda enerji sağlaması nükleer enerjiyi cazip kılan en önemli faktördür.

Nükleer teknoloji sahasındaki çalışmalar başta ABD ve SSCB tarafından başlatılmıştır. İlk ticari nükleer santral 1950'de ABD'de faaliyete geçirilmiştir. Daha sonra İngiltere, Fransa, Kanada ve Japonya gibi ülkeler bu alanda çalışmalar yapmış ve dünya devi haline gelmişlerdir. Ocak 2016 itibarıyla dünyada 31 ülkede, toplam 440 nükleer reaktör çalışır vaziyette bulunmaktadır. Toplam kurulu güç 380.000MWe'tir. Bu reaktörler karbondioksit salınımı gerçekleştirmeden dünyadaki enerji üretiminin %12'sini karşılamaktadır. Dünyada şu anda 65 reaktör inşa halindedir ve inşa etme planı olan ülkeler bulunmaktadır. Ayrıca 56 ülkede, toplam 240 araştırma reaktörü ve 180 nükleer gemi veya denizaltı bulunmaktadır (WNA, 2016). Bu bilgiler ışığında dünyanın nükleer enerjiden vazgeçtiğini söylemek mümkün değildir. Aksine ülkeler yeni bir santral kurmaktan daha az maliyetli olan "reaktör revize işlemine" önem vermektedir. Çünkü revize işlemiyle santrallerin ömürleri yaklaşık 40 yıl daha artırılmakta ve yeni bir santral inşa etmeye gerek kalmamaktadır. Şu anda ABD'de revize onayı almak için sırada bekleyen 20 reaktör bulunmaktadır (Charles, 2011).

Türkiye'nin nükleer enerji ile ilgili ilk ciddi adımı, 1962 yılında Küçükçekmece'de 1MW gücündeki TR-1 havuz tipi deney reaktörünün kurulmasıdır. Türkiye'nin ilk nükleer santral kurma çabası ise 1967-1970 yılları arasında yapılan etütler ile başlamıştır. Fakat geçici hükümetler, darbeler, ekonomik krizler, siyasi ve sosyal sebeplerden dolayı bu çalışma 2010 yılına kadar ötelenmiştir. 2010 yılında Türkiye ve Rusya arasında imzalanan antlaşma ile mutabakata varılmıştır. Türkiye'nin ilk nükleer santrali, Mersin Akkuyu mevkiine kurulacaktır. Bu anlaşma kapsamında her yıl 100-150 arası öğrenci Rusya'ya nükleer santral eğitimi almak için gönderilmektedir (ANAS, 2016).

Türkiye elektrik enerjisinin %36'sını doğalgaz santrallerinden temin etmektedir. Doğal gaz ise tamamen yurtdışından alınmaktadır. İthal kömür ile çalışan termik santraller de %15 kadar bir elektrik üretimi sağlamaktadır. Bu veriler ışığında, Türkiye enerji

alanında ciddi manada dışa bağımlı bir ülkedir. Hidroelektrik ve termik santrallerin enerji üretimindeki payı ise % 54'tür. Barajlar ve termik santraller %30-40 verimle çalıştığı için ne kadar çok da olsalar ihtiyaç duyulan enerjiyi sürekli olarak sağlayamamaktadır. Bu aşamada nükleer enerji Türkiye için bir çıkış yolu olarak görünmektedir.

Türkiye'nin ilk nükleer santrali daha sonraki bölümlerde de açıklanacağı üzere, VVER-1200 adlı, %4-5 oranında zenginleştirilmiş uranyum ile çalışan su soğutmalı-yavaşlatıcılı basınçlı su reaktörüdür (PWR). Akkuyu mevkiine dört ünite kurulacak ve her bir reaktör ünitesi 1200 MWe gücünde olacaktır. Türkiye'nin en büyük barajı olan Atatürk Barajı'nın 2400 MWe gücünde olduğu düşünülürse, Atatürk barajından çok daha küçük bir alana kurulacak olan Akkuyu santralının ne kadar büyük bir güce sahip olduğu anlaşılabacaktır. Atatürk barajı 817 km²'lik bir alanı kaplamaktadır (DSİ, 2016). Akkuyu Nükleer Santrali ise 15 km²'lik bir alanda kurulacaktır (Akkuyu NGS A.Ş, 2011). Ayrıca Hidroelektrik santraller yıl içindeki su rejimi ile bağlantılı olduğu için düşük bir verimle çalışmaktadır. Oysa nükleer santraller %85-90'lık bir verimle çalışmaktadır. Sinop'ta kurulması planlanan dört reaktör ünitesinin de faaliyete geçmesiyle Türkiye hem enerji sahasında hem de nükleer teknoloji alanında önemli bir mesafe katedecektir.

Bu tez nükleere geçiş sürecindeki Türkiye için genel bir değerlendirme mahiyeti taşımaktadır. Nükleer santrallerin özellikleri, dünyadaki durumu, Türkiye'ye avantajları ve dezavantajları incelenmiş, nükleer yakıtların ve önemli bir sorun olarak bilinen atıkların teknoekonomik yönden değerlendirmesi ve maliyetlerinin analizi yapılmıştır.

2. NÜKLEER ENERJİ VE TEMEL KAVRAMLARI

2.1. Nükleer Enerjinin Temelleri

Nükleer enerji, atomlar arasında meydana gelen nükleer tepkimeler sonucu ortaya çıkmaktadır. Nükleer tepkimeler sonucunda kimyasal tepkimelere göre devasa bir ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. 1 kg uranyumun yanması sonucu 0.87 gr madde enerjiye dönüşmektedir. Bu kütle yaklaşık $7.8 \times 10^{13} J/kg$ enerji açığa çıkarır. Bu rakam göreceli olarak çok küçük görünmektedir. Oysa fosil yakıtların 1 kg yanması sonucu ortaya çıkan enerji $5 \times 10^7 J/kg$ 'dır. Yani nükleer yakıt fosil yakıtlara göre 1.5×10^6 kat daha fazla enerji sağlamaktadır (Haynes, 2011).

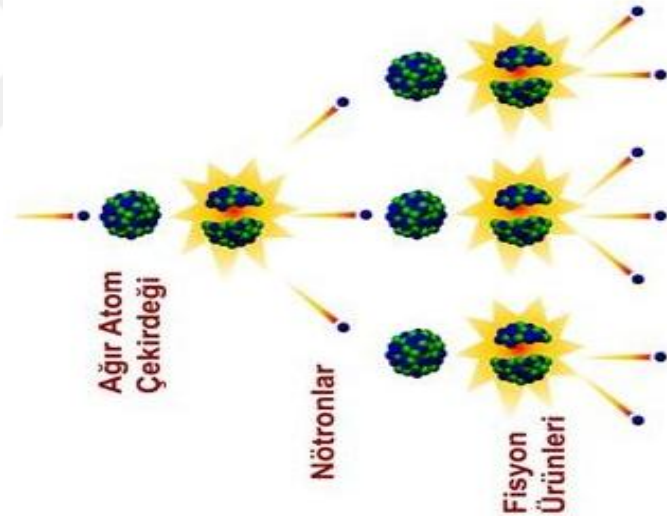
Nükleer santraller, kontrollü nükleer fisyon (bölünme) ile elektrik üretmektedir. Nükleer fisyon, büyük parçacıkların daha küçük parçalara bölünmesi ve sonrasında enerji açığa çıkarmasıdır. Nükleer yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan yüksek ısı enerjisi, reaktör içindeki suyu ısıtarak buhar oluşturur. Buhar türbinlere gönderilir. Türbine bağlı olan jeneratör dönerek elektrik üretir. Bu özet anlatım bir nükleer santralin kabaca çalışma prensibidir. Nükleer santraller yakıt kısmı hariç termik santraller ile hemen hemen aynı çalışma prensibine sahiptir.

Günümüz nükleer reaktörlerinde yakıt olarak uranyum elementi kullanılmaktadır. Plütonyum karışımı yakıtlar kullanılsa da bu yakıt yine U-238'in nötron ile tepkimesi sonucu oluşmaktadır. Yani, Plütonyum elementi doğada bulanmayan ve yapay olarak üretilen bir elementtir. Çokça konuşulan Toryum madeni ise henüz ticari boyutlarda yakıt olarak kullanılmamaktadır. Toryumun yakıt olarak kullanılması için biraz daha zaman ve gelişmiş bir teknoloji gerekecektir. Hindistan ve Güney Afrika bu konuda çalışmalara devam etmektedir.

Nükleer reaktörlerde kullanılan uranyum fisyon sonucu enerji açığa çıkarır. Fisyon çekirdek bölünmesi demektir. Uranyum 235 izotopu nötron yutunca bölünmektedir. Bu sebepten, yavaş nötronlar ile bölünemeyen U-238, U-235 ile zenginleştirilerek yakıt oluşturulur. Aksi takdirde uranyum yakıt olarak kullanılmamaktadır. Doğada bulunan uranyumun % 99.7'si U-238 izotopu, % 0.7 kadarı da U-235 izotopundan oluşmaktadır. Hafif sulu reaktörlerde, uranyumun yakıt olarak kullanılması için U-235 yönünden %3-5 oranında zenginleştirilmesi gerekmektedir.

Zenginleştirilmiş uranyum nötronlarla bombardıman edilince çekirdek bölünmesi gerçekleşmektedir. Bölünme ürünleri kinetik enerji ile ortamdan kaçmaya çalışırlar ve böylece nükleer enerji ısı enerjisi şeklinde meydana gelir. Her fisyon sonucunda meydana 2 veya 3 nötron çıkmaktadır. Ortaya çıkan nötronlar fisil izotoplarla hemen tepkimeye girerek yeniden bölünme meydana getirirler. Bu bölünmeyle beraber yeni fisyonlar ortaya çıkar. Bu döngü büyüyerek devam eder. Buna zincirleme nükleer reaksiyon denilmektedir. Zincirleme nükleer tepkime Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

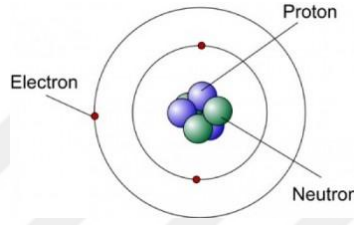
Nükleer reaktörler kontrollü bir şekilde enerji üretmek üzere tasarlanmıştır. Her fisyon sonucunda ortaya çıkan nötronlardan sadece bir tanesinin yeniden tepkimeye girmesine izin verilir. Diğer nötronlar yutulur veya sistem dışına çıkartılır. Bu şekilde kontrol sağlanmış olur (Zabunoğlu H. O., 2012). Kontrolsüz çalışan bir fisyon sistemi tipik bir atom bombasıdır. Atom bombalarının temelinde kontrolsüz zincirleme nükleer tepkimeler bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Zincirleme nükleer tepkime

2.2. Atom Parçacıkları

Maddenin en küçük yapı taşı atomdur. Atom içerisindeki çekirdek ve çevre yörüngesindeki elektronlardan oluşur. Çekirdek içerisinde proton ve nötronlar bulunmaktadır. Şekil 2.2’de tipik bir atom modeli sunulmuştur. Çekirdek çevresinde dolaşan elektronlar hafif, merkezindeki proton ve nötronlar ise ağırdır. Atomun kütlesi merkezde yoğunlaşmıştır. Protonlar elektronlardan 1836 kat, nötronlar ise 1839 kat daha ağırdır. Protonlar artı ve elektronlar da eksi yük taşırlar. Yüksüz olan nötronlar ise, çekirdekteki parçacıkların bir arada durmasını sağlarlar.



Şekil 2.2. Atomun iç yapısı

Elementler çekirdeklerindeki proton sayılarına göre adlandırılmaktadırlar. Örneğin, 1 protona sahip element hidrojenidir. 2 protona sahip element helyum ve 3 protona sahip element de lityumdur. Bu dizi, periyodik cetvelde gösterilmiştir. Doğada 109 adet element bulunmaktadır. Proton sayısı artan element daha ağırdır. Proton sayısı 92 olan uranyum elementi doğada bulunan en ağır elementlerdendir. Atomların ağırlığı ise proton ve nötron sayılarının toplamıdır. Örneğin, U-238 elementinin anlamı, 92 proton ve 146 nötrona sahip olması demektir.

2.2.1. İzotop Atomlar

Çekirdeğinde farklı sayıda nötron bulunan aynı atomlara izotop atom denilmektedir. Bu atomların kimyasal özellikleri birbirinin aynısıdır. Fakat fiziksel özellikleri farklıdır. Atomlar belirli bir sayıdaki nötron ve proton ile kararlı olmaktadır. Eğer nötronlar bu belirli sayının altında veya üstünde olurlarsa, atom kararsız hale gelmektedir. Örneğin, 6 protona sahip olan karbon elementinin 8 izotopu vardır. En hafif olan karbonda 3 adet, en ağır olan karbonda ise 10 adet nötron bulunmaktadır. Karbon atomu 6 veya 7 nötrona sahip olduğu durumlarda kararlı iken diğer durumlarda kararsızdır.

Kararsız atomlar dışarıya parçacık veya enerji atarak kararlı hale gelmektedirler. Kararsız atomlara *İşinethin* veya *Radyoaktif* atom denilmektedir.

Nükleer enerjide en önemli izotoplar Uranyum ve Hidrojen izotoplarıdır. Uranyum 233, 235, 237, 238 ağırlık oranlarındaki izotoplara sahiptir. Her bir elementin atom numarası $Z=92$ 'dir ve aynı kimyasal özelliklere sahiptirler. Fakat çekirdek bileşimleri farklıdır. İzotoplar sahip oldukları atom ağırlıklarına göre gösterilmektedir. Atom ağırlığı 235 olan uranyum U-235 olarak gösterilir. Hidrojen ise H-1, H-2, H-3 olarak üç farklı izotopa sahiptir. Bunlar sırasıyla ^1H (Hidrojen), ^2H (Döteryum) ve ^3H (Tritiyum) 'dur. Üç izotopda da bir tane proton bulunmaktadır. H-1 günlük hayatta kullandığımız suda bulunan hidrojen, H-2 CANDU reaktörlerinde kullanılan ağır suda kullanılan atom ve H-3 ise daha kararsız olan Tritiyum atomudur. CANDU tipi reaktörlerde diğer reaktörlerde kullanılan normal su (H_2O) yerine ağır su ($^2\text{H}_2\text{O}$) kullanılmaktadır.

2.2.2. Fisil ve Fertil İzotoplar

Fisil ve Fertil kavramı nükleer yakıtların en temel konusudur. Fisil (bölünen) izotop yavaş nötronlarla bombardıman edildiğinde kolaylıkla bölünebilen izotoplardır. Fertil (üretken) izotoplar ise bölünebilmeleri için yüksek enerjili hızlı nötronlara ihtiyaç duyarlar. Fisil ve fertil kavramları nükleer yakıt açısından çok önemlidir. Nükleer yakıt fisil ve fertil izotopların karışımı ile meydana gelmektedir.

Doğada bulunan tek fisil izotop U-235 elementidir. Diğer fisil izotoplar U-233, Pu-239 ve Pu-241 izotoplarıdır fakat bunlar doğada bulunmazlar. Nükleer tepkimeler sonucunda ortaya çıkarlar. Örneğin U-233'ün oluşumu için Th-232'nin tepkimeye girmesi gerekmektedir.

Fertil izotoplar ise U-238 ve Th-232'dir. Nükleer reaktörlerin yakıtının çoğunluğunu fertil izotoplar oluşturmaktadır. Fakat fisil izotop olmadan fertil izotoplar yakıt olarak kullanılamazlar. Zenginleştirme işlemi U-238 içeren yakıtı U-235 ile %3-4 oranında doldurmak demektir.

Fertil bir izotop olduğu için Toryum tek başına bir nükleer yakıt değildir. Ancak tepkimeye girip fisil olan U-233'ü oluşturarak yakıt görevi görebilir. U-233 ise reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilen bir izotopdur. Toryumdan U-233 izotopunun oluşumu Denklem 2.1'de verilmiştir.



2.3. Radyasyon ve Yarılanma Ömrü

Radyasyon veya Işınım, kararsız halde bulunan atomların parçacık fırlatarak veya enerji salarak kararlı hale gelmesi olayıdır. Bir madde eğer radyoaktif ise gözle görülemeyecek kadar küçük enerji paketleri ve parçacıklar dışarıya saçıyor. Henry Becquerel, 1896 yılında uranyum tuzlarının x ışınına benzer ışınlar yaydığını keşfetmiş, Curie ailesi ise uranyumun radyoaktifliği üzerine çalışmalar yapmıştır.

Radyasyon, ilgili çalışmaya göre parçacık veya dalga formunda olabilmektedir. Parçacık formunda iken yüksüz, hareketli ve kütleli bir foton şeklindedir. Dalga formunda ise uzayda hareket eden manyetik ve elektrik titreşimlerinden ibarettir. Radyasyon frekans (ν) ve dalga boyu (λ) ile karakterize edilir. Işığın hızı, Denklem 2.2'deki gibi verilir:

$$c = \lambda \nu \quad (2.2)$$

X ve gama ışınları birer elektromanyetik radyasyondur. Bu ışınların enerjileri ve frekansları, görünür ışığa göre daha yüksektir. Radyoaktivite bir elementin kararlı olup olmadığının ölçütüdür. Kararsız atomlar (radyoaktif) doğa kanunları gereği enerji ve parçacık fırlatarak kararlı hale gelme eğilimindedirler (Muray ve Holbert, 2014).

Radyasyon kaynakları doğal ve yapay olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Doğal radyasyon; güneşten gelen ışınlar, beton binaların duvarları, toprakta bulunan radon gazı ve doğada bulunan radyoaktif elementlerin ışıma yapması olarak örneklendirilebilir. Yapay radyasyon kaynakları; hastanelerde kullanılan röntgen cihazları, televizyon ve cep telefonu gibi elektronik aygıtlar, nükleer santraller gibi insan yapımı olan kaynaklardır.

Yarılanma ömrü kavramı da radyoaktivite ile yakından ilgilidir. Bir radyoaktif elementin yarı ömrü, bozunma sonucunda yarı miktarına düşmesi için geçen süredir. Her radyoaktif elementin bozunma süresi farklıdır. Bu anlama karakteristik bir özelliktir. Kimi radyo izotoplar saniyeler içinde bozunurken, kimilerinin bozunması için milyarlarca yıl gerekmektedir. Yarı ömrü kısa olan elementler, çok kısa sürede kararlı hale gelebilen elementlerdir. Tablo 2.1 bazı elementlerin yarı ömürlerini göstermektedir.

Tablo 2.1. Bazı radyoaktif izotoplar ve yarı ömürleri

İzotop	Yarı Ömür
Azot- 16	7.13 sn
Ksenon- 135	9.14 sa
Sezyum- 137	30.08 yıl
Plütonyum- 239	224110 yıl
Uranyum-235	7.03×10^8 yıl
Uranyum- 238	4.47×10^9 yıl
Toryum- 232	1.40×10^{10} yıl

Milyarlarca yılda yarı miktara düşen, yani aktifliği azalan elementlerin varlığından dolayı nükleer santraller çok yüksek güvenlik tedbirleriyle donatılmıştır. Zira reaktör içinden Pu-239, U-233, Amerikyum-241 gibi ağır izotoplar meydana gelmektedir.

2.4. Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği

Rolf Sievert 1920’li yıllardan sonra yaptığı çalışmalarda, radyoaktivitenin tıp sektöründe kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle, radyasyondan korunma üzerine yaptığı çalışmalar bu alandaki ilk adımlar olmuştur.

İnsanlar her gün atmosferden gelen kozmik ışıklar, yaşanan beton binalar, yerkabuğu, hava ve yiyeceklerden dolayı radyasyona maruz kalırlar. Örneğin, sıvı yağın birim miktarında 180 ışıınım, içtiğimiz sütte saniyede 20-50 arası ışıınım, ısıpanakta saniyede 100-210 arası ve her saat vücudumuzda 16 milyon ışıınım olayı gerçekleşmektedir. Fakat bu radyasyon miktarı hayati bir tehlike ifade etmez. Bunlar doğal radyasyon kaynaklarıdır. İnsan sağlığına ciddi anlamda etki eden radyasyon ise yapay radyasyon kaynaklarıdır.

Radyasyon, hücre çekirdeğindeki DNA ve proteinlere etki ederek yapının bozulmasına sebep olmaktadır. Canlıların yaklaşık % 80 oranında sudan oluştuğu için daha çok su molekülleri etkilenir ve sonuç olarak hidroksil ve hidrojen radikalleri oluşur. Bunun sonucunda hücre çoğalmasında bozulma, erken veya geç ortaya çıkan bozukluklar ve genetik değişiklikler ortaya çıkmaktadır.

Radyasyonu ölçmek için farklı birimler kullanılır. Radyasyonun aktifliğini gösteren birime *Becquerel* denir. “Bq” şeklinde kısaltılmaktadır. Becquerel, bir saniyede maddede meydana gelen ışıınım sayısı olarak ifade edilmektedir. Bir maddenin aktifliği 4000 Bq ise, bu maddede saniyede 4000 adet ışıınım yapıyor demektir. Becquerel yerine kullanılabilen *Curie* (Ci) birimi, çok daha yüksek aktiviteli maddeler için kullanılır. 37 milyar becquerel bir curie’ye eşittir.

Radyasyon, bir maddeyle etkileşim içine girdiğinde o maddeye enerjisini bırakmaktadır. Maddenin kilogram başına bırakılan joule cinsinden enerjiye *Soğrulmuş Doz* denilmektedir. Soğrulmuş dozun birimi *Gray*’dır ve “Gy” kısaltması ile gösterilir. Bir maddenin soğrulmuş dozu 300 Gy denildiği zaman, o madde ile etkileşime geçen radyasyon, o maddenin bir kilogramına 300 joule enerji bırakmış demektir. Soğrulmuş dozun eski birimi Rad’dır. 100 Rad 1 Gray’e eşittir.

Son olarak, günlük hayatta bizleri en çok ilgilendiren birim Sievert (Sv)’tir. Sievert, radyasyonun canlılar üzerindeki etkilerini gösteren bir birimdir. Işıınım sonucu maddelere enerji parçacıkları fırlatılmaktadır. Fakat farklı tür maddeler aynı miktarda enerji bıraksa dahi, canlı vücudunda etkiler aynı olmamaktadır. Uranyum gibi ağır elementlerin bıraktığı enerji ile döteryumun bıraktığı enerji aynı miktarda olsa bile, ağır olan uranyumun biyolojik etkisi çok daha büyüktür. Sievert, günlük yaşantımızda aldığımız radyasyon dozunun bilgisini vermektedir. Günlük hayatta gördüğümüz radyasyon çok düşük seviyede olduğu için daha çok mSv birimi kullanılmaktadır. Sievert’in eski birimi Rem’dır. 100 Rem 1 Sievert’e eşittir.

Nükleer santral ya da hastanelerin radyasyon bölümlerinde çalışan işçiler için yıllık müsaade edilen belli bir radyasyon doz limiti vardır. Radyasyon dozu Sievert (Sv) veya rem olarak gösterilmektedir. Sv büyük miktarları ifade ettiği için genelde rem veya mSv ifadesi kullanılmaktadır. Günlük yaşantımızda kozmik ışıınlar ve diğer kaynaklardan aldığımız ortalama doz değeri 0.3 mSv/yıl’dır. Radyasyon çalışanları için yıllık müsaade edilen maksimum etkin doz miktarı 20 mSv’tir. Halk ve çalışanlar için yıllık maksimum müsaade edilen doz miktarlarını Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Müsaade edilen maksimum radyasyon doz miktarları, (IAEA,1996).

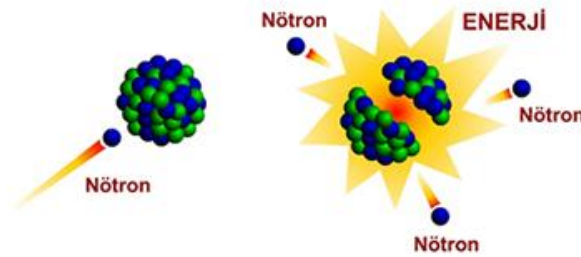
		Görevli	Halk
Yıllık Etkin Doz		20 mSv	1 mSv
Yıllık Eşdeğer Doz	Göz	150 mSv	15 mSv
	Cilt	500 mSv	50 mSv
	Kol-Bacak	500 mSv	50 mSv

Kişi 2000-6000 mSv arasında bir doz aldığı takdirde kusma, kanama, saç dökülmesi gibi ciddi rahatsızlık geçirecektir. Şayet aldığı doz 6000-10.000 mSv civarında ise yaklaşık 2 ay içerisinde ölüm gerçekleşecektir. Oysa nükleer santrallerde çalışan bir kişinin yıllık müsaade edilen doz miktarı 20 mSv’dir ve bu değer ölümcül dozdan 300 kat daha azdır. Nükleer santrallerde çalışan personel ise sağlık güvenliği gerekçesiyle 15 yıl gibi bir süreden sonra başka görevlere tayin edilmektedirler (IAEA, 1996).

2.5. Nükleer Tepkimeler

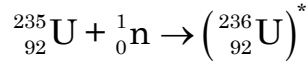
Nükleer tepkimeler temelde Filyon (Fission) ve Füzyon (Fusion) diye ikiye ayrılmaktadır. Günlük hayatta pratiği bulunan nükleer santraller Filyon prensibine göre çalışmaktadır. Filyon, büyük ve kararsız radyoaktif parçacıkların daha küçük parçalara ayrılması olayıdır.

Filyon, radyoaktif bir elementi nötron bombardımanı ile daha küçük parçalara ayırmaktır. Bu parçalanma sonucunda büyük bir enerji ortaya çıkmaktadır. Her bir filyon sonucu ortalama iki veya üç nötron ortaya çıkar. Şekil 2.3’de bir filyon tepkimesinin temsili çizimi gösterilmektedir.

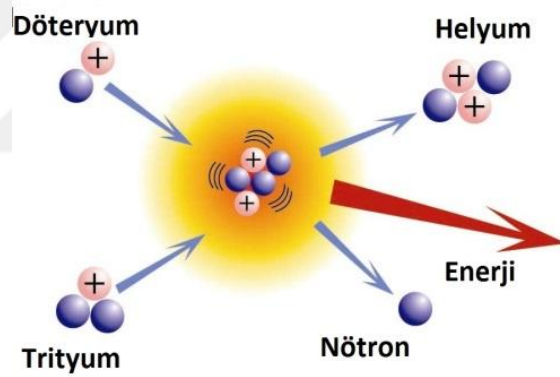


Şekil 2.3. Filyon tepkimesi

Denklem 2.3, tipik bir filyon tepkime denklemini göstermektedir.

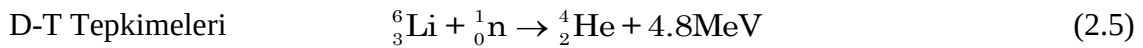
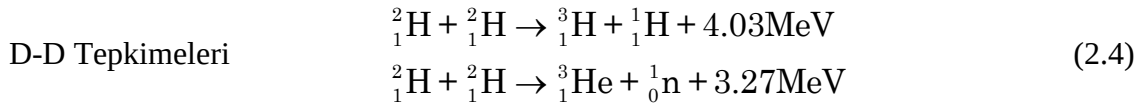


Füzyon tepkimesi ise küçük radyoaktif atomların birleşerek daha kararlı ve büyük elementlere dönüşmesidir. Bu tepkimeye yüksek enerji sağladığından dolayı nükleer kaynaşma adı da verilmektedir. Güneş içerisinde gerçekleşen tepkimeler füzyon tepkimeleridir. Yani güneş de bir nükleer enerji kaynağı sayılmaktadır. Füzyon tepkimelerinde fisyon tepkimelerine göre daha büyük bir enerji oluşmaktadır. Fakat günümüzde füzyon teknolojisi ile çalışan bir santral bulunmamaktadır. Bilim adamları bu konuda çalışmalarına devam etmektedir. Fakat yakın bir gelecekte füzyon ile çalışan santrallerin ticarileşmesi mümkün görünmemektedir. Füzyon tepkimesinin temel hali Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Füzyon tepkimesi

Faydalı füzyon tepkimeleri D-D (Döteryum-Döteryum), D-T (Döteryum-Trityum) diye iki temel bölüme ayrılmaktadır. D-D ve D-T tepkimeleri Denklem 2.4 ve 2.5'te gösterilmiştir.



2.6. Nükleer Reaktörler

Nükleer reaktörlerin çalışması için yeterli şart çekirdek bölünmesi olsa da işlevsel bir reaktör kurmak için başka bileşenlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyadaki ilk reaktör kullanımı 1942 yılında başlamıştır. O günden bu yana çeşitli reaktörler denenmiş ve tasarlanmıştır. Farklı motorlar kullanılmıştır. Güç, güvenlik, ekonomi vb. özellikler farklı seçimler meydana getirmiştir. Reaktörler ilk zamanlar askeri araçlar, denizaltılar ve gemiler için kullanılmıştır. Daha sonraki süreçte ticari ve elektrik üretim amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca eğitim ve araştırma amaçlı kullanılan reaktörler bulunmaktadır.

Çalışmamızın konusunu ticari güç reaktörleri oluşturduğu için reaktörün diğer kullanım alanları hakkında kısaca durulmuştur. Ticari reaktörler de bir takım özelliklere göre tasnif edilmektedir. Hızlı ve termal reaktörler isimlerinde belirtildiği gibi hızlı nötronlar ve termal nötronlar ile çalışırlar. Hızlı üretken reaktörler (FBR) henüz istenilen ekonomik ve ticari seviyeye getirilememiştir. Bu sebepten hali hazırdaki ticari reaktörler termal reaktörlerdir. Bu tezde termal reaktörlerden bahsedilmektedir.

Diğer bir tasnif ölçütü kullanılan yakıt türüdür. Yakıt kullanımına göre üç ana bölüme ayrılabilirler: (1) Doğal uranyum kullanan CANDU tipi reaktörler, zenginleştirme yapılmaz; (2) Az zenginleştirilmiş reaktörler, %3-5 oranında zenginleştirilenler; (3) %10 veya daha yüksek oranında zenginleştirilmiş olanlardır.

2.6.1. Nükleer Reaktör Türleri

Dünyada kullanım oranına göre en fazla bulunan reaktör türü Hafif Sulu Reaktörlerdir. Dünyadaki mevcut reaktörlerin yaklaşık %92'sini "Hafif Sulu Reaktörler" geri kalan % 8'ini de diğer reaktörler oluşturmaktadır. Hafif sulu reaktörler kendi aralarında iki kısma ayrılır. Bunlar "Basıncılı Su Reaktörü (PWR)" ve "Kaynar Su Reaktörü (BWR)" dır. Reaktörlerin daha önceden belirtilen özellikleri üzerinde durarak yaygın kullanımı ve geleceği olan reaktörler Tablo 2.3'de gösterilmektedir.

Basıncılı Su Reaktörü (PWR): 15 MPa basınç ve 320 C'de yavaşlatıcı ve soğutucu olarak hafif suyu kullanan, %3-5 oranında zenginleştirilmiş uranyum kullanan reaktörlerdir. PWR dünyada en yaygın kullanılan reaktördür.

Kaynar Su Reaktörleri (BWR): PWR 'ye göre daha düşük basınçta ve sıcaklıkta çalışır. Soğutucu suyu reaktörde düşük basınçta kaynamaya başlar. Oluşan buhar doğrudan türbine gönderilmektedir. BWR'ler buhar üretici bulundurmadıklarından dolayı PWR'lere göre daha basit tasarlanmışlardır. BWR'lerde iki adet su döngüsü vardır. Birinci döngüde dolaşan su reaktörde oluşan ısıyı türbine taşır, ikinci döngüde denizden alınan su ile türbinden çıkan enerjisi kaybolmuş buhar tekrar suya dönüştürülmektedir.

Tablo 2.3. Enerji reaktörleri bileşenlerinin malzemeleri (Murray ve Holbert, 2014)

	Hafif Sulu Reaktörler (LWR)		Ağır Sulu Reaktör (PHWR)	Yüksek Sıcaklık Gaz-Soğutmalı Reaktörü (HTGR)	Sıvı Metal Hızlı Üretim Reaktörü (LMFBR)
	Basınçlı Su Reaktörü (PWR-VVER)	Kaynar Su Reaktörü (BWR-RMBK)	Doğal Uranyumlu Ağır Su Reaktörü (CANDU)		
Yakıt Türü	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UC, ThC ₂	PuO ₂ , UO ₂
Zenginlik	%4 U-235	%2.5 U-235	%0.7 U-235	~ %10 u-235	15 wt % Pu-239
Moderatör (Düzenleyici/Yavaşlatıcı)	Su	Su	Ağır Su	Grafit	Yok
Soğutucu	Su	Su	Hafif/Ağır Su	Helyum	Sıvı Sodyum
Kaplama	Zirkalay	Zirkalay	Zirkalay	Grafit	Paslanmaz Çelik
Kontrol	B ₄ C/Ag-In-Cd Çubuklar	B ₄ C Çubuklar	Moderatör Seviyeleri	B ₄ C Çubuklar	B ₄ C Çubuklar
Kap	Çelik	Çelik	Çelik	Öngerilmeli Beton	Çelik

VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor): VVER reaktörler Ruslar tarafından geliştirilen basınçlı su reaktörleridir. VVER'in Rusça kısaltmasının anlamı su ile soğutulan ve yavaşlatılan enerji reaktörüdür. VVER reaktörlerde PWR'lerden farklı olarak, buhar üreteçleri yatay yerleştirilmektedir.

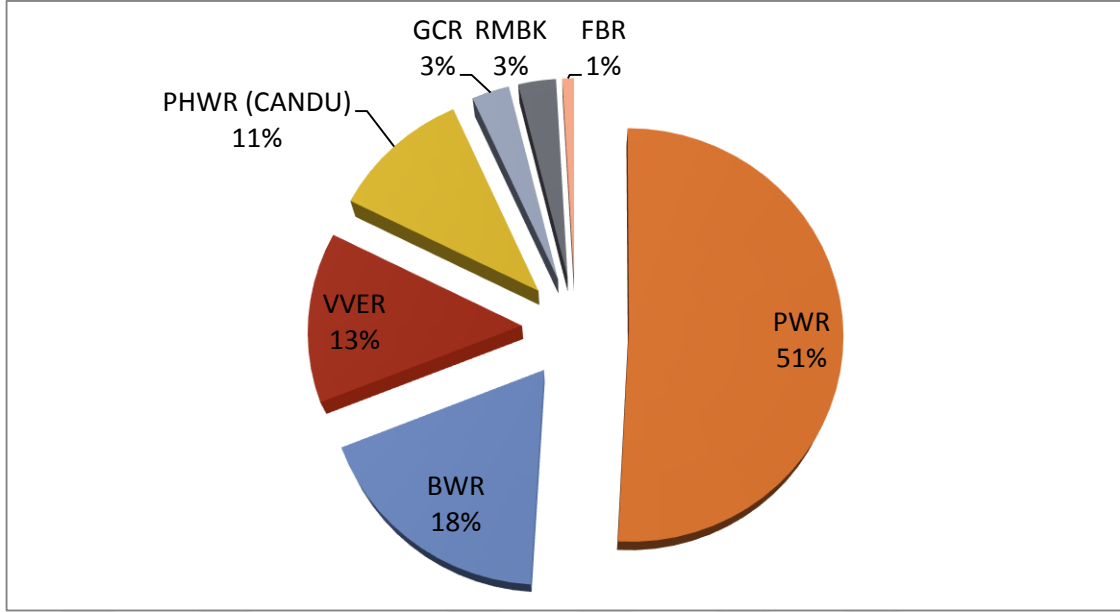
RBMK (Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyı): RBMK yine Rusların ürettiği BWR'lerdir. Çernobil faciası RBMK tipi bir santralde meydana gelmiştir. RBMK soğutucu olarak su yavaşlatıcı olarak grafit kullanmaktadır. Bu tür reaktörlerin güvenlik gereğiyle gelecek zamanda kapatılmaları planlanmaktadır.

CANDU(Canada Deuterium Uranium): Bu reaktörler basınçlı, ağır su kullanan ve doğal uranyumla çalışan reaktörlerdir (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR). Yakıt olarak uranyumu zenginleştirmek gerekmez. Fakat soğutucu ve yavaşlatıcı olarak ağır suyu kullanılması için deniz suyunda %1'den az bulunan ağır suyu ayrıştırıp %99 saflıkta ağır su elde edilmesi gerekmektedir. Bu da ayrı bir proses gerektirmektedir. Yakıt, kısa demetler halinde yatay şekilde yerleştirilir. Yakıt değişimi işleminde santrali kapatmak gerekmez, reaktör kalbinde yakıt yükleme makinesi bulunur.

GCR/AGR (Advanced/Gas Cooled Reactor): Gaz soğutmalı reaktörler ticari olarak sadece İngiltere'de kullanılmaktadır. İki farklı türü vardır: MAGNOX (yakıt magnezyum-oksittir) ve AGR dir. AGR, MAGNOX'un ileri tasarım şeklidir. AGR'de soğutucu CO₂, yavaşlatıcı grafit ve yakıt zenginleştirilmiş uranyumdur.

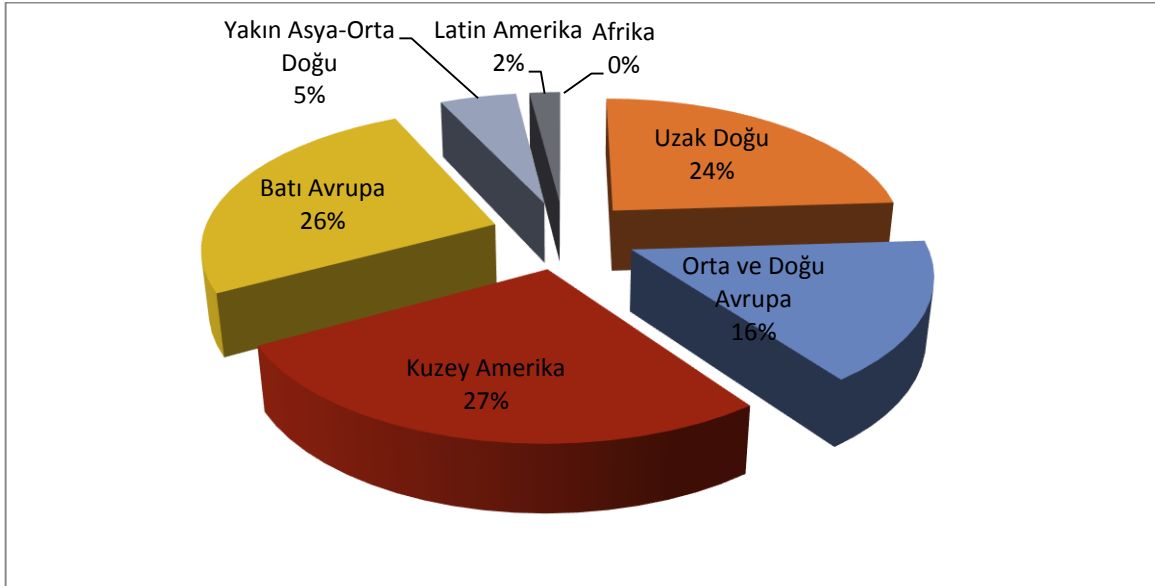
FBR (Fast Breeder Reactor): Henüz ticari olamamış hızlı üretken reaktörlerdir. Yavaşlatıcı kullanılmaz, soğutucu olarak da sodyum kullanılmaktadır. Bu reaktörler tüketilen U-235'den daha fazla Pu-239 üretecek şekilde tasarlanmıştır, bu yüzden adı üretken reaktördür. Bölünme sonrası ortaya çıkan nötronlar ve sonra ki fisyonlara hızlı nötronlar sebep olur. Ortaya çıkan nötronlar bir yandan enerji üretimi sağlarken diğer taraftan U-238'in Pu-239'a dönüştürülmesinde kullanılır. Bu teknoloji gelişebilirse Uranyum madenlerinin ve kullanılmış nükleer yakıtların çok daha verimli kullanılmaları sağlanacaktır.

Mart 2016 itibariyle dünyadaki ticari reaktörlerin dağılımı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Dünya genelinde kullanılan reaktör türleri

Nükleer reaktörlerin büyük çoğunluğu, erken dönemde nükleer teknoloji ile çalışmalar yaptıkları için gelişmiş ülkelerde bulunmaktadır. Şekil 2.6'da nükleer reaktörlerin bölgesel dağılımlarını göstermektedir. Bu bölgeler aynı zamanda kişi başı enerji tüketiminin en çok olduğu bölgelerdir.



Şekil 2.6. Nükleer reaktörlerin bölgelere göre dağılımı, (NED, 2016)

2.6.2. Nükleer Reaktörün Ana Bileşenleri

- **Yakıt:** Nükleer enerjinin ortaya çıkarıldığı malzemedir. Yakıt peleti adı verilen minik boğumlar şeklinde (sigara izmariti kadar) üretilir. Peletler genelde zirkonyumdan yapılmış ince boruların içine yerleştirilirler. Yaklaşık 3.5-4 metre boyunda ve 1 cm çapında olan bu borulara yakıt çubukları adı verilmektedir. Yakıt çubukları 7x7, 14x14 veya 17x17'lik kare demetlere veya hegzagonal gibi şeklindeki yakıt demetlerine yerleştirilir. Bu demetler reaktörün türüne göre reaktör kabına (reactor core) yerleştirilir. Ticari reaktörlerin hemen hemen hepsi uranyumu kullanmaktadır. Şekil 2.7'de avuç içine sığacak kadar küçük UO_2 yakıtlar ve yakıt çubuğu gösterilmektedir.



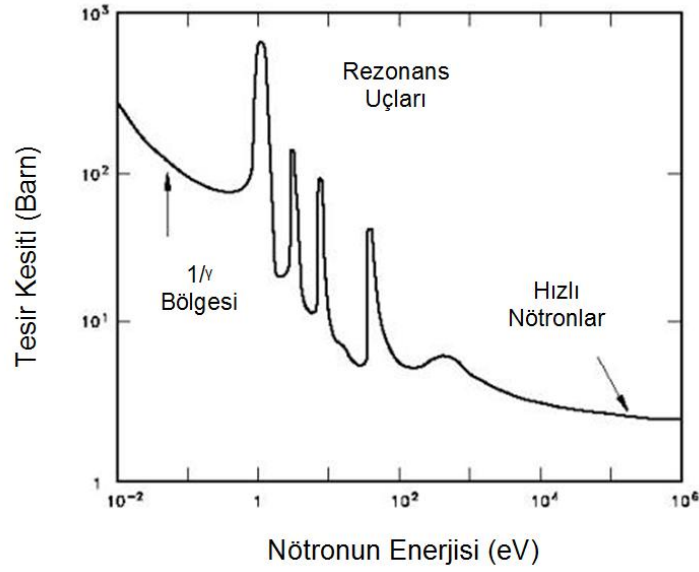
Şekil 2.7. Yakıt peletleri ve yakıt çubuğu

- **Soğutucu:** Reaktör korunda ortaya çıkan ısıyı uzaklaştırmak için kullanılan sıvı veya gazdır. Soğutucu yakıtın erimesine engel olmaktadır. Ticari reaktörlerin çoğunda su kullanılır. Soğutucunun sahip olması gereken özellikler şunlardır; nötron yutmaması, ucuz ve bol bulunuyor olması, paslanmaya sebep olmaması enerjiyi rahatça taşıyabilmesi.

- **Kontrol Çubukları:** Enerjinin üretim hızını ayarlar ve enerji üretimini tamamen durdurmak için kullanılır. Nötron yutabilen kadmiyum, gümüş, indiyum, bor ve hafniyum gibi malzemelerden imal edilmektedir. Yakıt demetleri içine yerleştirilir. Gücü arttırmak için kontrol çubukları yukarı çekilir. Gücü azaltmak için ise aşağı doğru indirilir. Böylece daha fazla nötron yutar ve reaktörün gücü azalır.

- **Yavaşlatıcı:** Nötronlar hızlı ve yavaş olarak ikiye ayrılırlar. Hızlı nötronların enerjisi 1keV'in üzerindedir. Fisyon sonucu oluşan nötronların enerjisi ortalama 2MeV civarındadır (Şekil 2.8). Enerjileri ve hızları çok fazladır. Oysa yavaş nötronların

tepkimeye girme olasılığı daha fazladır, bu nedenle bu hızlı nötronlar farklı maddeler ile (Su, CO₂, Grafit) yavaşlatılmaktadır.



Şekil 2.8. Tipik bir nötronun yutulma tepkimesi tesir kesiti

- **Diğer Yardımcı Sistemler:** Yakıtın düzgün bir şekilde yerinde durabilmesi için mesnet kolonları ve plakaları bulunmaktadır. Buna ek olarak reaktör içine yerleştirilen kılavuz tüpler de kontrol çubuklarının hareketini sağlamaktadır. Yakıt bölgesinin çevresi reflektör ile çevrelenmiştir. Reflektör reaktör dışına çıkmaya çalışan nötronları yeniden reaktörün içine yansıtmak için kullanılır. Ayrıca, sadece basınçlı su reaktörlerinde olmak üzere basınçlandırıcı ve buhar üretici bulunmaktadır.

2.6.3. Nükleer Santrallerin Çalışma Prensibi

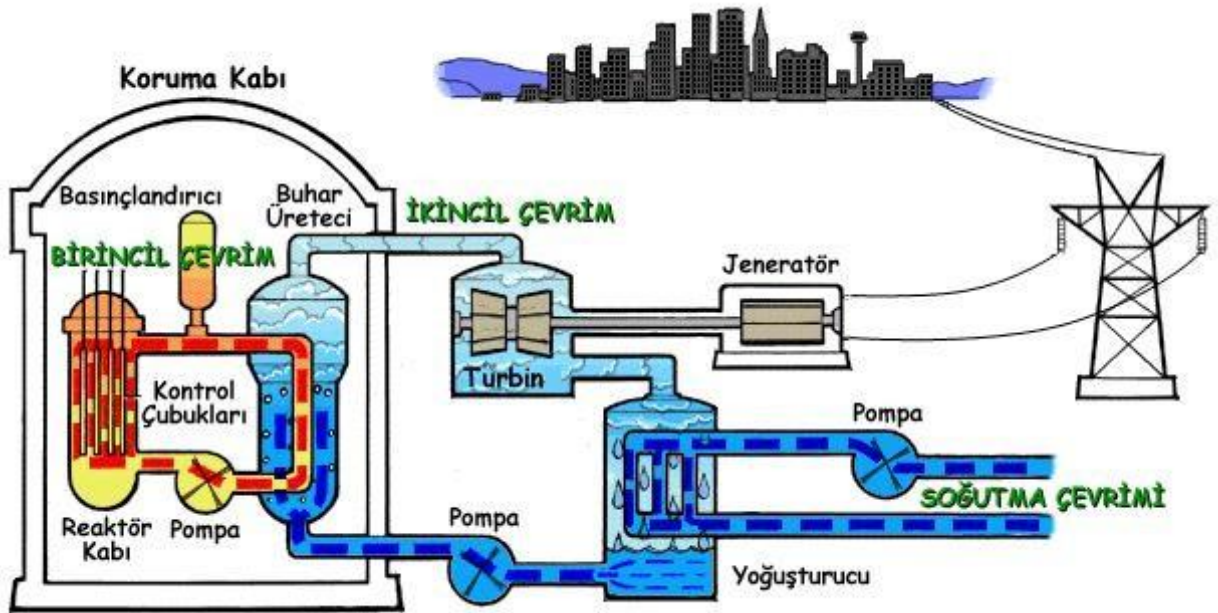
Nükleer Santraller de tıpkı termik santraller gibi ısı enerjisini önce mekanik sonra da elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Yakıt olarak kömür santrallerinde çeşitli kömürler, doğal gaz santrallerinde doğal gaz ve nükleer santrallerde de uranyum kullanılmaktadır. Yakıt kısmında sonraki süreç genelde aynıdır.

Reaktörün merkezinde yer alan yakıt kabına uranyumdan meydana gelen yakıt çubukları yerleştirilir. Uranyum nötronlar ile bombardıman edildikten sonra nükleer tepkime başlamaktadır. Bombardımanı sağlayan en önemli nötron kaynakları Kalifornyum-252, Amerikyum-241 ve Berilyum'dur. Tepkime ile beraber ortaya çıkan büyük miktardaki ısı, yakıt çubukları arasından geçen suyu ısıtarak kızgın buhar oluşturmaktadır. Bu kızgın

buhar türbinlere gönderilmekte ve türbinin hızlıca dönmesini sağlamaktadır. Türbine bağlı olan jeneratör de türbinin dönmesiyle birlikte döner ve elektrik üretmeye başlar. Üretilen elektrik yüksek gerilim hatlarına dağıtılır ve oradan da kullandığımız elektrik şehre dağıtılmaktadır.

Nükleer reaktör türlerine göre bazı farklılıklar olduğu için çalışma prensibi bu şekilde kısa ve hepsine uygun bir şekilde anlatılmaktadır. Dünya genelinde kullanılan reaktörlerin yaklaşık %65'ini PWR diye bilinen Basınçlı Su Reaktörü oluşturmaktadır. Türkiye'de kurulacak santralin türü de bir çeşit PWR olacağından aşağıda sadece PWR ye ait santral döngüsü verilmiştir. Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi, PWR türü bir nükleer santralin çalışması üç ana döngüden meydana gelmektedir.

PWR'nin birinci döngüsü; pompa, buhar üretici ve basınç kabından oluşmaktadır. Basınç kabı içerisinde kontrol ve yakıt çubukları bulunmaktadır. Nükleer yakıttaki çekirdekler fisyon sonucunda enerji açığa çıkarırlar. Bu enerji kendini yüksek sıcaklık olarak gösterir. Soğutucu olarak kullanılan su, bu enerji ile ısıtılmakta ve dışarıya yaklaşık 330 °C olarak çıkmaktadır. Sıcak su pompa ile buhar üreticine gönderilir. Buradaki su U şeklindeki borulardan geçer ve enerjisini ikinci döngüye aktarır. Buhar üretici içinden geçen su bir pompa yardımıyla yeniden basınç kabına gönderilir. Bu döngü daima devir daim etmektedir. Yine PWR'larda diğer reaktörlere göre farklı bir durum vardır. Bu döngüde suyun buharlaşmaması gerekmektedir. Bu sebeple basınçlandırıcı (pressurized) yardımıyla basınç 15-16 MPa civarında tutulmaktadır.



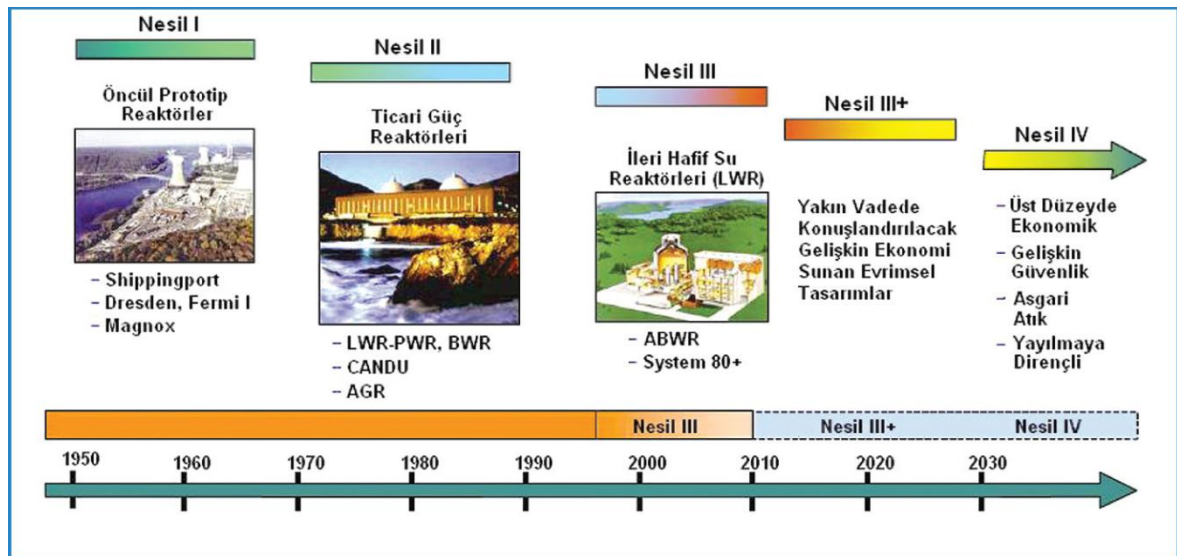
Şekil 2.9. PWR tipi reaktörün çalışma prensibi, (Nükleer Akademi, 2016).

PWR'nin ikinci döngüsü ise buhar üretici, türbin, jeneratör, yoğuşturucu ve pompadan meydana gelir. Birinci döngüden gelen sıcak su, enerjisini buhar üretici içerisindeki suya aktarır. Bu döngüde basınç 7-8 MPa'a indirilir ve sıcak suyun buharlaşması sağlanır. Oluşan yüksek enerjili buhar türbinlere gönderilir. Türbin kanatlarına değen buhar, türbini döndürmeye başlar. Türbinlere bir şaft ile bağlı olan jeneratörler de aynı anda dönerek elektrik üretimi gerçekleşir. Türbine çarpan su buharları suya dönüşerek aşağıdaki yoğuşturucu kabına damlamaya başlar. Yoğuşturucu içerisinde buharı suya çevirmek için deniz suyundan oluşan bir su borusu geçmektedir. Sıcak olan buhar bu soğuk boruya değince yoğuşma hızlıca gerçekleşir. Yoğuşan su bir pompa yardımıyla yeniden buhar üretecine gönderilmektedir.

Üçüncü döngü ise tamamen deniz suyunun yoğuşturucu içerisinde geçerek yeniden denize aktarılmasıdır. Denizden alınan su denize geri dökülürken yaklaşık 1-1.5°C artarak çıkmaktadır. Bu işlemde suyun radyoaktif olması diye bir şey söz konusu değildir. Suyun 1.5°C'lik artışı ise denizde yaşayan canlılara çok ciddi bir zararlı etki yapmamaktadır. Örneğin İspanya'daki Vandelloş Nükleer santralinin hemen kıyısında insanların yüzdüğü plajlar bulunmaktadır (Özemre, Bayülken, & Gençay, 2000).

2.6.4. Nükleer Reaktörlerin Gelişim Süreci

Nükleer santraller zamanla geliştirilmiş, yaşanan kazalar sonucu reaktör üreticileri daha güvenli ve daha verimli reaktörler üretmeye yönelmiştir. Reaktörlerin I. Nesilden IV. Nesil'e kadar olan gelişim süreci Şekil 2.10'da göstermektedir.



Şekil 2.10. Nükleer reaktörlerin gelişim süreci, (Altın, 2007).

Nükleer reaktörlerin ilk kullanımı askeri ve araştırma amaçlı olduğu için ilk reaktörlere *I.Nesil* veya öncül prototip reaktörlerde denilmektedir. Bu reaktörler 1950 ile 1970 yılları arasında kullanılmışlardır.

II. Nesil Reaktörler 1970’li yıllarda kurulup günümüze kadar gelen ve halen çalışan reaktörlerdir. Bu reaktörler aynı zamanda ticari reaktörler ya da elektrik üreten reaktörler olarakda adlandırılırlar. İkinci dünya savaşı sonrası nükleer teknoloji silah üretiminden elektrik üretimine geçiş yapmıştır. Bu dönemde PWR, BWR ve CANDU gibi tasarımlar yapılmıştır. Bu reaktör türleri dünyadaki reaktörlerin neredeyse tamamını kapsamaktadır.

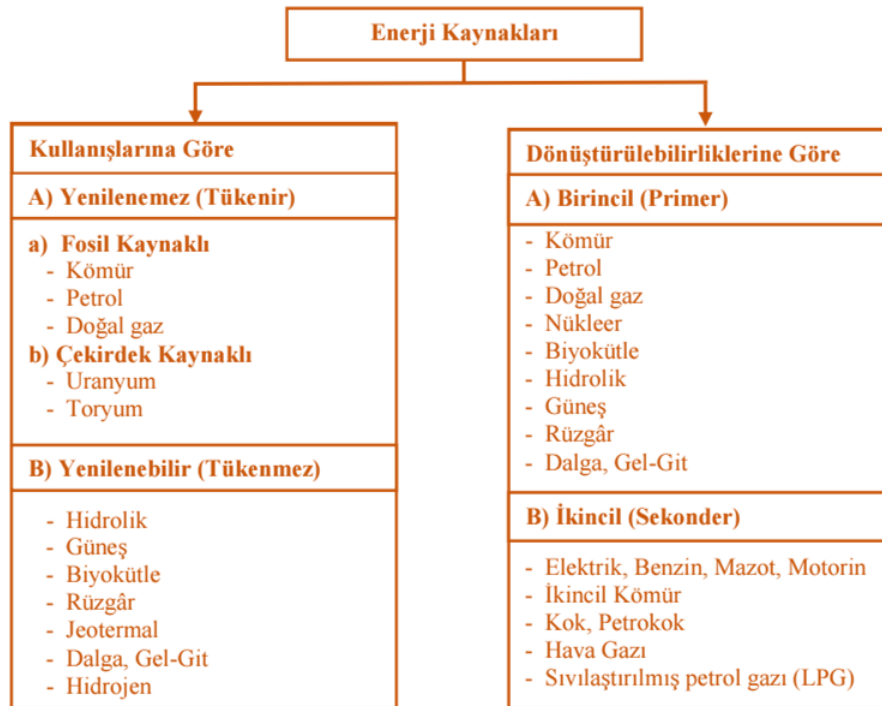
III. Nesil Reaktörler önceki nesilden daha güvenli ve ekonomik olarak inşa edilmişlerdir. Yeni özellikler eklenmiş, birçok işlem uzaktan kumanda ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu reaktörler özellikle Doğu Asya ülkelerinde inşa edilmiş ve geliştirilme çalışmaları da devam etmektedir. Yapılan bu araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda, yakın bir gelecekte kurulacak reaktörler ise *III + Nesil Reaktörler* olarak adlandırılacaktır. Bu reaktörler *III. Nesil Reaktörlere* göre daha verimli, ekonomik ve güvenli olacaktır.

IV. Nesil Reaktörler günümüz reaktörlerinden çok daha farklı özelliklere sahip olacaktır. Bu reaktörler şu anda kağıt üzerindedir. Bu çalışmaların temel amacı ise dört ana başlık altında incelenmiştir: Sürdürülebilirlik, Ekonomi, Güvenlik ve Güvenilebilirlik, Yayılma Direnci ve Fiziksel Koruma. *IV. Nesil Reaktörler*, nükleer teknolojinin belki de en önemli sorunu olan atık sorununa da ciddi katkılar sağlayacaktır. Yapılan çalışmalar atıkların daha minimal hale getirilmesi, kullanılmış yakıtların tekrar tekrar kullanılması ve Toryum elementinin de yakıt olarak verimli bir şekilde kullanılmasını öngörmektedir. Fakat bu çalışmaların pratiğe dökülmesi yakın bir gelecekte öngörülmemektedir. Uzmanların yaptığı planlara göre *IV. Nesil Reaktörler* en erken 2030’lu yıllarda belki daha ileri bir tarihte ticarileşecektir (Altın, 2007).

2.7. Dünyada ve Türkiye’de Enerji İstatistikleri ve Nükleer Enerji

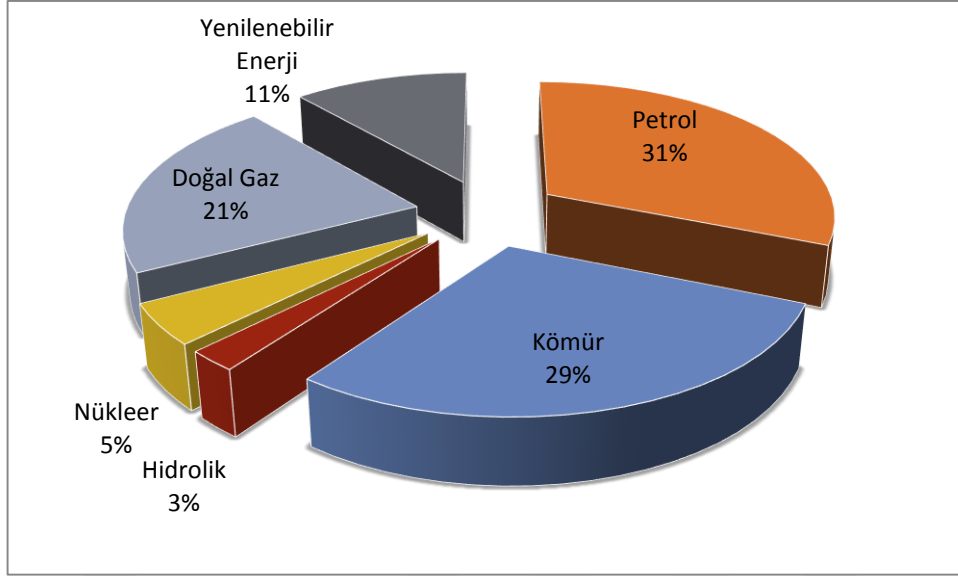
2.7.1. Dünyanın Enerji Durumu

Enerji kaynakları iki şekilde sınıflandırılabilir. İlk sınıflama kullanışlarına göre (Yenilenebilir ve Yenilenemez) ikinci sınıflama ise dönüştürülebilirliklerine göre olan sınıflamadır. Dönüştürülebilirliklerine göre olan sınıflama birincil ve ikincil olmak üzere kendi arasında ikiye ayrılır. Birincil kaynaklar dönüşüme uğramamış olan enerji kaynağının ilk halidir. İkincil kaynaklar ise birincil kaynaklardan dönüştürülerek elde edilen kaynaklardır. Bu kaynaklar ayrıntılı bir biçimde Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Dünyada kullanılan enerjinin büyük bir kısmı birincil enerji kaynakları tarafından sağlanmaktadır.



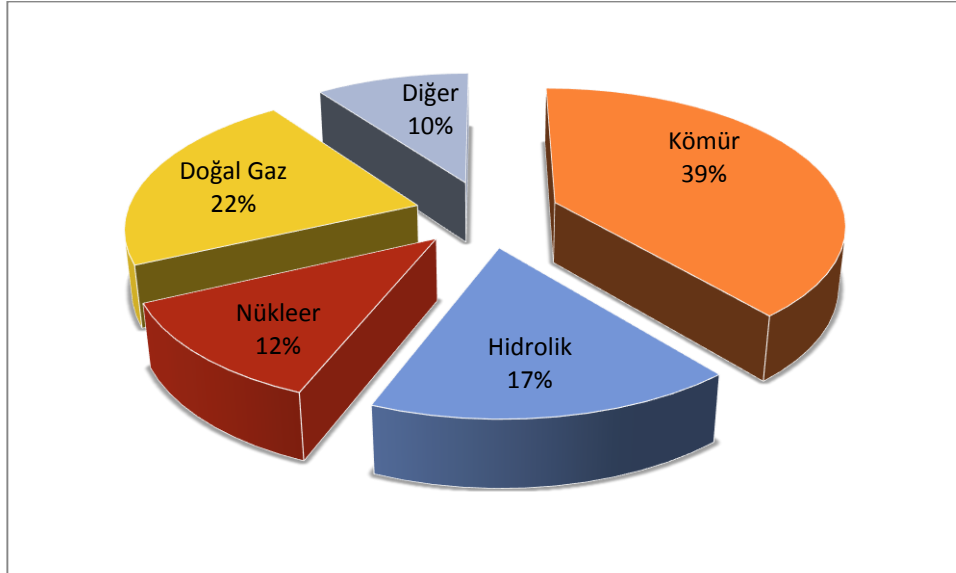
Şekil 2.11. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması, (Koç & Şenel, 2013).

Ülkelerin gelişmişlik düzeyi tüketilen elektrik miktarı ile doğru orantılıdır. 2013 verilerine göre dünyada birincil enerji kullanım miktarı 13.559 Milyon TEP (Ton Eşdeğer Petrol)’tir. Enerji kullanımında sırasıyla en büyük paya sahip olan enerji kaynaklarının %29’unu Kömür, %31’ini Petrol, %21 Hidrolik, % 11 Yenilenebilir enerji, %5’ini Nükleer Santraller ve geri kalanında diğer enerji kaynakları oluşturmaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. 2013 yılı dünyadaki birincil enerji kaynakları dağılımı, (TEİAŞ, 2016).

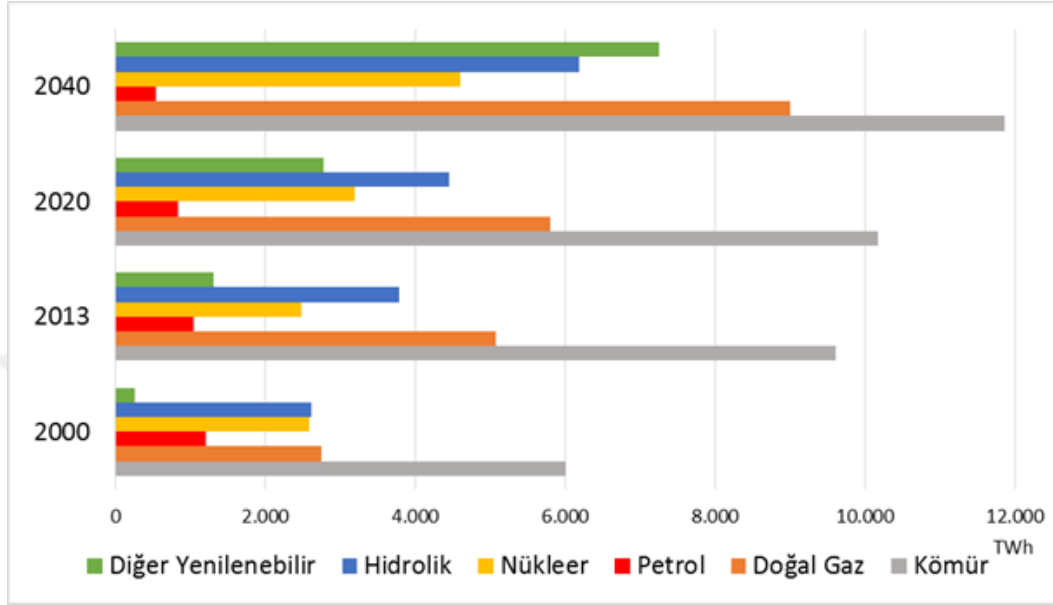
2014 yılı sonu itibariyle dünyada üretilen elektrik enerjisinin kaynaklarına göre dağılımı Şekil 2.13’de verilmiştir. 2014 yılı içerisinde üretilen elektrik enerjisi 23536 TWh’ tır. Bu üretimde paya sahip olan enerji kaynakları sırasıyla şöyle sıralanabilir; % 39 Kömür, % 22 Doğalgaz, % 17 Hidrolik, % 12 Nükleer ve % 10 ise diğer kaynaklardır.



Şekil 2.13. 2014 yılı birincil enerji kaynaklarından dünya genelinde elektrik üretimi, (TEİAŞ, 2016)

2040 yılına kadar elektrik üretimindeki kaynakların payı tahmini olarak Şekil 2.14’de gösterilmiştir. Bu tahmini rapora göre kömür kullanımı sabit bir artış oranı ile kullanılmaya devam edecektir. Petrol kullanımı her geçen yıl biraz daha azalacak ve 2040

yılına gelindiğinden petrolden 1000 TWh'in altında bir elektrik üretilecektir. Çünkü petrol kaynakları 2050 yılına kadar tükeneceği belirtilmektedir. Hidrolikten elde edilen elektrik enerjisinde kömür gibi sabit bir oranda artış gösterecek.



Şekil 2.14. Tahmini dünya elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payları (ETKB, 2016)

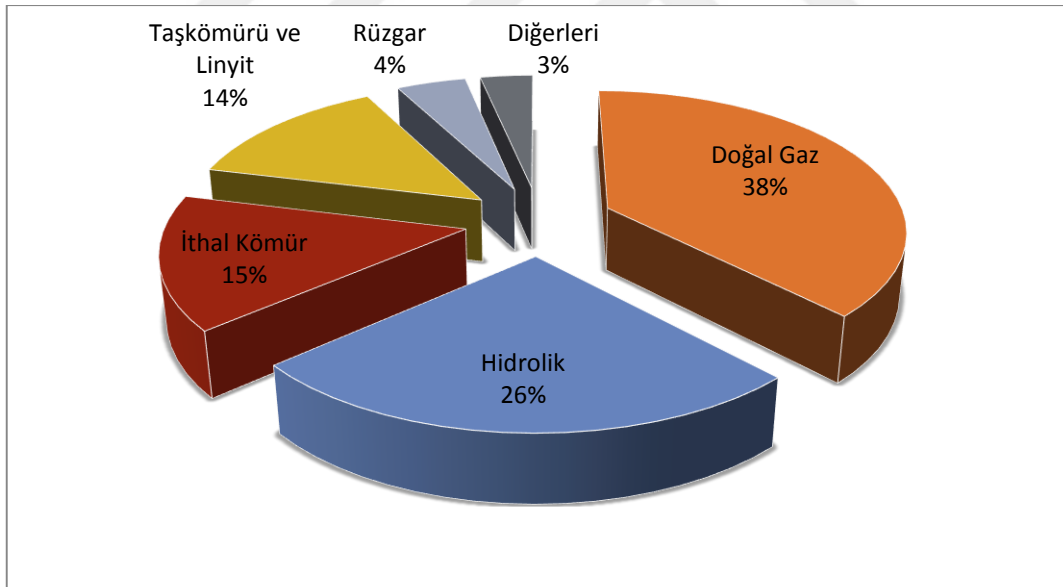
Yenilenebilir enerji 2040 yılına kadar en büyük çıkışı gösteren enerji kaynağı olarak görülmektedir. Yenilenebilir enerjide verimlilik ve ekonomik düzelme sağlanırsa bu mümkün olacaktır. Son olarak petrol bazlı kaynakların ve kömürün tükenmesi ile beraber Nükleer enerjiden elektrik üretimi önem kazanacak ve artan bir ivme ile kullanılmaya devam edecektir. Şu anda Nükleer enerji dünya elektriğinin % 12'lik kısmını karşılamaktadır. Tablo 2.4, ülkelerin sahip olduğu nükleer santraller, net ithalat ve nükleer enerjinin elektrik üretimine katkı oranlarını rakamlarla göstermektedir.

Tablo 2.4. Ülkelere göre nükleer reaktör sayıları ve elektrik üretimindeki payı, (IAEA, 2013).

Ülkeler	Net Enerji İthalatı (%)	Elektrik Üretiminde Nükleer (%), 2011	İşletimde Olan Nükleer Reaktör	İnşaa Halindeki Nükleer Reaktör
ABD	22	19	104	3
Fransa	53	78	58	1
Japonya	86	18	50	2
Rusya	-72	18	33	11
Güney Kore	86	35	23	4
Kanada	-40	15	20	-
Hindistan	32	4	20	7
Çin	11	2	16	28
Birleşik Krallık	37	16	16	-
Ukrayna	39	48	15	2
İsveç	35	38	10	-
Almanya	64	18	9	-
İspanya	75	20	8	-
Belçika	79	54	7	-
ÇekCumh.	35	33	6	-
Tayvan	90	19	6	2
İsviçre	53	38	5	-
Finlandiya	63	3	4	1
Macaristan	62	4	4	-
Slovakya	68	5	4	2
Pakistan	32	4	3	2
Arjantin	-3	5	2	1
Brezilya	15	3	2	1
Bulgaristan	45	33	2	-
Meksika	-13	4	2	-
Romanya	11	5	2	-
Ermenistan	76	33	1	-
İran	-60	0.04	1	-
Hollanda	32	4	1	-
Slovenya	51	37	1	-
BAE	-116	-	-	1
TOPLAM	-	13	437	68

2.7.2. Türkiye'nin Enerji Durumu

Türkiye her geçen gün gelişen ve ekonomisi güçlenen bir ülkedir. Ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen en önemli etkenlerden birisi de elektrik kullanım oranıdır. Türkiye her geçen gün enerji kaynaklarını çeşitlendirmekte ve elektrik üretimini artırmaktadır. 2014 yılında dünyadaki elektrik üretimi 23536 TWh, Türkiye'nin ürettiği elektrik enerjisi ise 250.4 TWh olarak gerçekleşmiştir (British Petroleum, 2015). Böylece dünya elektrik üretiminin sadece % 1' ini üretmektedir. Bu elektrik üretimi gelişmekte olan bir ülke için çok yetersizdir. Ayrıca Şekil 2.13'den de görüleceği üzere üretilen elektriğin yaklaşık % 55'i ithal edilen enerji kaynaklarından (Doğal gaz, ithal kömür vd.) üretilmektedir. 2015 yılında toplam 259.690.305.653 kWh elektrik enerjisi üretilmiş ve bu elektrik enerjisinin yaklaşık 138 TWh'lik kısmı doğalgaz ve ithal kömürden üretilmiştir. Bu durum büyük oranda bir dışa bağımlılık göstergesidir. Günümüzde kullanılan alternatif enerji kaynakları ve kullanım alanları Şekil 2.15'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Türkiye'de kaynaklara göre elektrik üretimi 2015, (TEİAŞ, 2016).

Türkiye mevcut kaynaklarını daha aktif kullanmak zorundadır. Doğal gaz ve petrol rezervlerine sahip olmayan ülkemizde elde kalan seçenekler hidrolik, linyit ve taş kömürü, yenilenebilir enerji (güneş, rüzgâr, jeotermal vd.) ve nükleer enerjidir. Tablo 2.4 yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye için mevcut potansiyellerini göstermektedir.

Örneğin jeotermal ve biyokütlenin toplam kurulu güç potansiyeli sadece 2600 MW gücündedir ve bu rakam oldukça azdır. Güneş enerjisinin ise %20 olan verimi çok düşüktür. Geriye verimi ve potansiyeli diğer enerjilere nispeten daha yüksek olan hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi kalmaktadır. Hidroelektrik santrallerinin kapladığı alan, kuruluş maliyeti ve iklim değişikliğine olan zararlı etkileri bilinmektedir. Ayrıca ülkemizde çok sayıda hidroelektrik santrali vardır. Yine de hidroelektrik santralleri değerlendirilmelidir. Geriye kalan rüzgâr enerjisi ise henüz istenilen seviyeye ulaştırılamamıştır. Bu yenilenebilir enerjiler, hidroelektrik hariç, aynı zamanda dünya çapında çok verimli elektrik üretecek düzeye getirilememiştir. Teknolojik çalışmalar devam etmektedir. Şimdiye kadar hiç kullanılmamış olan uranyum kaynakları enerji çeşitliliğinde büyük bir avantaj olarak görülmektedir. Bu enerji türü bir an evvel Türkiye’de tatbik edilmelidir. Tablo 2.5’te görüldüğü üzere biyokütle ve jeotermal enerji hariç diğer enerji türlerinin verimi oldukça düşüktür. Oysa nükleer santraller %85-90 verimle çalışmaktadır. Bu oranlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2.5. Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomik potansiyelleri ve kapasite faktörleri

Yenilenebilir Kaynaklar Türler	Toplam Kurulu Güç Potansiyeli (MW)	Kurulu Güç (MW)	Kapasite Faktörü	2023 Hedefi (MW)	Ortalama Üretim Potansiyeli (Milyar kWh/yıl)
Hidro	36.000	19.609	%44	36.000	144.0
Rüzgar	48.000	2.260	%30	20.000	60.0
Güneş	50.000	-	%20	3.000	7.5
Jeotermal	600	162	%84	600	4,4
Biyokütle	2.000	44	%80	2.000	14.0
TOPLAM	136.600	22.075	-	61.600	229.90

3. NÜKLEER YAKITLAR, ÇEVİRİMLER VE ATIKLAR

3.1. Nükleer Yakıt Olarak Kullanılan Elementler

Nükleer reaktörlerin hemen hemen tamamında Uranyum yakıtı (UO_2) kullanılmaktadır. Uranyumun işlenmesi ve yakıt olarak imal edilmesi diğer kaynaklara göre daha avantajlı ve düşük maliyetlidir.

Yakıt olarak kullanılabilen diğer elementlerin başında ise Pu-239 (ve Pu-241) gelmektedir. Plütonyum elementi ise doğada bulunmamakta, nükleer reaktörlerdeki U-238'in tepkimeleri sonucunda meydana gelmektedir. Yani Plütonyum elementi de yine Uranyuma bağlı bir elementtir. Uranyum olmazsa Plütonyum da olmayacaktır. Plütonyumun yakıt olarak kullanılması için kullanılmış yakıttan ayrıştırılması ve karışık oksit (Mix Okside-MOX) denilen yakıt haline getirilerek kullanılması gerekmektedir.

Yakıt olarak kullanılabilecek diğer bir madde ise Toryum-232'dir. Hali hazırda ticari reaktörlerde toryum kullanılmamaktadır. Araştırma amaçlı kullanılan toryum çok yakın bir gelecekte olmazsa bile önemli bir yakıt kaynağı olarak düşünülmektedir. Toryum bir fisil kaynak değildir. Bu yüzden fisil bir element ile karıştırılarak kullanılması gerekmektedir. Uranyumun tükenme noktasına gelmesi veya uranyum fiyatlarının çok yükselmesi Toryumu cazip bir yakıt kılabilir. Fakat şu anda Toryum yakıt olarak kullanılabilecek düzeyde ekonomik değildir. Henüz yeterli teknolojik ilerleme sağlanamamıştır. (Zabunoğlu O. , 2015)

Yakıt çevrimine geçmeden önce; Uranyum, Toryum ve Plütonyum hakkında temel bilgilere sahip olmak gerekmektedir. Bu üç önemli elementin özellikleri, yapmış olduğu tepkimeler ve hem dünyada hem de Türkiye'de bulunan rezervleri sırasıyla incelenmiş ve bilgileri sunulmuştur.

3.1.1. Uranyum

Nükleer santrallerde kullanılan temel yakıt uranyumdur. Uranyum doğada bulunan atom numarası 92 olan kimyasal bir elementtir. Kimyasal formülü 'U' olan Uranyum doğadaki en ağır elementlerden biridir. Uranyum 1789 yılında Martin Klaproth tarafından bulunmuştur. Yakın bir zamanda bulunan Uranüs gezegeninden dolayı Uranyum ismi

verilmiştir. Uranyumun radyoaktif oluşunu ise Henry Becquerel 1896 yılında deneyler sonrasında bulmuştur (Nuclear Power, 2016). Uranyum doğada Uraninite, Zeunerite ve Pitchblende olarak üç farklı formda bulunmaktadır. En yaygın görülen uranyum cevheri olan Uraninite Şekil 3.1’de görülmektedir.

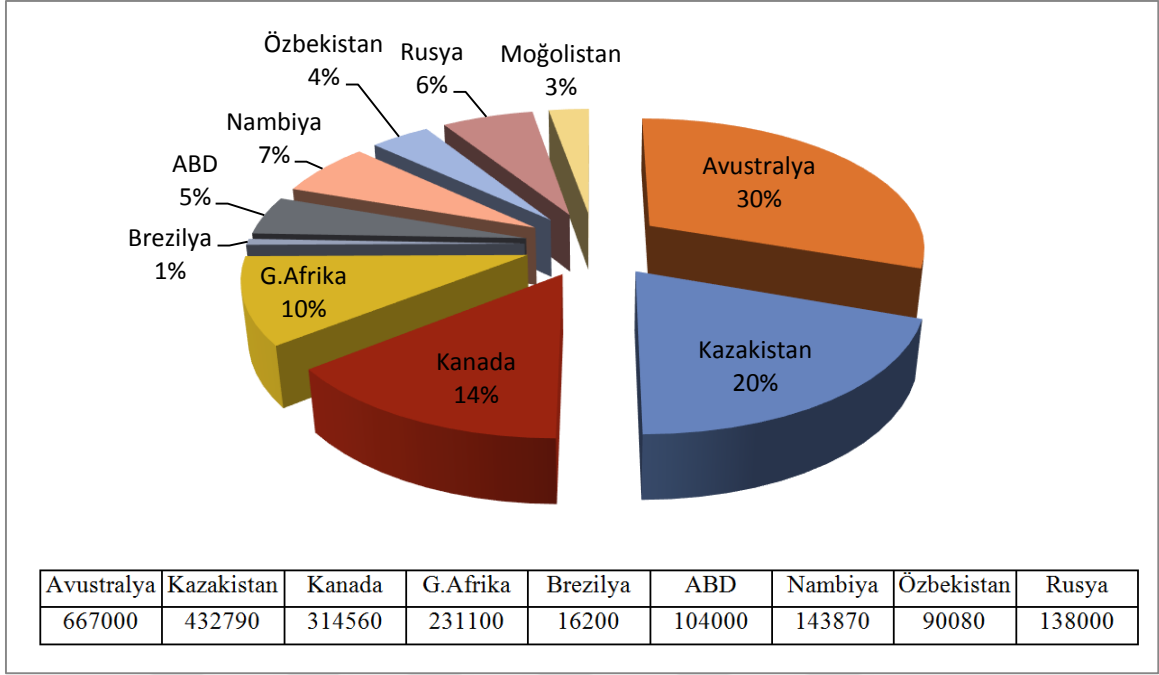


Şekli 3.1. En yaygın bulunan uranyum cevheri – uraninite

Uranyum genellikle düşük seviyeli yerlerdeki kaya, toprak ve sularda bulunur. Ayrıca deniz ve okyanuslarda da bulunmaktadır. Doğada farklı izotoplar şeklinde bulunmaktadır. Uranyum-238, Uranyum-235 ve Uranyum-234 doğada bulunan uranyum izotoplarıdır. Doğadaki Uranyumun %99.28’i U-238, % 0.71’i U-235 ve %0.0054’lük kısmı ise U-234’ten meydana gelmektedir. Reaktörde U-235 ve Th-232 tepkimeleri sonrasında ortaya çıkan yapay uranyum izotopları ise U-236, U-233 ve U-232’dir. (Nuclear Power, 2016).

U-238 doğadaki uranyumun neredeyse tamamını oluşturmasına rağmen fisil bir madde olmadığı için tek başına nükleer yakıt olarak kullanılamamaktadır. Gerçek anlamda nükleer yakıt olarak kullanılan element Uranyum-235’tir. Dünyadaki nükleer reaktörlerin % 90’ını Hafif Sulu Reaktörler oluşturmaktadır. Hafif Sulu Reaktörler’de yakıt U-235 oranının %3-5 oranında artırılması/zenginleştirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde mevcut U-238 ile nükleer tepkime gerçekleşmemektedir (WNA, 2016).

Ticari değere sahip olan Uranyum madenleri ton cinsinden Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Bu bilgilere göre uranyumun en çok bulunduğu yer Avustralya, ardından Kazakistan ve Kanada’dır.



Şekil 3.2. Uranyum madenlerinin ülkelere göre dağılımı

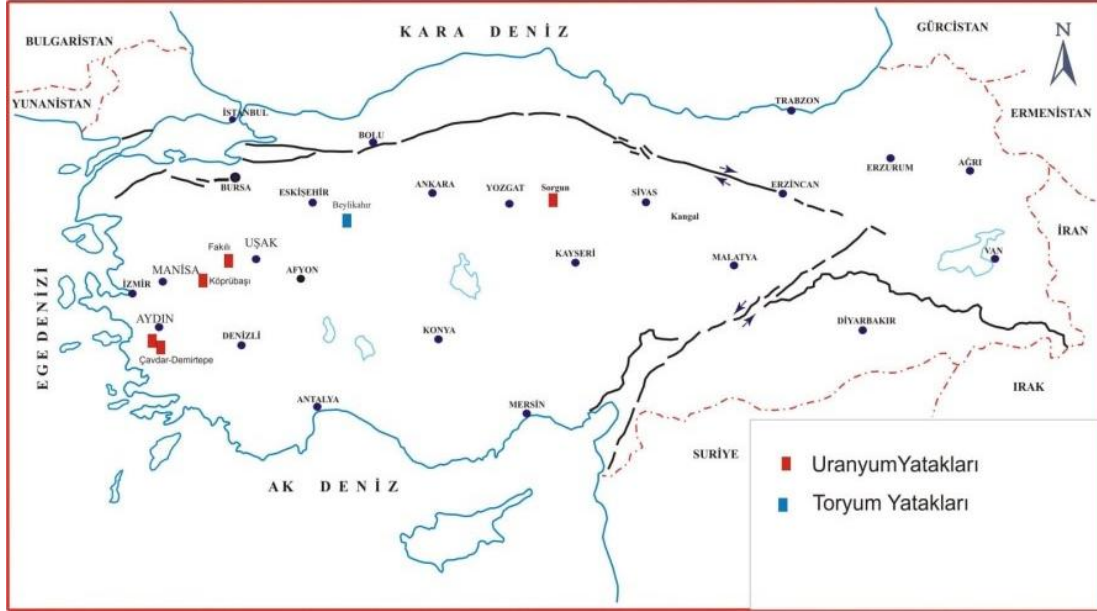
Dünyadaki uranyum madenleri yanında Türkiye’deki uranyum miktarı oldukça azdır. MTA’nın verilerine göre, Türkiye’de 9.129 ton uranyumun (U_3O_8) var olduğu tespit edilmiştir. Bu uranyum madenlerine ait veriler Tablo 3.1 ve Şekil 3.3’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Türkiye’de bulunan uranyum madenleri

Şehir	Mevki	Ort. Tenör (U_3O_8)	Ton
Manisa	Köprübaşı	%0.4-0.05	2.852 <i>1351 Kasar tipi</i> <i>1201 Taşharman</i> <i>300 Ecinlitaş</i>
Uşak	Fakılı	%0.05	490
Aydın	Küçükçavdar	%0.04	208
Yozgat	Sorgun	%0.1	3.850
Aydın	Demirtepe	%0.08	1.729
Toplam			9.129 ton

Türkiye’de bulunan bu uranyum madenleri, ilk ortaya çıkartıldığı yıllarda önemli bir değere sahipken günümüzde değerini büyük oranda kaybetmiştir. Kanada gibi dünyanın

farklı yerlerinde bulunan yüksek tenörlü uranyum kaynakları ve bunların daha düşük maliyetle çıkartılması bu sonucu doğurmuştur.



Şekil 3.3. Türkiye’deki uranyum ve toryum kaynakları

Tablo 3.2’de Kanada’nın bazı bölgelerinde çıkartılan uranyum kaynaklarının miktarı ve tenörü gösterilmektedir. Türkiye’deki % 0.1 oranındaki tenörlü uranyum % 17, % 19 gibi büyük orandaki tenörlü uranyum kaynakları yanında çok küçük kalmaktadır.

Geçmiş dönemlerde uranyum ile laboratuvar ortamında ciddi çalışmalar yapılmıştır. Hatta sarı pasta oluşumuna kadar yakıt üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Fakat nükleer enerjiye geçiş süreçleri sektöre uğradığı için bu çalışmalar yarıda kalmış ve bir yerden sonra da tamamen durdurulmuştur (DPT, 1996). Uranyum kaynakları üzerine yapılan araştırmalar çok eski olduğu için bu değerlerde hata olma olasılığı vardır. Öyle ki, Sorgun Temrezli’de yapılan son çalışmalara göre mevcut uranyum miktarı 3850 ton değil 6032 ton olduğu belirtilmiştir (Adur Madencilik, 2016).

Dünyadaki uranyum kaynaklarının her geçen gün azalması söz konusudur. Bu sebeple ülkemizde bulunan uranyum kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Yakıt alanındaki çalışmalar da Nükleer santral kurulumu ile eş zamanlı ilerletilmelidir. Türkiye’deki uranyum madeni çıkarma işlemine öncelikle Yozgat Sorgun’da bulunan madenlerden başlanılacağı açıklanmıştır.

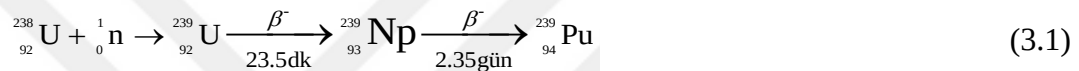
Tablo 3.2. Kanada’da bulunan uranyum rezervleri, (WNA, 2016).

Maden	Şehir	İşletme	Ton (U)	Ton (U₃O₈)	Tenör
Rabbit Lake	Sask	Cameco	4.580	5400	0.59%
			10.270	12.100	0.86%
McClellan Lake	Sask	Areva	337	397	0.42%
			5.220	6.156	4.81%
McArthurRiver	Sask	Cameco	97.530	115.000	9.62%
			31.930	37.660	18.84%
			2150	2540	3.8%
			22.550	26.590	7.7%
Cigar Lake	Sask	Cameco	42.050	49.590	18.30%
			43.200	50.950	13.55%
			1.270	1.500	7.5%
			39.670	46.780	16.4%
Dawn Lake	Sask	Cameco	6.885	8.120	4.42%
WheelerRiver	Sask	Denison&Cameco	27.000	31.850	19.13%
			16.970	20.000	2.38%
Fox Lake	Sask	Cameco	26.200	30.900	7.99%

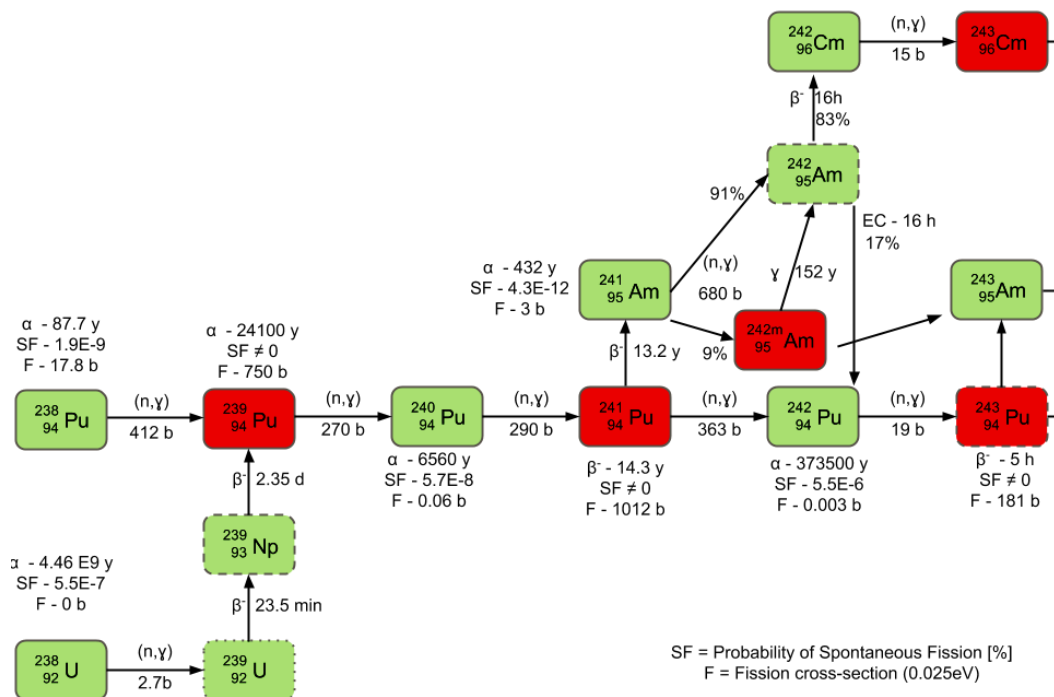
Uranyum çıkarma çalışmaları için, Adur Madencilik MTA ile birlikte 2010 yılından itibaren sahada çalışmalar yürütmüştür. Sorgun Temrezli mevkiine kurulacak olan madeni, Amerikan uranyum madencilik şirketi olan “Uranium Resource Inc. (URI)” ve Avustralya “Anatolia Energy” şirketleri birlikte kuracaktır. Proje “Adur Mühendislik” kontrolünde yürütülecektir. URI Teksas’ta bulunan uranyum madeni tesislerini Sorgun’a nakledecektir. İlk maden çıkarma işleminin 2016 sonunda gerçekleşeceği duyurulmuştur.

Şirketlerin bildirdiğine göre, madenin ömrü 12 yıl olacaktır. Her yıl ortalama 384 ton uranyum olmak üzere maden ömrü süresince ortalama 4600 ton uranyum üretilmesi beklenmektedir. Madenin toplam gelirinin 566 milyon \$ olacağı bildirilmiştir (Haber Türk, 2015).

Plütonyum, atom numarası 94 olan ve yapay yollarla üretilebilen (Transuranic Elements) bir kimyasal elementtir. Kimyasal sembolü ‘Pu’ dur. Plütonyum, nükleer reaktörlerde uranyumdan elde edilir. Bu sebeple plütonyum, kullanılmış nükleer yakıtlarda veya nükleer silahların içerisindeki fisil materyallerde bulunur. Plütonyumun doğada bulunan dört izotopu bulunabilir (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu ve ^{244}Pu). Bu izotoplar spontane fisyon ile meydana gelmiştir. Fakat bunlar eser miktardadır. Plütonyumun asıl üretimi U-238 izotopunun tepkimeye girmesi ile oluşur. Denklem 3.1’de bu tepkimenin en temel hali verilmiştir.



Üretilen Plütonyumun %99.28'i Pu-239 izotopundan oluşmaktadır. Plütonyum yüksek izotopları (^{240}Pu , ^{241}Pu ve ^{242}Pu) nötron ışınım yakalama tarafından da oluşturulur. Ancak bu durumda, bir absorbe plütonyum çekirdeği olmalıdır. Örneğin, en yaygın ikinci izotop Pu-240 için Pu-239'dan radyoaktif yakalanma Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Şekil 3.2 aynı zamanda dönüşüm ve bozunum zincirini ifade etmektedir.



Şekil 3.4. Plütonyumun dönüşüm ve bozunum zinciri, (Nuclear Power, 2016).

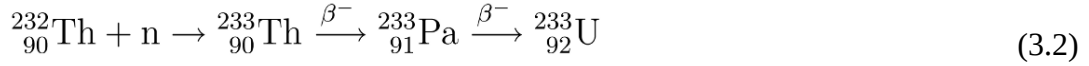
1000 MWe gücüne sahip bir PWR nükleer reaktöründen yıllık yaklaşık olarak 27 ton kullanılmış yakıt açığa çıkmaktadır. Bu yakıtın % 0.9'unu Plütonyum oluşturur. Bu plütonyumun da yaklaşık %70'i fisil izotop içerir. Yani yakıt olarak kullanılabilen değerdedir. Kullanılmış nükleer yakıttaki (KNY) enerji üretiminde tekrardan kullanabilmek için daha sonraki bölümlerde değinildiği üzere yeniden işleme (Reprocess) ve yeniden kullanım (Recycling) işlemlerinden geçmesi gerekmektedir (Zabunoğlu O. , 2014).

3.1.3. Toryum

Toryum, atom numarası 90 olan ve doğada kendiliğinden bulunan bir kimyasal elementtir. Kimyasal sembolü “Th” dir. 1828 yılında Norveçli bilim adamı Morten Thrane Esmark tarafından bulunmuştur. Toryum, uranyuma göre doğada üç kat daha fazla ve genellikle monazit (fosfat minerali içeren nadir toprak metalleri) kumlar içinde bulunmaktadır. Doğada 6 izotopu bulunan toryumdan sadece Th-232 diğerlerine göre kararlıdır. Diğerleri (^{230}Th , ^{229}Th , ^{228}Th , ^{234}Th ve ^{227}Th) kararsız izotoplardır. Th-232'nin yarı ömrü yaklaşık 1.4×10^{10} yıldır ve dünyanın yaşına (4.5×10^9 yıl) yakındır. (Nuclear Power, 2016).

Doğadaki toryumun neredeyse %100'ü Th-232'dir. Th-232 fertil bir izotoptur. Yani düşük enerjili nötronlarla tepkimeye girmez. Ancak enerjisi 1 MeV'den büyük olan hızlı nötronlarla tepkimeye girebilir. Toryumun yakıt olarak kullanılabilmesi için fisil bir madde ile karışması gerekmektedir. Bunun için üç seçenekten biri kullanılmalıdır:

- Th232 - U 235 karışımı: Bu karışımda taze yakıt olarak bilinen belirli bir zenginlikteki uranyuma (U-235 ve U-238 karışımı) toryum katılır ve yakıt elde edilir.
- Th232 - Pu 239 (ve Pu-241) karışımı: Plütonyum doğada bulunmayan yapay bir elementtir. Nükleer reaktörde uranyumun yanması sonucu ortaya çıkan plütonyum Kullanılmış nükleer yakıtlardan ayrıştırılarak elde edilir. Yani Reprocess işlemi olmadan plütonyum elde edilemez. Plütonyum elementi (Pu-239 ve Pu241) toryum ile karıştırılarak yeni bir yakıt elde edilmektedir.
- Th232 - U 233 karışımı: U-233 doğada bulunmaz. U-233 reaktörde Th-232'nin yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda böyle bir karışım yapabilmek için öncelikle birinci veya ikinci sıradaki karışım ile yakıt elde etmek ve sonrasında da ortaya çıkan U-233'ü ayırmak gerekmektedir. Denklem 3.2 Th-232'den U-233 oluşumunu göstermektedir.

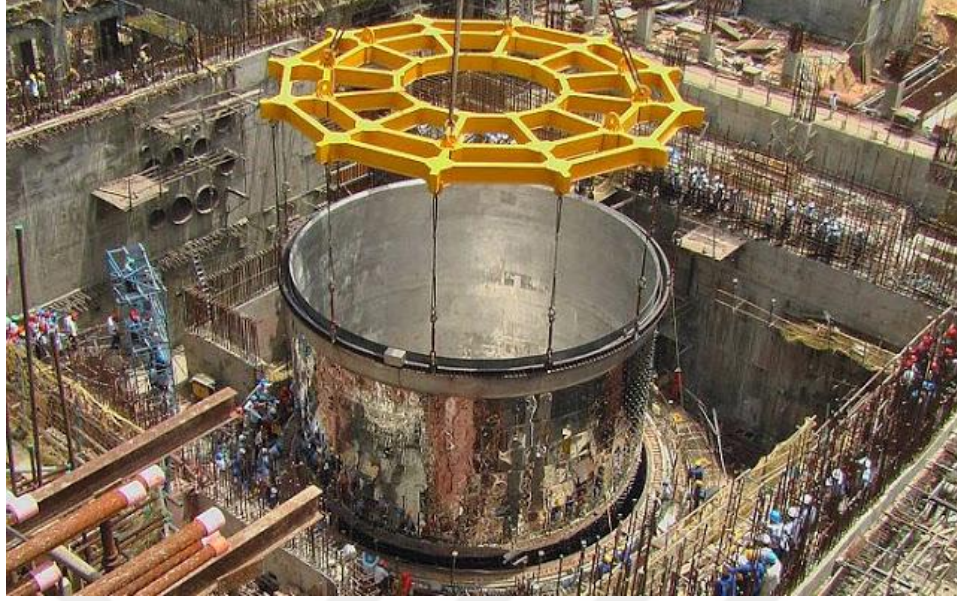


Fisil bir izotop olan U-233 ile Th-232 karışımı yeni bir yakıt olarak ortaya çıkmaktadır. Bu aşamalardan da anlaşılacağı üzere bu seçenek toryum yakıtları içerisindeki en zor ve en son kullanılan seçenektir.

Toryum yakıtlarındaki toryum oranı arttıkça daha fazla miktarda ve daha yüksek zenginlikte uranyum gerekmektedir. Böylece toryum miktarının artması maliyetin yükselmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca günümüzde kullanılan ‘Basıncılı ve Hafif Sulu Reaktörler (PHWR)’de toryum kullanılması ekonomik ve teknolojik olarak mümkün görünmemektedir. Toryum kullanımının yaygınlaşması için öncelikle kapalı çevrimin yaygınlaşması ve plütonyum ile U-233 karışımı yakıtların cazip hale gelmesi gerekmektedir (Zabunoğlu O. , 2014).

Toryumu değerli kılan özellikler; doğada uranyuma nazaran bol miktarda bulunması ve uranyuma göre daha az uzun ömürlü radyoaktif atık üretmesi olarak sayılabilir. Toryum yakıt döngülü araştırma reaktörleri Almanya, Hindistan, Kanada, Japonya, Çin, Hollanda, Belçika, Norveç, Rusya, Brezilya, İngiltere ve ABD tarafından kullanılmıştır ve bazı ülkeler bu çalışmalara devam etmektedir (WNA, 2016). Ayrıca 2009 yılında CERN’de ilk toryum yakıtlı enerji yükseltici reaktörü tasarlanmıştır (Nükte, 2016). Şekil 3.5’te ise Kanada’da toryum ile çalışan hızlı üretken nükleer reaktörü (FBR)’nin kuruluş aşaması gösterilmektedir.

Toryum yakıtı üzerine çalışma yapan ülkelerin başında ise Hindistan gelmektedir. Hindistan’ın büyük oranda toryum kaynağına ve kısıtlı miktarda uranyuma sahip olması bu alana doğru yönelmesine sebep olmuştur. Fakat Hindistan 2008 yılında uluslararası Uranyum pazarına erişim imkânına kavuşunca toryum yakıt döngüsünü ticarileştirme isteği ve çalışmalardaki hız azalmıştır (Charles, 2011).



Şekil 3.5. Kanada'nın hızlı üretken toryum reaktörü (MAPS)

Dünya genelinde var olduğu tahmin edilen Toryum kaynakları Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Dünya genelinde var olan 6.355.000 tonluk toryum azımsanmayacak bir miktardır.

Tablo 3.3. Ülkeler bazında dünya genelinde tahmin edilen toryum kaynakları, (WNA, 2016).

Ülke	Toryum (Ton)	Ülke	Toryum (Ton)
Hindistan	846.000	Rusya	155.000
Brezilya	632.000	Güney Afrika	148.000
Avustralya	595.000	Çin	100.000
ABD	595.000	Norveç	87.000
Mısır	380.000	Grönland	86.000
Türkiye	374.000	Finlandiya	60.000
Venezuela	300.000	İsveç	50.000
Kanada	172.000	Kazakistan	50.000
		Diğer Ülkeler	1.725.000
Dünya Toplamı		6.355.000 Ton	

Kapalı çevrimin yaygınlaşması, uranyum rezervlerinin tükenmesi ve toryumun daha etkin kullanılması ilgili teknolojik çalışmalar toryum kaynağının kullanılmasını hızlandıracaktır.

Türkiye’de toryum üzerine yapılan arama çalışmaları da yine 1980’li yıllarda MTA’nın yapmış olduğu çalışmalardır. Bu arama faaliyetlerine göre Türkiye’de Eskişehir’in Sivrihisar ve Kızılcaören mevkiilerinde toplam **380.000 ton** %0.21 tenör oranına sahip ThO₂ olduğunu saptamışlardır. Yeniden arama çalışması yapılması sonucunda bu miktarın iki katına çıkabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca yapılan bazı çalışmalar neticesinde Malatya-Hekimhan bölgesinde de toryum yataklarının olduğu düşünülmektedir (DPT, 1996).

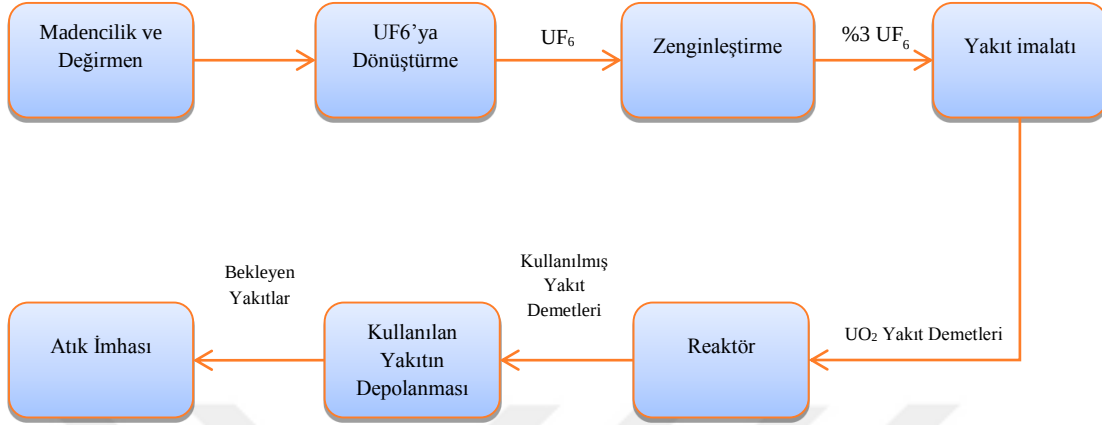
Türkiye’de toryum rezervlerinden bahsetmek doğru bir yaklaşım değildir. Rezerv ile kaynak çoğu zaman karıştırılmaktadır. Bir kaynağın rezerv haline gelebilmesi için iki koşulu sağlaması gerekmektedir: Birincisi, üretim maliyetinin bilinmesi yani kilogramının kaç liraya üretilebileceği ve ikincisi de bu madenin bir piyasa değerinin olmasıdır, yani dünyada alınıp satılıyor olması gerekmektedir. Toryum için bu iki koşul da sağlanmamaktadır. Çünkü toryum hali hazırda kullanılan bir nükleer yakıt değildir. Bu sebeple toryum için rezerv değil kaynak ifadesini kullanmak daha doğru olacaktır. Toryum şu anda sırasını beklemekte olan bir yakıttır. Türkiye toryum teknolojisinin gerisinde kalmamalı, bu alanda çalışmalara şimdiden başlaması gerekmektedir (Zabunoğlu O. , 2015).

3.2. Nükleer Yakıt Çevrimi

Nükleer yakıt çevrimi, uranyumun madenlerden çıkartılıp işlenmesi, zenginleştirilmesi, yakıt imalatının yapılması, kullanılan yakıtların reaktörden çıkartılıp yeniden işlenmesi gibi bütün süreçleri kapsamaktadır. Dünya genelinde kullanılan iki tür yakıt çevrimi vardır: *Açık (Tek Geçişli) Yakıt Çevrimi* ve *Kapalı Yakıt Çevrimi*.

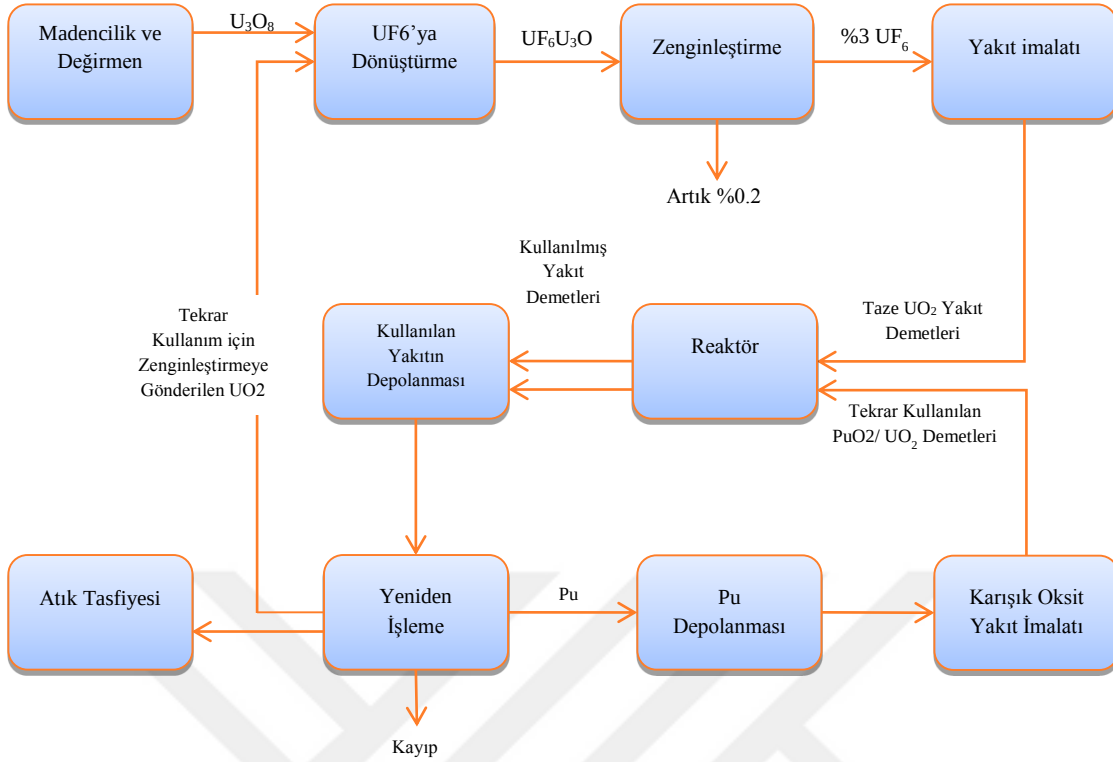
Açık yakıt çevriminde madenden çıkıp işlenerek üretilen yakıtlar reaktörde yandıktan sonra birer atık kabul edilir. Depolama havuzlarında uzun yıllar soğumaya bırakılan kullanılmış yakıtlar daimî olarak yer altına gömülme için geçici olarak depolanırlar. Fakat günümüzde henüz daimî gömme işlemi hiçbir ülke tarafından yapılmamıştır. Kapalı yakıt çevriminde ise reaktörden çıkan kullanılmış yakıtlar yeniden işlenmek üzere tesislere gönderilirler. Kullanılmış yakıtlar yeniden işleme tesisinde parçalara ayrılır ve yakıt içindeki kullanılabilir olan uranyum ve plütonyum ayrıştırılır. Geriye kalan yüksek aktiviteli atık ise camlaştırılarak daimî depolanmaya gönderilir. Kapalı yakıt çevrimi açık çevrime göre %10 daha maliyetlidir. Kapalı çevrimin

yapılabilmesi için ileri teknoloji ve büyük tesislere ihtiyaç vardır. Japonya ve Fransa gibi ülkeler yeniden işleme tesislerine en büyük yatırımı yapan ülkelerdir.



Şekil 3.6. LWR açık yakıt çevrimi (Tek geçişli)

Şekil 3.6’da hafif sulu reaktörlerde kullanılan uranyum yakıtı için açık çevrim şeması verilmiştir. Dünyadaki birçok ülke şu anda açık çevrimi kullanmaktadır. Fakat ileriki yıllarda uranyum madenlerinin tükenmesi, toryumun aktif olması veya elektrik fiyatlarının artması durumunda, kullanılmış yakıtların yeniden işlenmesi gündeme gelebilir. Bu sebeple hiçbir nükleer ülkesi, kullanılmış nükleer yakıtlarını daimi depolama yoluna gitmemiştir. Günümüz şartlarında yeniden işlemenin önündeki en büyük engel yüksek maliyet ve ayrıştırma sonucu elde edilen elementler ile nükleer silahların yolunu açmaktır. Şekil 3.7’de ise kapalı çevrimin aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.7. LWR yeniden işleme (Kapalı çevrim)

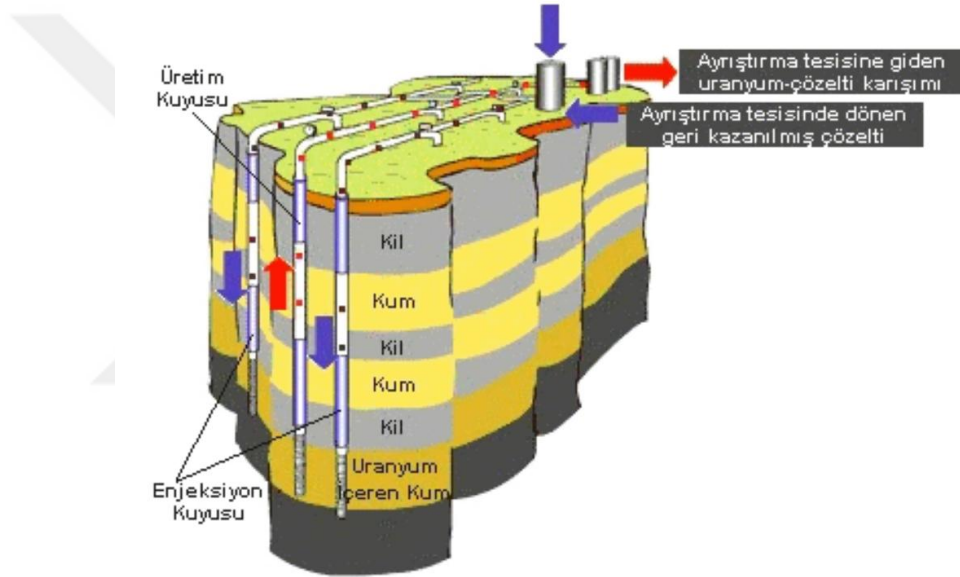
Yakıt çevrimi genel olarak şu aşamalardan oluşur: madencilik, satın alma, hazırlama, kullanma ve nihai depolama. Yakıtın reaktörde kullanımında önceki aşamasına reaktör öncesi (ön uç), reaktörden çıkarılmasına sonraki bölüme ise reaktör sonrası (arka uç) denilir (Lamarsh & Baratta, 2001).

3.2.1. Uranyum Madenciliği, Arıtma ve Dönüştürme Tesisleri

Yakıt çevriminin ilk aşaması madenciliktir. Uranyum az miktarda bile olsa toprak, kaya ve suda bulunmaktadır. En büyük uranyum madenleri Avustralya, Kanada ve Avrupa'nın bazı bölgelerinde bulunmaktadır. Uranyum topraktan filizler şeklinde çıkartılır. Madencilikte en çok kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar *Açık Madencilik*, *Yeraltı Madenciliği* ve *In-Situ Madenciliği*'dir.

Açık madencilik, uranyumun yeryüzüne yakın olduğu yerlerde (70-80 metre) yapılır. Alınan uranyum filizleri kamyonlara yüklenerek madenin yakınındaki arıtma tesislerine götürülür. Eğer uranyum daha derindeyse yeraltı madenciliği tercih edilmektedir. Yeraltı madenciliğinde yere 100 metre uzunluğunda delikler açılır, bu

delikler havalandırılır ve en alt kısım dinamitlenerek aşağıda bir yığın oluşturulur. Özel aletlerle uranyum cevheri yüzeye çıkartılır. Bu yöntemde çok fazla su ve enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. In Situ Madenciliği ise maliyeti daha az olan kolay bir yöntemdir. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi madenin olduğu yere delikler açılır ve bu deliklerden aşağıya asit ve alkalın çözeltileri gönderilir. Çözeltide eriyen uranyum borular yardımıyla yüzeye çıkartılır. Daha sonra artıma tesisinde uranyum ve çözelti birbirinden ayrılır. Uranyum kullanılmak üzere tesiste bırakılır, çözelti ise yeniden In Situ sistemine geri gönderilir. Bu yöntemin dezavantajı yer altı sularına zarar verme ihtimalinin olmasıdır. Bu yöntem madenciliğinde önlemler üst seviyede tutulmaktadır (Tsoulfanidis, 2013).

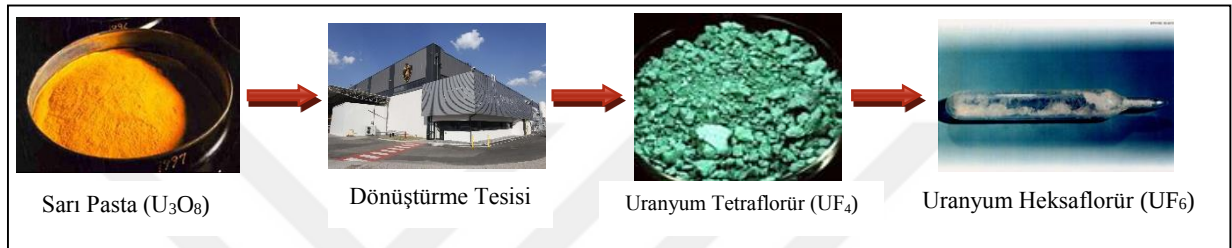


Şekil 3.8. In situ Madenciliği

Uranyum madeni seviyeleri ölçülerek kamyonlarla artıma tesisine ulaştırılır. İlk olarak parçalama işlemi yapılır. Küçük parçalar haline gelen uranyum daha sonra ıslak öğütme bölümünde öğütülüp çamur kıvamına getirilir. Daha sonra oksitlenme ve asitlenmeye tabii tutularak uranyum sülfürik asit çözeltisine çevrilir. Çözelti, çözücü özütlemesi haline geldikten sonra gaz amonyak eklenerek amonyum diuranit çökeltmesi meydana getirilir. Amonyum diuranit sarı hamur şeklinde süzülür ve 700 C’de ısıtılarak sarı renkli toz halde uranyum oksit (U_3O_8) oluşturulur. Bu toza nükleer yakıt dilinde sarı pasta denilmektedir. Sarı pasta 200 litrelik varillere doldurularak dönüştürme tesislerine gönderilirler (Tsoulfanidis, 2013).

3.2.2. Dönüştürme ve Zenginleştirme Tesisleri

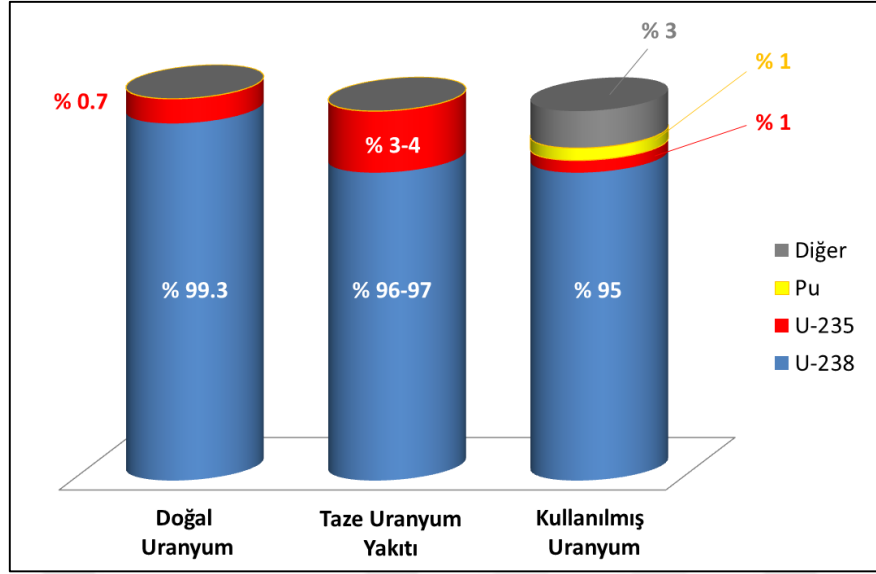
Dönüştürme tesisleri ABD, Fransa, İngiltere ve Rusya’da bulunmaktadır. Toz halinde gelen sarı pasta dönüştürme tesisinde “Uranyum Heksalforür (UF_6)”e dönüştürülür. Önce sarı pasta içerisindeki parçacıklar temizlenir. Sarı pasta ıslak veya kuru olmak üzere iki yöntemle önce UF_4 daha sonra da UF_6 ’ya çevrilir. Dönüşüm işlemi en basit şekilde Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Uranyum dönüşüm aşamaları

Islak yöntemde önce uranil nitrat çözeltisi elde edilir daha sonra çöktürme sonrası Amonyum Diuranit oluşur. Amonyum Diuranit indirgenerek Uranyum Dioksit (UO_2) tozu oluşturulur. Katı yöntemde ise direkt indirgeme yapılarak UO_2 elde edilir. UO_2 hidrojenli florlama ile yeşil tuz diye bilinen UF_4 oluşur. UF_4 gaz florür ile tepkimeye sokularak sıvı UF_6 oluşturulur. Oluşan UF_6 5-6 gün boyunca soğutulmaya bırakılır. Soğuduktan sonra katı kristal haline gelir. 14 tonluk katı UF_6 varilleri zenginleştirme tesislerine gönderilirler.

Doğal ortamda bulunan uranyumun %99.3'lük kısmı U-238 izotopu v %0.7'lik kısımda U-235 izotopundan oluşmaktadır. U-238 fertil bir izotoptur ve günümüz ticari reaktörlerinde yakıt olarak kullanılamazlar. Uranyumun yakıt olarak kullanılması için U-235 oranının % 3-5 civarında olması gerekmektedir. Şekil 3.10'da madenden çıkan doğal uranyum, zenginleştirilip yakıt haline getirilmiş uranyum ve reaktör sonrası yanmış yakıtın element bazında yüzdelerini içeren şeması verilmiştir.

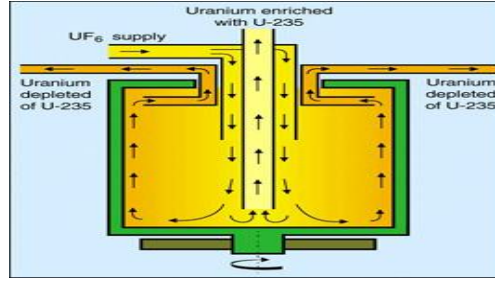


Şekil 3.10. Uranyumun doğal, yakıt ve yanmış halinin içeriği

Uranyum zenginleştirmenin birkaç metodu olsa da bunlardan sadece ikisi ticari hale getirilebilmiştir. Bunlar; *Merkezkaç Ayırıştırma* ve *Gaz Yayınımlı Ayırıştırma* metotlarıdır. Son zamanlarda ise gaz yayınımlı ayırıştırma tesislerinin de merkezkaç ayırıştırma tesislerine dönüştürme durumu gündeme gelmiştir. Bu metot, gaz yayınımlı ayırıştırmaya göre 10 kat daha az enerji harcamaktadır ve daha az aşamadan meydana gelmektedir. Bu yöntemdeki zorluklar ise çok hızlı dönüşten kaynaklı denge problemleri ve merkezkaç dayanıklı malzeme seçimidir. Bu sebepten bu bölümde, sadece dünya üzerinde en çok kullanılan merkezkaç ayırıştırma metodu üzerinde durulmuştur. Bu metot Rusya, Çin, İngiltere, Japonya ve Almanya tarafından kullanılmaktadır.

Zenginleştirme tesisine gelen katı haldeki UF₆ varilleri, 85 C’de ısıtılarak gaz haline getirilir ve bu gaz döner silindirler içerisinde çok yüksek bir hızda döndürülmektedir. Bu silindirler peş peşe ve birbirine bağlıdır. U-235 daha hafif olduğu için merkezde, U-238 ise kenarlarda birikmektedir. Şekil 3.11’de merkezkaç ayırıştırma yönteminde kullanılan bir silindir gösterilmektedir. Sol üst köşeden taze UF₆ girmekte ve yüksek bir hızda döndürülmektedir. Ortada toplanan U-235 tam orta bölgedeki borulardan yukarı doğru çekilip ayrıştırılır. Sağ ve sol taraflarda kalan borulardan ise U-235 açısından fakirleşmiş UF₆ gazı çıkmaktadır. Zenginleşmiş UF₆ gazı besleme tanklarına, fakirleşmiş gaz ise artık uranyum tanklarına gönderilir. Artık uranyum tanklarındaki U-235’ce fakir olan gaz, kapalı çevrim kullanan ülkelerde Plütonyum ile karıştırılarak karışık oksit yakıt

(MOX) üretiminde kullanılır. Açık çevrim kullanan ülkelerde ise variller açık bir depolama sahasında saklanır.



Şekil 3.11. Merkezkaç ayırıştırma yöntemi

Zenginleşen UF₆ gazı tekrar soğutularak sıvı hale getirilir ve homojenleştirilir. Bir dizi işlemin ardından, sıvı hale getirilen UF₆ gazı 1.5 tonluk varillere doldurulur. Bu varillerdeki sıvı soğutularak katı hale getirilmesi sağlanır. Zenginleştirilmiş uranyum varilleri, yakıt üretimi için yakıt tesislerine gönderilmektedir (Tsoulfanidis, 2013).

Uranyum zenginleştirme işlemi, sadece nükleer güç reaktörlerinde kullanılmak için yapılmaz. CANDU reaktörleri için uranyum hiç zenginleştirilmezken, nükleer kaynaklı silahlar için % 20'den yüksek oranda zenginleştirme gerekmektedir. Bu oranların bazıları Tablo 3.4'te gösterilmektedir. Örneğin, İran'ın uranyum zenginleştirme olayı bir dönem uluslararası arenada çok tartışılmış ve İran'a ambargo uygulanmıştı. Bunun sebebi, İran'ın yaptığı çalışmalar hakkında, ısrarla Uluslararası Atom Enerji Ajansı'na bilgi vermemesiydi. Bu gizlilik, İran'ın gizlice uranyumu % 20 üzerinde zenginleştirip atom bombası ya da güçlü nükleer silah üretimine geçtiği olarak algılandı. Atom bombası yapmak için % 90 oranında zenginleşmiş uranyum veya 8 kg plütonyum yeterlidir (Nükte, 2016).

Tablo 3.4. Uranyumun zenginlik oranına göre kullanım alanları

Zenginleştirme Oranı	Kullanım Alanı
Zenginleştirme Yok (Doğal Uranyum)	CANDU Reaktörlerin Yakıtı
%0.9-2 Arası Zenginlik	Yeni Nesil CANDU Reaktörlerin Yakıtı
% 3-5 Arası Zenginlik	PWR-BWR Tipi Hafif Sulu Reaktörlerin Yakıtı
% 5-20 Arası Zenginlik	Sivil / Askeri Araştırma Reaktörleri
% 20'den Yukarı Zenginlik	Nükleer Silahlar, Uçak Gemileri, Hızlı Nötron Reaktörleri, Denizaltılar

3.2.3. Nükleer Yakıt Fabrikasyonu

Uranyum madeni, zenginleştirme tesislerinde zenginleştirilerek, varillerde katı UF₆ getirilir ve bu variller yakıt imalat tesislerine gönderilir. Katı UF₆, bir sızı işleminden geçirilerek toz şeklindeki Uranyum Dioksit (UO₂) haline getirilir. UO₂ daha sonra çapı 9 mm ve boyu 1.3 cm civarında olan peletlere çevrilip sıkıştırılır ve yüksek sıcaklıkta pişirilerek sağlam bir yapıya dönüştürülür.

Peletler, her biri yaklaşık 3.5-4 metre uzunluğunda ve çapı yaklaşık 1 cm olan yakıt çubuklarına doldurulur. Daha sonra bu yakıt çubuklarından yaklaşık 200-250 adeti bir araya gelerek yakıt demetlerini oluşturur. Yakıt demetleri farklı tasarımlara göre değişebilmektedir. PWR da kullanılan yakıt demetleri yaklaşık 500 kg gelmektedir. Şekil 3.12’de tipik bir PWR yakıt demeti Şekil 3.13’de ise ülkemize kurulacak VVER yakıt demeti gösterilmektedir.



Şekil 3.12. 17x17 PWR nükleer yakıt demetleri



Şekil 3.13. VVER yakıt demeti

Üretilen yakıt demetleri, nükleer santrallere genelde karayolundan kamyonlar ile taşınmaktadır. Ayrıca tren yolu, deniz yolu ve çok nadir de olsa hava yoluyla da taşınmaktadır. Taze yakıtların radyoaktivitesi çok yüksek olmadığı için, taşınırken özel bir koruma zırhına ihtiyaç duymazlar. Santrale gelen yakıtlar reaktör korundaki yerlerine yerleştirilirler. PWR'ler de genel olarak 18-24 ayda bir taze yakıt yükleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem için santralin kapatılması gerekmektedir. Yakıt yükleme sırasında, yanmış yakıtlar çıkartılır ve yerleri değiştirilerek yenileri yerleştirilir. Santral kapalıyken, diğer bütün parçalar gözden geçirilir ve bakımlar yapılır. Bu bakım süreci yaklaşık 3-6 hafta sürmektedir. Fakat CANDU reaktörlerinde yakıt değişimi için reaktörün kapatılmasına gerek duyulmamaktadır. Her şey otomatik cihazlar ile yapılmaktadır (NED, 2016).

Nükleer programını başlatmış ülkelerin çoğunda yakıt imalat tesisi bulunmaktadır. Rusya, ABD, Japonya, Fransa, İngiltere, Arjantin, Kanada, İtalya, G.Kore, Meksika, İspanya gibi ülkeler bunların önde gelenleridir. Türkiye, ilk üç santrali kurabildiği takdirde, yapılması gereken ilk işlerden biri yakıt imalat tesisinin kurulması olmalıdır.

3.3. Kullanılmış Nükleer Yakıtlar (KNY) ve Atıklar

Santrallerin yakıt çevriminde farklı şekillerde radyoaktif atık üretilir. Bunlar uranyum madenciliği, yakıtın imalatı, reaktörün işletilmesi, kullanılmış yakıtın işlenmesi ve geri kazanılan malzemelerin yeniden reaktöre yüklenmesi sırasında oluşan atıklardır. Fakat nükleer santraller, radyoaktif yakıtların tek kaynağı değildir. Tıpta kullanılan radyoaktif ilaçlar, sanayi ve endüstri ürünleri önemli bir atık oluşturmaktadır. Ayrıca nükleer silah programlarının sonucunda önemli miktarda atık oluşmaktadır. Atıklar genellikle dört kategoride sınıflandırılmaktadırlar.

- Yüksek seviyeli atık: Fisyon ürünlerinin çoğunu içeren kullanılmış yakıtlar ve yeniden işleme sonucunda oluşan atıklardır.
- Transuranik(TRU) atık: Çoğunlukla 10^{-9} Ci/g aşan konsantrasyona sahip plütonyum izotoplarıdır. TRU atıklar reproses-recycle, plütonyum yakıt imalatı ve nükleer silah yapımı sırasında üretilirler.
- Düşük aktiveli atık: Konstarasyonu 10^{-9} Ci/g düşük olan atıkları içerir. Az zırhlama gerektiren veya hiç zırhlama gerekmeyen fakat hala tehlikeli malzemeler içeren atıklardır.
- Maden atıkları: Uranyum madenciliği sırasında ortaya çıkan ve doğada bulunun düşük konstrasyondaki atıklardır.

Daha öncede belirtildiği gibi, reaktörden kullanılmış yakıtların çıkartılması aşaması arka uç olarak ifade edilmektedir. Reaktörden çıkan yakıt demetleri kullanılmış yakıt olarak adlandırılmaktadır, çünkü işe yaramayan birer atık durumunda değildirler. Bu demetler dış görünüş itibariyle yanmamış taze yakıtlarla aynıdır. Yakıt çubukları içindeki uranyum peletlerinin %5'i yanmış olarak çıkmaktadır (Zabunoğlu O. , 2015). Çıkan bu yakıtların %95'i ise yakıt açısından kıymetli maddelerden oluşmaktadır. Bu ürünlere yakıtça zengin madde içerdiği için atık ibaresi yerine “Kullanılmış Nükleer Yakıt (KNY)” adı verilmektedir. KNY'lar, kapalı çevrimin olduğu ülkelerde, yeniden işleme tesislerinde ayrıştırılarak Karışık Oksit Yakıtı (MOX) şekline dönüştürülürler.

3.3.1. Yeniden İşleme ve Kullanım (Reprocess &Recycle)

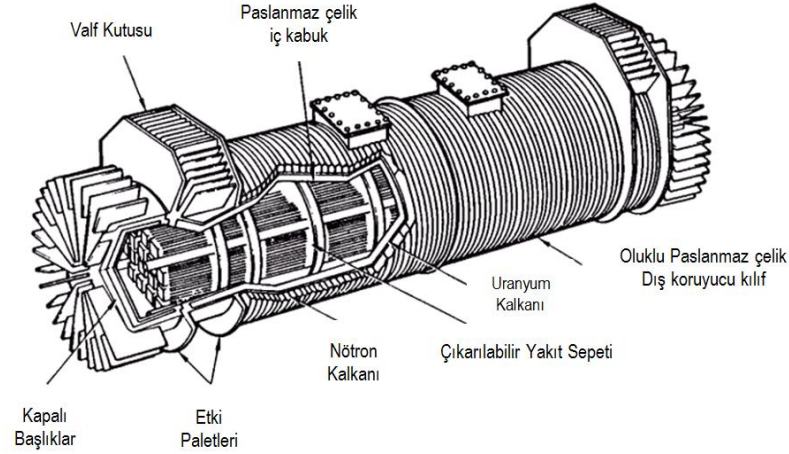
Kullanılmış nükleer yakıtları bileşenlerine ayırmaya yeniden işleme (Reprocess) denilir. Bu bileşenler; uranyum, fisyon ürünleri ve plütonyumdan meydana gelmektedir. Yeniden işleme için fiziksel ve kimyasal metotlar kullanılmaktadır. Şekil 3.14'te Fransa'da

bulunan bir geri dönüşüm tesisi görülmektedir. Havuzlara alınan KNY'lar işlenmek için beklemektedir.



Şekil 3.14. Dünyanın en büyük nükleer atık geri kazanım tesisi, Fransa (Planet Ark, 2016).

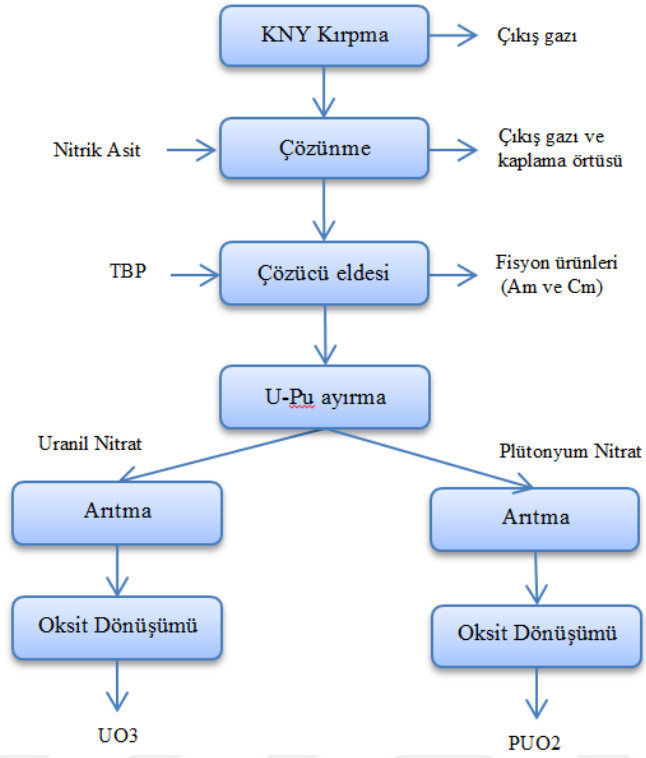
Şekil 3.15'te gösterilen şekildeki bir taşıma varilinden gelen kullanılmış yakıt, daha fazla bozunabilmesi ve soğuması için havuzlara aktarılır. Yeterli soğuma ve bozunmadan sonra sisteme entegre edilen mekanik kesme makineleri ile yakıt çubukları 3 cm uzunluğundaki parçalar halinde kesilir. Bu parçalar, UO_2 çözmek ve yakıt çubuğu etrafını saran zirkonyum alaşımı kabuklardan ayırmak için nitrik asit bulunan bölmelere düşer. Daha sonra ön filtreleme işleminden gelen sulu bir çözelti, çözücü işleme devam eder. Bu çıkarma işlemine PUREX denilmektedir.



Şekil 3.15. Kullanılmış yakıt taşıma kabı, (U.S. NRC, 2016).

PUREX ile plütonyum ve uranyumun geri kazanımında çözücü, gaz yağı ile seyreltilen organik bileşik Tributyl Fosfattır (TBF). Kullanılmış yakıtın bileşenlerine ayrılması Şekil 3.16’de gösterilmiştir. Çıkan uranyum, doğal uranyumdan daha yoğun bir U-235 içeriğine sahiptir. Uranyum bir kenara konulabilir veya izotop ayırma işleme ile yeniden zenginleştirilebilir. Çıkan plütonyum ise reaktör yakıtının tümü veya bir kısmını içeren bir karışık oksit (MOX) oluşturacak uranyum oksit ile birleştirme için uygun bir oksite dönüştürülür.

Fransa, Almanya, İngiltere, Rusya, Kanada, Japonya gibi ülkeler aktif yeniden işleme tesislerine sahiptirler. Yeniden işlemenin önemli bir özelliği ise, geri dönüştürülen plütonyumun bir nükleer silah malzemesi olmasıdır. Nükleer silahlardan duyulan endişelerden dolayı, dönemin ABD başbakanı olan Carter 1977 yılında yeniden işleme işleminden vazgeçilmesi gerektiğini savundu ve bu işleme yasak getirmiş fakat daha sonra 1981 yılında Başkan Reagan bu yasağı kaldırmıştır. Fakat belirsizlikler yine de devam etmiştir. ABD, Yucca dağındaki daimî depolama yerini şu anda bekletmeye almış durumdadır. Zira gömülecek tonlarca kullanılmış yakıtın içerisinde %95 oranında kullanılabilecek yakıt durmaktadır.



Şekil 3.16. PUREX nükleer yakıt yeniden işleme sürecinin basitleştirilmiş diyagramı

Öte yandan silahlanma endişesi yeniden işlemenin önünde bir engel gibi görünmektedir. İleriki zamanda gelişen teknoloji ile bu belirsizlikler netleşecektir (Muray ve Holbert, 2014). Üretilen MOX yakıtı şu anda FBR’lerde kullanılabilir. FBR reaktörlerin ticarileşmesi 2050’leri bulacaktır. FBR’lerde daha fazla Pu-239 üretilmekte ve bu reaktörler ile kapalı çevrim tesislerinin yaygınlaşması beklenmektedir.

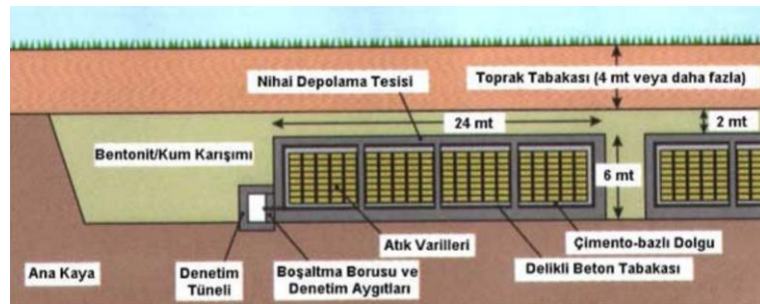
3.3.2. Atıkların Tasfiyesi

3.3.2.1. Düşük Seviyeli Atıkların Tasfiyesi

Düşük ve yüksek aktiviteli atıkların yok edilmesi farklı şekillerde gerçekleştirilir. Daha öncede bahsedildiği gibi düşük veya orta seviyedeki atıklar, santral veya hastanelerden çıkan eldiven, elbise gibi katı; dezenfekte kullanılan sıvılardır. Bu atıklar, tesislerde kontrollü bir şekilde bekletilerek aktiflik seviyesinin düşmesi beklenmektedir. Daha sonra düşük seviyeli işletme tesislerine gönderilmektedirler. Bu tesislerde katı, sıvı ve gaz şeklindeki atıklar sıkıştırma, yakma ve başka yöntemlerle işlenmekte ve hacimleri azaltılarak varillere doldurulmaktadır.

Atıklar ilk olarak yeşil renkli varillere doldurularak atık işleme tesislerinde bekletilirler. Daha sonra birtakım işlemlere tabi tutulurlar. Katı atıklar yakma ve sıkıştırma yöntemleri ile yaklaşık olarak 1/150 oranında küçültülürler. Sıvı atıklar ise buharlaştırma ve kurutma yöntemleriyle yaklaşık 1/500 oranında küçültülürler. İşlemler sonucunda ortada kalan çamurlaşmış sıvı veya sıkıştırılmış katılar, sarı variller içerisinde çimento ve plastik ile karıştırılıp sabit variller haline getirilir. İşlenmiş sarı atık variller, denetimden geçirilerek radyoaktiflikleri ve yoğunlukları ölçülür. Onay alındıktan sonra 1.6mx3.2mx1.3m ebatlarındaki büyük taşıma kaplarına 8 adet atık varili yerleştirilerek üzeri kapatılır. Kara veya tren yolu ile nihai depolama tesisine gönderilirler. Burada 500 yıl kadar bekletmeye alınacak şekilde depolanırlar. Atık içerisindeki birçok madde 100 yıl içerisinde doğal radyasyon seviyesine inmektedir. İçerikteki geri kalan %20'lik kısım ise 500 yıl kadar sonra radyasyon oranları doğal radyasyon seviyelerine inmektedir.

Taşıma varilleri yerin yaklaşık 12 metre altına, su sızdırmayacak sistemler kullanarak depolanır (Şekil 3.17). Üzeri çimentolanır ve en üst tabakaya toprak örtülür.



Şekil 3.17. Düşük seviyeli atıkların nihai depolanması.

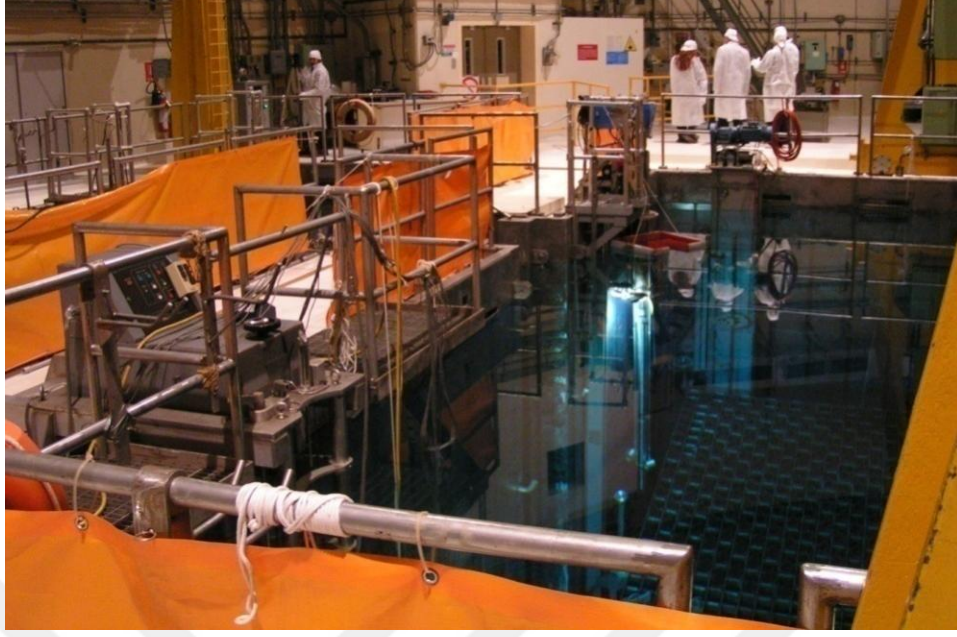
3.3.2.2. Yüksek Aktiviteli Atıkların Tasfiyesi

Yüksek seviyeli atıklar kapalı ya da açık çevrim için farklılık göstermektedir. Açık çevrimde, reaktörden çıkan KNY'ların tamamı birer atık kabul edilir ve yakıt demeti şeklinde önce santral sahasındaki havuzlarda veya santral sahasındaki kuru depolama varillerinde depolanarak soğumaya bırakılır. Bunlar geçici depolama metotlarıdır. Bunun ardından nihai depolama için tahsis edilen bir araziye, çok sağlam bir şekilde kaplanarak gömülür. Bu gömme işlemi yeniden bu yakıtların yeryüzüne çıkmasını engelleyecek şekilde olur.

Kapalı çevrimde ise, KNY'lar havuzlarda yaklaşık 5-10 yıl soğutulduktan sonra yeniden işleme tesisine gönderilirler. Burada, KNY'lar içindeki Plütonyum ve Uranyum ayrıştırılır. Geriye ise yüksek aktiviteye sahip fisyon ürünleri kalır. Bu atık, düşük seviyeli atıklar gibi çimentolanıp depolanamamaktadır. Bu sebepten daha güçlü bir koruma yöntemi olan camlaştırma yoluna gidilir. Camlaştırılarak çelik varillere doldurulan yüksek seviyeli atıklar nihai depolama tesislerine gönderilirler.

Yüksek seviyeli nükleer atıkların depolanması için hemen hemen bütün ülkelerde şu anda uygulanan temelde iki yol vardır: Santral sahasındaki depolama havuzları (Şekil 3.18) ve kuru depolama tesisleri (Şekil 3.19). Bu iki metot da geçici depolama sistemleridir, atıklar için kesin bir çözüm değildir. Fakat hali hazırda hiçbir ülke, atıklarını nihai şekilde yerin 500-1500 metre altına gömmemiştir. Çünkü nükleer programı olan ülkeler, KNY'lar içerisindeki değerli elementleri ileriki bir zamanda işleyebileceğini düşünmektedir. Zira nihai depolanan bir KNY'ın yeniden yer altından çıkarılması imkânsız olmasa bile çok zordur. Yıllarca, Yucca dağında nihai depolama tesisi yapan ve kapalı çevrime karşı olan ABD, nihai depolama için durdurma kararı almıştır (Zabunoğlu O. , 2015).

Geçici depolama havuzları, reaktör binası içerisinde bulunan yaklaşık 8-9 metre derinliği olan havuzlardır. KNY'lar reaktörden çıkar çıkmaz bu havuzlara dikey olarak yerleştirilirler. Demetlerin üzerini 4 metre kadar su kaplamaktadır. Bu su hem soğutmaya hem de güçlü bir zırhlama görevi üstlenmektedir. Bu sayede Şekil 3.18'de de görüldüğü üzere havuz etrafına ciddi bir radyasyon ışıması yapılmamaktadır.



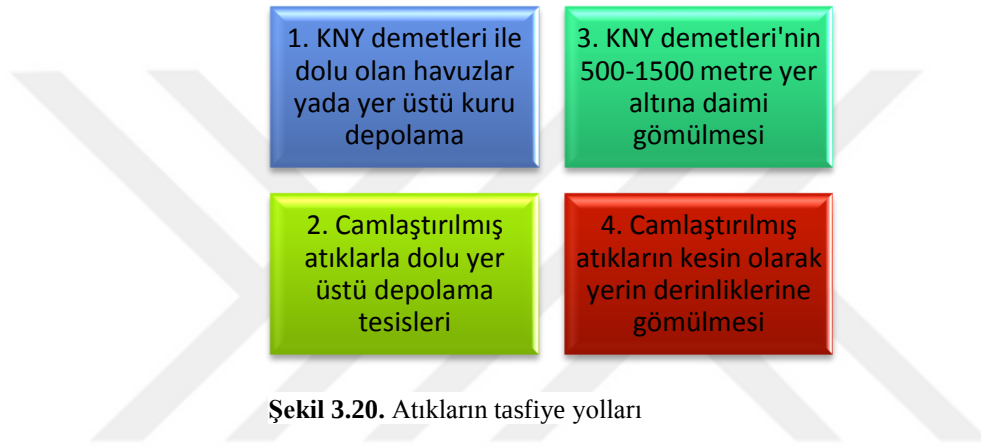
Şekil 3.18. Kullanılmış yakıt havuzları çevresinde çalışan personel

Diğer geçici depolama şekli santral sahası içinde inşa edilmiş veya yakın bir yerde özel olarak tahsis edilmiş depolarda, variller içerisinde depolama yoludur. Kuru depolama diye adlandırılan bu depolama şekli doğal hava sirkülasyonu ile atıkların soğutulmasını sağlar. Şekil 3.19’da gösterilen kuru depolamanın maliyeti ıslak depolamaya göre daha fazladır.

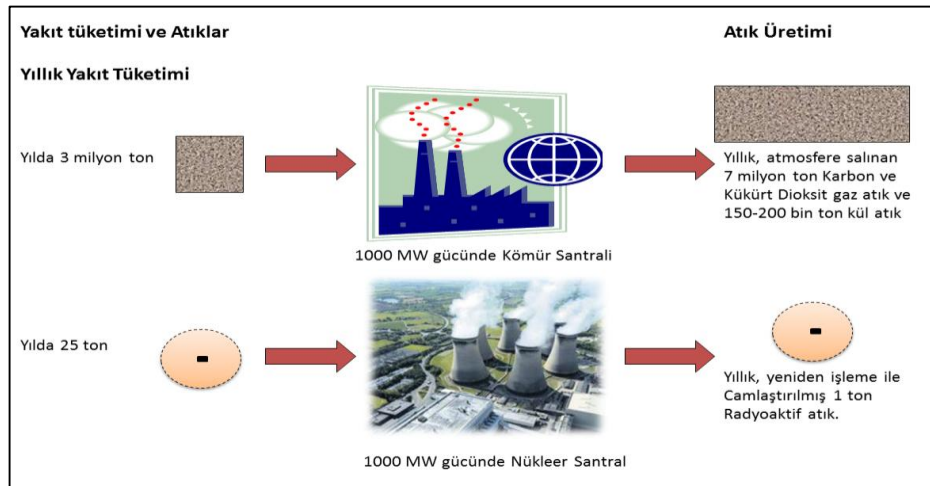


Şekil 3.19. Kuru depolama tesisi

Özetlemek gerekirse, nükleer santralden çıkacak olan atıklar şekil 3.20’de görüleceği üzere dört temel şekilde depolanabilecektir. Birinci ve ikinci depolama yöntemi geçici yöntemler olup, sürekli bakım gerektirecektir. Üçüncü yolda ise, KNY içerisindeki değerli maddeler kullanılamayacak ve ortaya çok büyük hacimde atık bırakacaktır. Örneğin 1200 MW gücündeki bir reaktörden bir yılda, yaklaşık olarak 30 ton KNY veya hacim olarak 3-4 m³ KNY çıkmaktadır. Oysa son yöntem olan camlaştırıp nihai gömme işleminde ortaya yaklaşık olarak 1 ton atık çıkacaktır. Fakat en zor ve en maliyetli yol sonuncusudur.



Bir nükleer santral ile termik santraldeki yakıt ve atık miktarları göz önünde bulundurulursa eğer, nükleer santralin hem daha ucuz hem de daha çevreci olduğu ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.21 iki santral türünü aynı kurulu güçte karşılaştırmaktadır.



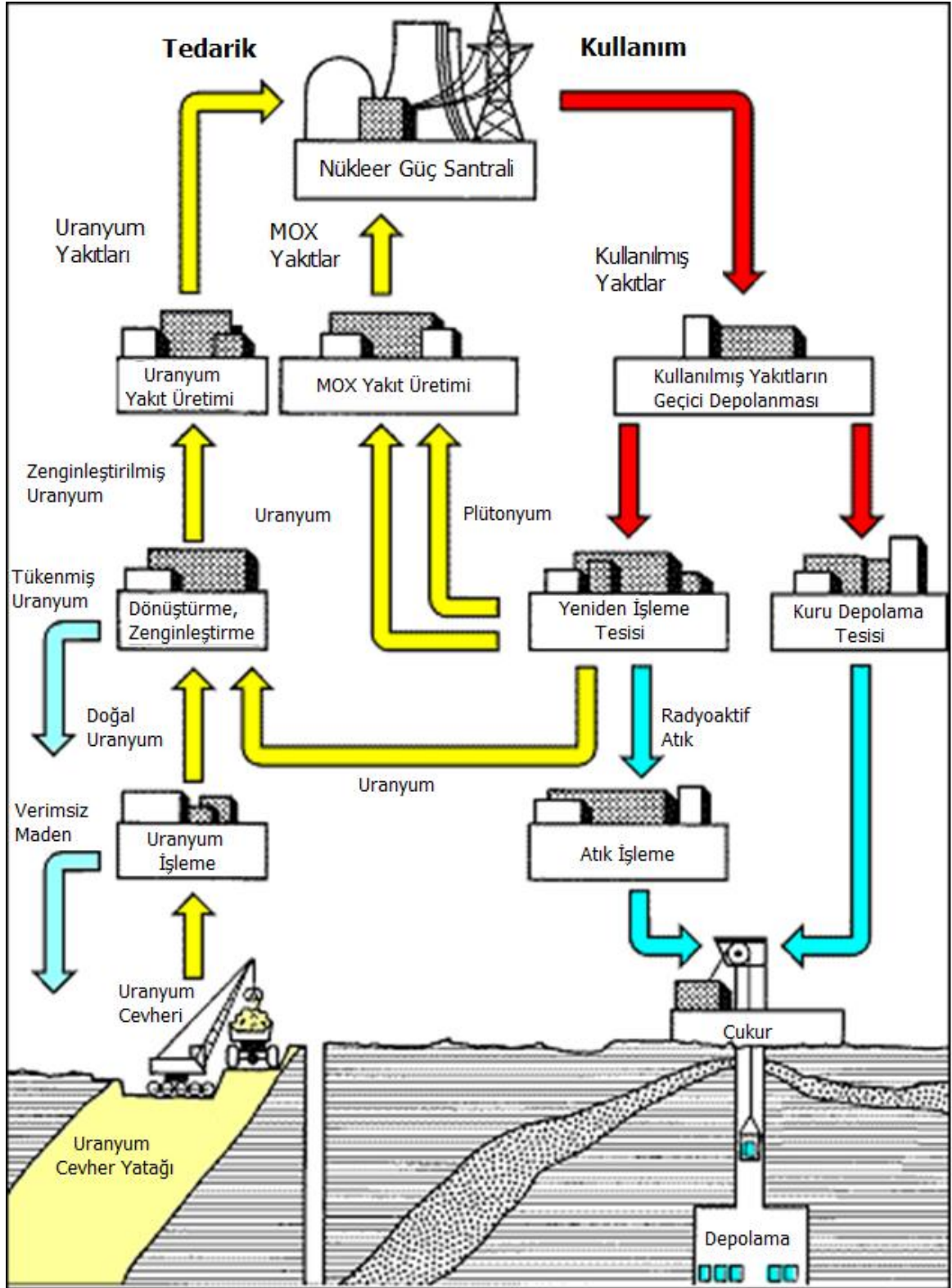
Şekil 3.21. Nükleer santral ile termik santralden çıkan atıkların karşılaştırılması

Atıkların işlenmesi yakıt çevriminin son aşaması olarak kabul edilmektedir. Yakıt çevrimi ve nükleer atıkların bazı miktar özellikleri, World Nuclear Organization'nin web sayfasından uyarlanan Tablo 3.5'den elde edilebilir. Tablo 3.5'e göre, 1000 MW gücündeki bir nükleer reaktöre bir yıl boyunca yetecek, % 3-4 oranında zenginleştirilmiş uranyum yakıtı imal etmek için 20.000-400.000 ton uranyum cevherine ihtiyaç vardır. Bu cevher içerisinde elde edilecek olan UF₆ miktarı yaklaşık 200 ton civarında olacaktır. UF₆, zenginleştirme tesisinde zenginleştirildikten sonra yaklaşık olarak 20 ton civarında kalmaktadır. Zenginleştirilmiş 20 ton civarındaki UF₆, yakıt imalat tesisinde ortalama 25 ton civarında yakıtı dönüştürülür ve bu yakıt reaktörde ortalama 5000 gün yanmaktadır.

Tablo 3.5. Tipik yıllık malzeme dengeleri 1000 MW reaktör, (WNA, 2016).

Yakıt Zenginleştirme (w/o)	%4 - %5
Yanma (MWgün/t)	4500 – 6500
Temin edilen ve atılan yakıt (UO ₂)	27 t – 17.5 t
Zenginleştirilen Uranyum	24 t – 15.6 t
Zenginleştirilen UF ₆	35 t - 23 t
Harcanan UF ₆	253 t - 191 t
Uranyum Cevheri ve Atıkları	20.000 – 400.000 t

Son olarak Şekil 3.22'de uranyumun maden çıkarılması, işlenmesi, yakıt haline getirilmesi ve atıkların gömülmesi aşamalarının tümü gösterilmiş ve bir özet sunulmuştur.



Şekil 3.22. Tüm yönleriyle nükleer yakıt çevrimi, (ENS, 2003).

3.4. Türkiye’de Nükleer Atık Yönetimi ve Geleceği

Enerji üretimi sonunda nükleer santralden muhafaza edilmesi gereken farklı şekillerde ürünler ve atıklar çıkacaktır. Bunlar sırasıyla; kullanılmış nükleer yakıt çubukları, radyasyonlu sıvı atıklar ve eldiven ve giysiler gibi düşük seviyeli katı radyasyon ürünleri. Yine bu atıklar kendi aralarında düşük, orta ve yüksek radyoaktif olarak ayrılabilirler.

3.4.1. Düşük ve Orta Seviyeli Atıkların Tasfiyesi

Santrallerden çıkan düşük seviyedeki radyoaktif sıvı ve katı atıklar, hastanelerde meydana gelen radyoaktif atıklar ile hemen hemen aynı özelliklere sahiptir. Bu atıklar; gaz ve buhar yanında bazı parçacıklar, personelin kullandığı eldiven, kıyafet gibi katı ve o alanda bulunan sıvılardır. Bu atıkların güvenle taşınması, geçici ve nihai tasfiyesi Türkiye Atom Enerjisi Kurumu tarafından yapılmaktadır. Hastanelerdeki radyoaktif atıklar da TAEK tarafından özel araçlar ile alınıp yok edilmektedir.

Gaz atıkların tasfiyesi için kullanılan yöntem filtrasyon sistemidir. Kısa yarı ömürlü olan radyoizotoplar da aktivitelerinin azalması için bir müddet depolarda bekletilirler.

Tıpta üretilen sıvı atıklar genelde kısa yarı ömürlüdür. Bu atıklar, maksimum müsaade edilen sınıra düşüklerinde ve IAEA’nın salıverme limitleri de göz önünde bulundurularak, normal sıvı atıklar gibi ortama salınırlar. Fakat sıvı uzun yarı ömürlü ve orta düzey aktif ise öncelikle kimyasal uygulamalardan geçirilir daha sonra buharlaştırma veya iyon değişimi metoduyla küçük bir hacme çevrilir. Elde edilen radyoaktif konsantre çimentolanıp varillere yerleştirilir ve böylece zararsız hale getirilir.

Katı atıklar; yakılarak veya sıkıştırılarak tasfiye edilirler. Yakılabilir atıklar yakıldıktan sonra kalan küller çimentolanarak zararsız hale getirilir. Sıkıştırılabilen atıklar güçlü bir pres makinesi ile sıkıştırılıp çimentolanır. Yakılmayan ve sıkıştırılamayan katılar ise direkt çimentolanıp varillere yerleştirilir. Varillere yerleştirilen bu atıklar radyoaktifliklerine göre geçici depolarda muhafaza altına alınmaktadır.

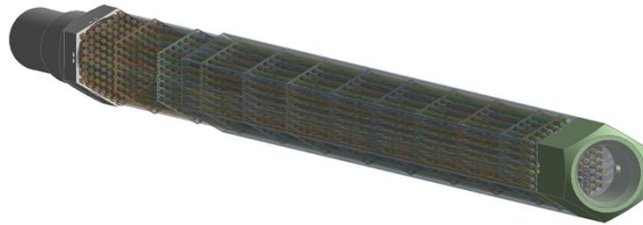
Bütün bu anlatılan depolamalar geçici depolama için geçerlidir. Nihai bir depolama şekli ise bu günkü şartlarda yerin altına gömmek demektir. Düşük ve orta seviyeli atıklar bir süre geçici depolarda bekletildikten sonra yüzeysel derinlikte toprağa gömülerek nihai bir şekilde depolanır. Yüksek aktiviteli atıklar ise yerin en az 500 m altına gömülmelidir.

Daha öncede belirtildiği üzere yeniden işleme söz konusu olduğu için hiçbir ülke yüksek aktiviteli kullanılmış yakıtlarını nihai şekilde depolamamıştır.

Türkiye’de sadece düşük ve orta seviyede radyoaktif atık bulunmaktadır. Bu atıkların çoğu da tıp ve endüstriyel çalışmalar esnasında meydana gelmektedir. 2690 sayılı TAEK kanunun 4. maddesi şöyledir: *Nükleer tesislerden ve radyoizotop laboratuvarlarından çıkan radyoaktif atıkların güvenli şekilde işlenmesi, taşınması, geçici ve sürekli depolanması için gereken önlemleri almak veya aldırarak TAEK’in görev, yetki ve sorumlulukları içindedir.* Bu çerçevede “Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi-(ÇNAEM)” kurulmuştur. ÇNAEM orta ve düşük seviyeli atıkları zararsız hale getirmekle sorumludur. 1989 yılında kurulan atık işleme tesisi bulunmaktadır. Çimentolanarak varillere doldurulan atıklar bu tesisteki geçici depolarda depolanmakta ve gözetim altında bulunmaktadır. Türkiye’de henüz nihai depolama için belirlenmiş bir yer yoktur (TAEK, 2016).

3.4.2. Yüksek Aktiviteli Atıkların Tasfiyesi

Mersin’de kurulacak olan dört reaktörün kullanılmış yakıtları, 25mx50m ebadındaki bir olimpik havuzda depolayacak olursak, kaç yılda bu havuzun dolacağını hesaplamak için reaktördeki yakıt çubuklarının ve yakıt demetlerinin boyutlarının bilinmesine ihtiyaç vardır. VVER-1200 reaktörün yakıt ile ilgili malzemelerinin boyutları Tablo 3.6’da verilmiştir. İşlemler bu tablo kullanarak yapılmıştır. Reaktörde kullanılan VVER yakıt demeti Şekil 3.23’de gösterilmiştir. Çıkan bu demetler, havuzda dik olarak depolanırlar.



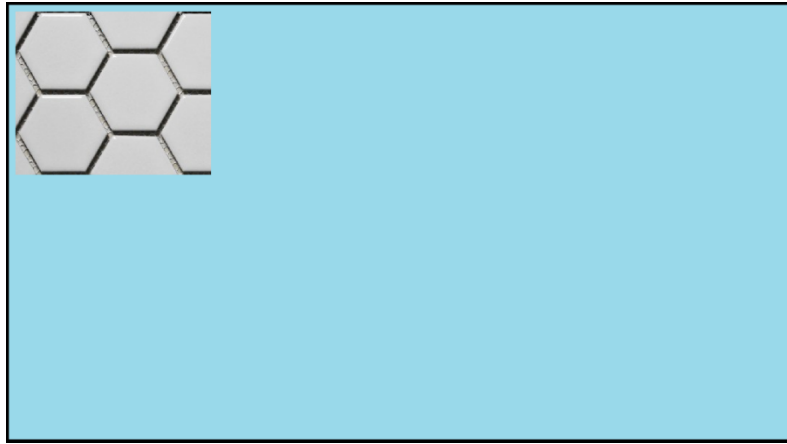
Şekil 3.23. VVER yakıt demeti

Tablo 3.6. Bir VVER reaktörün yakıt boyutları

Malzemenin Cinsi	Boyut
Yakıt Çubuğu Uzunluğu	12 ft (365.8 cm)
Dış Çap	0.374 in. (0.9499 cm)
Kafes kalınlığı	0.496 in. (1.260 cm)
Her bir yakıt demetindeki yakıt çubuğu sayısı	312
Yakıt demeti sayısı	163
Yakıt demetinin bir kenarı	15 cm
Yakıt çubuklarının dizilimi	Altıgen
İki yakıt çubuğu arası mesafe (pitch)	1.5 cm

Kullanılmış nükleer yakıtlar Şekil 3.24'te temsili olarak gösterilen bir havuzda depolanmaktadırlar Altıgen yakıt demetinin bir kenarı 15cm'dir. Her bir yakıt demetinin arasında yaklaşık 1 cm mesafe bırakılmalıdır. Aradaki boşlukta hesaba karatılırsa, bir kenarı 15.5 cm olarak kabul edilebilir. Bir kenarı 15.5 cm olan altıgenin dikey alanı 624.18cm²'dir. Yakıtı bir olimpik havuza depolayabiliriz. Standart bir olimpik havuz ebatları 25mx50m'dir. Havuzun alanı da 12.500.000 cm² olmaktadır.

$$\frac{12500000}{624.18} = 20032$$



Şekil 3.24. Olimpik havuza yerleştirilecek yakıt demetleri (temsili)

Bu hesaplamalara göre, bir olimpik havuz yaklaşık 20 bin adet yakıt demeti depolayabilmektedir. Havuzların derinliği ise 8-9 metre civarında olmalıdır. Yakıt

demetlerinin boyu 4 metredir. Demetlerin üzerinde kalacak olan yaklaşık 4-5 metrelik su, radyasyona karşı zırlama görevi görmektedir.

VVER reaktörlerin yeniden yakıt yükleme periyodu 18 aydır. 18 ayda, üçte bir oranında kullanılmış yakıt çıkar. Yani her yıl 1/4 oranında yakıt demeti çıkartılır. Toplamda bulunan 163 demetin yaklaşık dörtte biri 41 yakıt demetidir. Bir VVER reaktöründen her yıl ortalama 41 yakıt demeti çıkmaktadır.

Akkuyu nükleer santrali, dört ünitenin tamamını işleme koyarsa, her yıl dört üniteden toplam 164 yakıt demeti çıkacaktır. Bir olimpik havuz 20.000 yakıt demetini depolayabileceğine göre $20000/164 = 121$ yıl sonra bu havuz ancak dolacaktır.

Yukarıdaki hesaplardan da anlaşılacağı üzere kullanılmış nükleer yakıtların hacmi oldukça küçüktür. Fakat bu durum nükleer atıkların yok olduğu anlamına gelmemektedir. Bu depolama şekli de nihayetinde geçicidir. Bu havuzlarda uzun süre sonra bekletilen yakıt demetleri, daha öncede belirtildiği gibi ya yeniden işlemeye tabi tutulur ya da yerin 500 m altına bir daha çıkmayacak şekilde gömülür. Mevcut şartlarda görünen en makul yol budur. Buna karşın ABD dâhil hiçbir ülke kullanılmış yakıtları yeraltına gömmemiştir. Çünkü ileride gelişen teknoloji daha iyi metotlar sunabilir.

Türkiye’de kullanılmış yakıtları, santral sahasındaki bir havuzda uzun yıllar saklayabilir. Bu işlem gayet güvenli ve sağlıklıdır. Buna karşın ek bir bakım maliyeti gerektirmektedir. Gelecekteki belirsizliklerden dolayı, şimdiden nihai depolama için de yer seçimi çalışmalarına başlanması gerekmektedir.

3.5. Yakıt Çevriminde Yeni Yaklaşımlar

Terör örgütlerinin plütonyuma ulaşmasını engelleyen çalışmalar devam etmektedir. Daha önce bahsedilen PUREX metodu ile plütonyum saf bir şekilde elde edilmektedir. Bu metoda alternatif olarak UREX+ adlı ayrıştırma metodu plütonyum ile beraber amerikyum, neptünyum ve kuryum gibi diğer aktinitleri de içermektedir. Bu şekildeki element karışımı, atıkları yakmak ve maksimum enerji elde etmek için kullanılacaktır. Ayrıca silah malzemesi olarak kullanımı zorlaşacaktır (Murray ve Holbert, 2014).

Üzerinde çalışılan diğer bir metot ise Nükleer maddelerin hızlı reaktörlerde yeniden işleme tabii tutulmasıdır. Bu işlem sonucunda uranyum ve plütonyum hızlı reaktörlerde yeniden kullanılacaktır. Hızlı reaktörler, hafif sulu reaktörlerde kullanılan yakıtların içinde bulunan uranyum ötesi elementler ile çalışmaktadır. Bu maddelerin hızlı reaktörlerde kullanılması ile birlikte önemli ölçüde atıkları azaltacağı kanıtlanmıştır. Fakat bu metodun kullanılmasının önünde teknolojik ve ekonomik engeller bulunmaktadır (Ülgen vd., 2012).

4. TÜRKİYE'DEKİ NÜKLEER ÇALIŞMALAR

4.1. Nükleer Çalışmalarda Son Durum

Nükleer santral çalışmalarına 1970'li yıllarda başlayan ülkemiz siyasi ve ekonomik sebeplerden ötürü bu alanda ciddi bir adım atamamıştır. Yer etütleri, uranyum ve toryum arama faaliyetleri 1980'li yıllarda tamamlanmıştır. 2004 yılında nükleer enerji tekrar gündem olmuştur. 2005 yılında çalışmaları hızlandıran enerji eski bakanı Hilmi Güler ilk santralin temelini 2007 yılında atılacağını ilan etmiş ve 2007 yılında “Nükleer Enerji Yasası” çıkartılmıştır. Fakat Cumhurbaşkanı Ahmet Necdet Sezer bu yasanın anayasaya aykırı olduğu gerekçesi ile yasayı veto etmiştir (Radikal, 2007). Daha sonradan kanun tekrar meclise gönderilmiş ve 5710 sayılı NGS kurulması ve işletilmesi kanunu kabul edilmiştir. İlgili düzenlemeler ise 2008 yılında yayınlanmıştır. Böylece yasal çerçeve çizilmiştir (Şirin, 2010).

2008 ve 2009 yıllarında yapılan NGS ihaleleri yetersiz talep ve uygun olmayan koşullar nedeniyle iptal edilmiştir (Sabah, 2009). Böylece Türkiye tarihinde dört nükleer santral ihalesi iptal edilmiştir. Bunlar sırasıyla 1979, 1985, 2000 ve 2009 yıllarında yapılan ihalelerdir (ETKB, 2012).

2010 yılında yapılan ihale sonucunda, Mersin Akkuyu Santrali ihalesinin Rus Nükleer Şirketi Ros Atom kazanmıştır. Aynı yıl, Rusya ile Türkiye arasında hükümetler arası antlaşma imzalanmıştır (ETKB, 2012).

Türkiye’de kurulması planlanan ikinci nükleer santral Sinop santralidir. Sinop santrali için çalışmalar 2008 yılında başlamış ve Japon şirketler ile ilişkiler yürütülmüştür. Fakat Fukushima Nükleer kazası sonrasında bu görüşmeler askıya alınmıştır. Daha sonra Mayıs 2013 tarihinde, bir Fransa-Japon konsorsiyumu olan Mitsubishi Heavy Industries (MHI) ve Areva şirketleri ile anlaşma yapılmıştır. Atmea 1 türündeki basınçlı su reaktöründen, her biri 1150 MWe gücüne sahip olan 4600 MWe gücünde toplam dört ünite yapılması planlanmıştır. İlk ünitenin 2017 yılı sonlarında başlanmasına karar verilmiştir (WNA, 2016).

Planlanan üçüncü nükleer santral ise Kırklareli’nin İğneada mevkiine kurulmasına karar verilmiştir. Bu santral için 2014 Kasım ayında, Çin’in Nükleer Güç Teknolojisi şirketi (State Nuclear Technology Corporation-SNPTC) ve Westinghouse şirketi ile görüşmeler yapılmış ve mutabakat sağlanmıştır. Bu santralin inşaa tarihi henüz

belirtilmemiştir. Öncelikli olarak Mersin ve Sinop, daha sonrada aşamalı olarak İğneada'daki santral inşasına başlanacaktır.

Türkiye'nin nükleer santral kurmayı planladığı şehirler, santral türleri, kapasiteleri, başlama ve işletim tarihi Tablo 4.1'de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Türkiye 2023 yılına kadar en az 2 nükleer reaktörü faaliyete geçirmek için çalışmaktadır.

Tablo 4.1. Planlanan ve önerilen nükleer güç santralleri

	Tür	MWe	Başlama Tarihi	İşletim Tarihi
Mersin-Akkuyu 1	VVER-1200	1200	2016 sonu	2023
Mersin-Akkuyu 2	VVER-1200	1200	2017	2023
Mersin-Akkuyu 3	VVER-1200	1200	2018	2024
Mersin-Akkuyu 4	VVER-1200	1200	2019	2025
Sinop 1	Atmea1	1150	2017	2023
Sinop 2	Atmea1	1150	2018	2024
Sinop 3	Atmea1	1150	?	?
Sinop 4	Atmea1	1150	?	?
Kırklareli-İğneada 1-4	AP1000x2, CAP1400x2	2x1250 2x1400	?	?

4.2. Mersin Akkuyu Nükleer Santrali

Akkuyu projesi, enerji çeşitliği ve enerji açığının kapatılması açısından büyük bir önem arz etmektedir. Bu santral antlaşması kapsamında, Mersin'in Gülnar ilçesinin Akkuyu mevkiinde kurulacak santral sahası içerisine her biri 1200 MWe gücüne sahip 4 ünite kurulacaktır. Böylece Türkiye ortalama 4800 MWe kurulu güce sahip bir santrale sahip olacaktır. Yetkili firma, santraldeki ilk iki ünitenin 2023 yılında, diğer iki ünitenin de 2024 ve 2025'de faaliyete geçeceğini bildirmektedir. Santralden sorumlu şirket Akkuyu N.G.S. Elektrik A.Ş.'dir (ANAŞ, 2016).

Enerji Bakanlığı, ülkemizin 2023'te kurulu gücünün 110.000-130.000 MW civarında ve elektrik üretiminin de 500 milyar-kWh olacağını tahmin etmektedir. Ülkemiz elektrik üretimi için kullandığı doğalgaz ve sıvı yakıtların tamamını ithal etmektedir.

Ayrıca kullanılan kömüründe yaklaşık %30'u ithal edilmektedir. Öte taraftan, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki verim düşüklüğü ve henüz çalışmaların yeterince ekonomik olmaması nedeniyle istenilen elektrik üretimi gerçekleştirilemeyecektir. Sıralanan bu sebeplerden dolayı, nükleer enerji bir alternatiften çok zorunluluk haline gelmektedir. Akkuyu nükleer santralinin bir yılda üreteceği elektrik enerjisi aşağıdaki hesaplamalara göre:

Türkiye'nin 2015 verilerine göre elektrik üretimi 236.191.588 MWh'tir. 1200 MWe gücündeki bir reaktör, % 90 verimle (kapasite faktör) çalıştığı zaman bir yılda üreteceği elektrik miktarı;

$$365 \text{ gün} \times 24 \text{ saat} \times 0.90 \times 1200 \times 10^6 \text{ W} = 9.4608 \times 10^9 \text{ kWh}$$

Akkuyu'daki bir ünite yıllık ortalama 9.5 milyar kWh elektrik üreteceğine göre, dört ünitenin tamamı faaliyete geçtiği zaman yaklaşık 40 milyar kWh elektrik üretimi gerçekleşecektir. Ayrıca Sinop'taki santral de faaliyete geçerse bu değer iki katına çıkacak yani 80 milyar kWh elektrik üretilmiş olacaktır. 80 milyar kWh ise Türkiye'nin mevcut elektrik üretiminin % 25'ine tekabül etmektedir.

Türkiye, santralin kurulması aşamasında mümkün olduğu kadar yerli kaynakların kullanılmasına çalışmaktadır. Bu bağlamda Mersin Akkuyu santralinde, ilk inşaat aşamasında 2500 kişiye istihdam sağlanması planlanmaktadır. Akkuyu Nükleer Santrali (ANS) Türkiye'nin ilk nükleer santrali olacaktır. 2010 yılında Rusya ile antlaşmalar tamamlanmış, Akkuyu Nükleer A.Ş. isminde bir şirket kurulmuştur. Her yıl Rusya'ya eğitim amacıyla yaklaşık 100 öğrenci gönderilmektedir.

İnşaat hazırlık çalışmaları ve lisans izinleri sonrasında 2016 yılı sonlarında ilk betonun dökülmesi ve ilk ünitenin de aksi bir durum olmadıkça 2023 yılında faaliyete geçmesi planlanmaktadır. Şimdiye kadar ANS için yaklaşık 3 milyar dolar harcama yapılmıştır. Santral için liman yapımı çalışmaları da sürdürülmektedir (ETKB, 2016). Akkuyu 'ya kurulacak nükleer santralin 4 üniteden oluşması planlanmaktadır. VVER-1200 reaktörlerinin kapasite faktörleri ortalama %90'dır ve kurulu güçleri 1200 MW(e)'tir. Santralin 3D çizimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

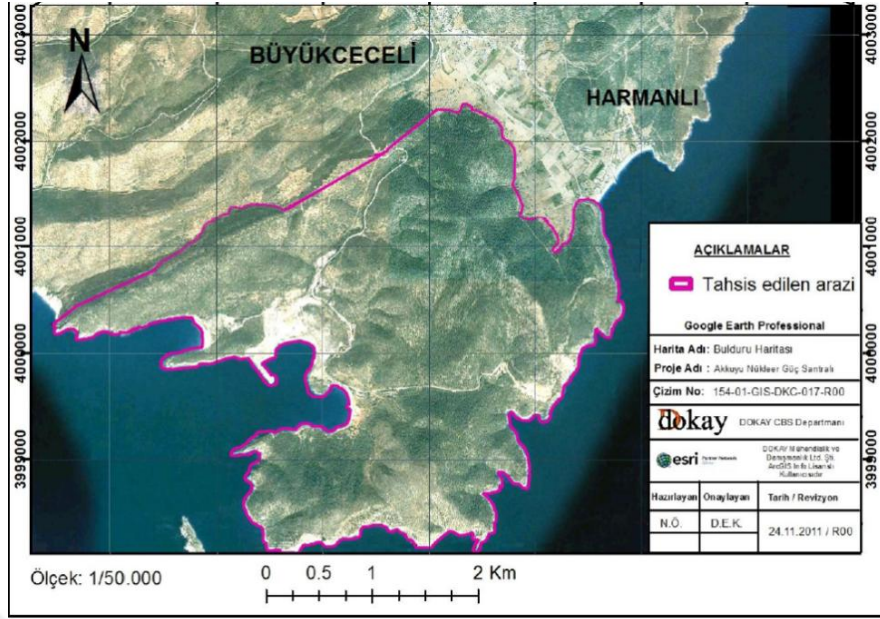


Şekil 4.1. Mersin Akkuyu nükleer santrali 3D çizimi

Daha öncede hesaplarla belirtildiği üzere, Akkuyu'daki bir reaktör ünitesi yıllık 9.4608 milyar kWh elektrik üretmektedir. Eğer Türkiye sadece nükleer reaktörleri kullanarak elektrik üretimi yapmış olsaydı kaç nükleer reaktör gerekecektir sorusu üzerine aşağıdaki hesaplama sonucu 26 adet reaktörün yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

$$\frac{236.191 \times 10^9 \text{ kWh}}{9.4608 \times 10^9 \text{ kWh}} \cong 26$$

Bir santral sahasında ortalama 4 ünite kurulacağını varsayarsak ortalama sadece 6 santral kurulacaktır. Bu hesaplama bile nükleer santrallerin ne kadar büyük bir güç sağladığını göstermektedir. ANS'nin kurulacağı alan Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu alan yaklaşık olarak 15 km²'lik bir alandır. 817 km²'lik Atatürk Barajından 55 kat daha küçük bir alana yapılan ANS, aynı zamanda bu barajın kurulu gücünden (2400 MWe) 2 kat daha fazladır. Buradan da anlaşılacağı üzere nükleer santral kurmak için çok büyük sahalara işgal etmeye gerek yoktur. Bu da nükleer santrallerin önemli bir avantajı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Akkuyu nükleer santrali'nin kurulacağı bölge

4.3. VVER Reaktörleri

VVER-1200, Türkiye'nin ilk nükleer santrali olacaktır. Bu sebeple, bu reaktör türü Türkiye için daha çok önem arz etmektedir. VVER'ler Sovyetler Birliği tarafından geliştirilen en eski reaktör türlerinden biridir. Günümüzde, Rusya Federasyonu tarafından kullanılmaya ve her geçen gün geliştirilmeye devam etmektedir. VVER, Rusça olan "Vodo-Vodyanoin Energetichesky Reactor" ifadesinin baş harflerinin kısaltılmış şeklidir. Anlamı, hem soğutması hem de yavaşlatılması su ile yapılan enerji reaktörü manasına gelmektedir. Mart 2016 itibariyle dünyada 57 adet VVER bulunmaktadır. Bunların 28 adedi, Rusya ve Ukrayna'da bulunmaktadır. VVER'ler şimdiye kadar üç gelişme sürecinden geçmiş ve dördüncü nesil VVER'e ulaşmıştır. Bu aşamalar Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

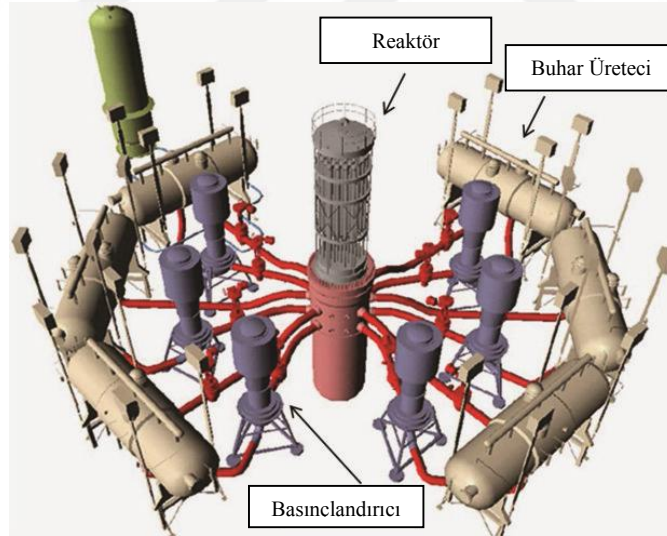


Şekil 4.3. VVER'lerin gelişim süreçleri

4.3.1. İlk Dönem VVER'ler

Rusya'da kurulan VVER-210 tasarımlar, ilk prototiplerdir. 1960'lı yıllarda VVER440/230 tasarımı reaktör kurulmuştur. Bu reaktör ilk ticari reaktördür. Bu reaktörler ciddi anlamda güvenlik zaafı olan reaktörlerdir. Gerçek anlamda bir koruma kabı bulunmaması, acil soğutma ve yangın sistemlerindeki eksiklikler ve reaktör binasının sızdırmazlık düşüklüğü bu tasarımın en kaygı uyandıran yanlarıdır. Bu reaktörlerin çoğu 1988-1990 yılında kapanmış olmakla birlikte, halen dünyada Rusya, Bulgaristan, Ermenistan gibi ülkelerde toplamda 11 tanesi çalışmaktadır.

İkinci nesil olan, VVER 440/213 tasarımları 1970'lerden sonra kurulmaya başlanmıştır. Bu reaktörler öncekine göre daha geliştirilmiş ve önlemler alınmıştır. Fakat ölçü kontrol ve yangından korunma özellikleri, batı standartlarının altındadır. Günümüzde bu reaktörlerden 16 adet çalışır durumdadır. Birinci ve ikinci nesil VVER'lerin en belirgin özelliklerinden biri, 6 adet buhar üreticiye sahip olmalarıdır. Bu reaktör Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Sonradan, buhar üreteçleri 4 adete düşürülmüştür.



Şekil 4.4. VVER 440/213 modeli

VVER'lerin 1975-1980 arasında tasarımlanmış üçüncü nesil reaktörleri VVER 100 modelidir. 2010'lu yıllara kadar inşaa edilen bu reaktörler aktif güvenlik sistemlerine, çift koruma kabına ve önceki tasarımlara göre daha ekonomik özelliklere sahiptir. Rusya, Finlandiya, Çin ve Hindistan başta olmak üzere dünyada 26 adeti işletim halindedir. Bulgaristan'da VVER-1000 kurulmaktadır (Rosatomoverseas, 2015).

4.3.2. VVER-1200 Tasarımı ve Teknolojisi

VVER-1200 reaktörü (AES-2006) VVER-1000 reaktörlerinin son geliştirilmiş hali olarak sunulmaktadır. VVER reaktörler, Rusya, Çin, Hindistan, Slovakya, Ukrayna, Çek Cumhuriyeti, Finlandiya ve Macaristan gibi diğer bazı ülkelerde de aktif halde çalışmakta ve inşası devam etmektedir.

VVER-1200, VVER-1000'in güvenlik, teknolojik, verim ve tasarruf gibi birçok yönden geliştirilmiş şeklidir. Bu tasarım, geniş reaktör kabı, 60 yıllık reaktör ömrü, acil durumlarda sistemi otomatik kapatma, 24 saat içerisinde soğutma sistemlerine, artırılan sismik kararlılığa ve dış etkenlere karşı yüksek koruma sistemlerine sahiptir.

Tablo 4.2. VVER-1200 teknik özellikler (Rosatomoverseas, 2015)

VVER 1200 (AES-2006) ÖZELLİKLER	
Kurulu Güç	1200 MW
İşletme ömrü	60 yıl
Termal Verimlilik	%36
Kapasite faktörü	%90
Yakıt Zenginleştirme oranı	% 4,85
Maks. Yanma (burn-up)	64 MW*Gün/kgU
Ortalama yanma (burnup)	46,7 MW*Gün/kgU
Yakıt çevrimi	12 ay – 18 ay (optimum)-24 ay (düşük verimlilik)
Primer Kontrolde Ünitadaki güç değişimi	± %5
Primer Kontrolde Güç değişim Hızı	%1 Nnom/s
Sekonder Kontrolde Güç değişimi	± %10
Yakıt Demetleri	Altıgen olarak tasarlanmıştır. (Batı dizaynlarında karedir)
Bir yakıt demetinde ki Yakıt kütlesi	530 kg
Bir reaktörün içindeki yakıt demeti sayısı	163
Reaktör kalbine su giriş/çıkış sıcaklıkları	298/329 °C

VVER-1200 tasarımının ilk örnekleri, Rusya'daki Novovoronezh II reaktörünün 2016 sonunda, Leningrad II reaktörünün ise 2017 sonunda işletmeye alınacağı duyurulmuştur (WNN, 2016). Şu anda dünyada 10 adet VVER-1200 reaktör inşa edilmektedir. Dünyada şu anda inşa halinde olan 10 tane VVER tipi reaktör bulunmaktadır ve bunların 4'ü VVER-1200 tipi reaktörlerdir (ANAŞ, 2016). VVER-1200 reaktörüne ait teknik bilgiler Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

4.4. Sinop ve Planlanan Diğer Santraller

Türkiye'nin ilk nükleer santrali ANS olarak belirlendikten sonra yeni yerlerde yeni santrallerin de kurulması kararlaştırılmıştır. ANS Ruslar tarafından kurulacak ve 15 yıl boyunca işletilecektir. Bu açıdan bakıldığında işletim-bakım-yakıt alanında ilk etapta dışarıya bağımlı bir santral kurulmuş olmaktadır. Hükümetler arası olası bir problemde enerji sektörü zarar görebilmektedir. Nitekim 24 Kasım 2015 tarihinde sınır ihlali gerekçesiyle Türkiye'nin düşürdüğü Rus uçağı sebebiyle iki ülke arası ilişkiler gerilmiş ve bu gerginlikten nükleer santral projesi de olumsuz şekilde etkilenmiştir. Olay sonrasında uzunca bir süre santral projesi askıya alınmıştır. İşte bu sebeplerden dolayı, enerjinin sürdürülebilmesi için nükleer santrallerin alternatiflerinin olması gerekmektedir. Mersin Akkuyu'ya alternatif olarak Sinop İnceburun'da Japonlarla ve Kırklareli'nin İğneada ilçesinde ise Çin veya Amerikalılarla iki ayrı santral kurulması planlanmıştır.

Sinop Nükleer Santrali için çalışmalar başlatılmış ve 3 Mayıs 2013 tarihinde Japonya ile Türkiye arasında hükümetler arası bir nükleer santral antlaşması imzalanmıştır. Bu antlaşmaya göre Türkiye %49 oranında hissedar olacak ve santrali, Mitsubishi Heavy Industries (MHI) şirketi tasarlayacaktır. Sinop santralının en önemli amaçlarından biri de santralin yerli imkânlarla üretilmesi, mümkün olan mal ve hizmetlerin öncelemesidir. Bu amaçla MHI bir ön fizibilite çalışması gerçekleştirmiştir. Santral Şekil 4.5'te görülen Sinop İnceburuna inşaa edilecektir.



Şekil 4.5. Sinop nükleer santralinin kurulacağı bölge

Sinop Nükleer Santrali, Atmea-1 reaktör türüne sahip ve her biri 1150 MW gücünde toplam dört üniteden oluşmaktadır. Atmea-1, MHI ve Areva şirketlerinin ortaklaşa geliştirdikleri, III + Nesil Nükleer Reaktörler sınıfına giren bir basınçlı su reaktörüdür (PWR). Sinop santrali de Akkuyu gibi yaklaşık 60 yıl ömre sahip olacak ve yaklaşık 20 milyar dolar maliyetle kurulacak.

Türkiye’de kurulması planlanan üçüncü santral ise Şekil 4.6’da görüldüğü gibi Kırklareli’nin İğneada ilçesine kurulması planlanmaktadır. Fakat bu proje üzerinde henüz ciddi bir çalışma yapılmamıştır. Bu santral için şu anda Amerikan şirketi Westinghouse ve Çinli şirketler ile görüşmeler devam etmektedir. İleriki süreçlerde başka firmalarında dâhil olması mümkün görünmektedir (Hürriyet, 2015).



Şekil 4.6. İğneada nükleer santral sahası

İğneada'ya kurulması planlanan reaktör türleri ise iki ünite AP1000 (Advanced Pressurized) ve iki ünite CAP1400 türü basınçlı su reaktörlerdir. AP1000, Westinghouse firmasının ürettiği; eşsiz güvenlik sistemi, güçlü ekonomik rekabeti ve geliştirilmiş işletme sistemleri sunan, 20 yıllık çalışmaların sonucunda geliştirilen dördüncü nesil bir reaktördür. Çin'de kurulmakta olan AP1000 reaktörü Şekil 4.7'de gösterilmektedir. AP1000 reaktörü, günümüz şartlarında en gelişmiş ve en ekonomik olan III+ nesil reaktörler sınıfına girmektedir.



Şekil 4.7. Çin'de kurulmakta olan AP1000 reaktörü

Kurulması planlanan diğer reaktör ise CAP1400 (China Advanced Pressurized) reaktörü, Çin nükleer firması SNPTC ve Westinghouse tarafından geliştirilmiştir. 1400 MWe gücüne sahip bu reaktörler, AP1000 gibi yüksek verim ve güvenlik sistemlerine sahiptir. Fukuşima nükleer kazası sonrasındaki tecrübeler ile olası bütün kaza ihtimallerine karşı üst düzey önlem alınmıştır. CAP1400, Mayıs 2015 tarihinde Uluslararası Atom Enerji Ajansından reaktör güvenlik belgesini almış ve 2015 sonunda Çin'de inşasına başlanılmıştır (SNCPT, 2016). Şekil 4.8, Çin'de kurulacak olan CAP1400 reaktörünün tasarımını göstermektedir.



Şekil 4.8. CAP1400 tasarımı

AP1000 ve CAP1400 tasarımları, dördüncü nesil reaktörlerine en çok yaklaşmış, nükleer santral teknolojilerinin son noktalarıdır. Bu reaktörlerin Türkiye'ye kısa zaman içerisinde kurulması, ülkemizin bu teknolojide daha hızlı ilerlemesine ve yerli üretime geçmesini sağlayacaktır. Fakat nükleer santrallerin kuruluş süreleri birçok sebepten ötürü sürekli ertelenmektedir. Türkiye'nin ilk önceliği, Mersin Akkuyu Santrali'nin tamamlanması olacaktır.

5. NÜKLEER SANTRAL EKONOMİSİ VE MALİYETLERİ

5.1. Dünya Nükleer Ekonomisi

Kurulacak bir elektrik santralının türü birçok faktöre bağlıdır. Örneğin, güneşli gün sayısının çok az olduğu bir ülkede güneş santrali kurulmaz. Çünkü maliyet üretimden daha fazla olacağı için bir anlam ifade etmeyecektir. Santrallerin kurulması Tablo 5.1’de görüldüğü üzere kapasite faktörü, ilk yatırım maliyeti, yerel veya dışa bağımlı mı olacağına ilişkin çeşitli faktörlere bağlıdır. Nükleer Enerji Santralleri, %85-90 kapasite faktörü ve ortalama 5cent/kWh gibi bir birim üretim maliyeti ile cazip görünmektedir. Fakat ilk yatırım maliyeti ve kamuoyunda mevcut olan güvenlik endişeleri nükleerin önündeki engellerdir. Oysaki ilk yatırım maliyeti neredeyse termik santraller ile aynıdır.

Tablo 5.1. Enerji santralleri yatırım faktörleri, (Koç ve Şenel 2013).

Santral tipi	Yerel/Dışa Bağımlı	Kapasite Faktörü (%)	İlk Yatırım Maliyeti (\$/kW)	Birim Enerji Üretim Maliyeti (cent/kWh)
Doğalgazlı Termik Santral	Dışa bağımlı	85-90	500-1.300	3.6-10.6
Linyitli Termik Santral	Yerel	50-85	2.000-3.000	4.6-12.0
İthal Kömürlü Termik Santral	Dışa bağımlı	50-85	1.500-2.500	4.5-8.8
Hidroelektrik Santral	Yerel	30-45	1.900-2.600	2,7-3.5
Nükleer Santral	Yerel/Dışa Bağımlı	85-95	2.500-5.000	3.0-8.2
Rüzgâr Enerji Santrali (h: 30 m, v: 8,5 m/s)	Yerel	25-45	1.200-2.500	5.1-14.6
Jeotermal Enerji Santrali	Yerel	80-90	1.700-4.000	3.3-4.0
Güneş Enerji Santrali (Fotovoltaik Pıl)	Yerel	20-25	4.000-8.000	12.3-24.5
Biokütle Enerji Santrali	Yerel	80-90	2.000-3.500	4.8-8.0

İlk yatırım maliyetleri göze alındıktan sonra nükleer santraller çok daha cazip hale gelmektedir. Çünkü bakım-işletim maliyeti 0.78 cent/kWh ve yakıt maliyeti 1 cent/kWh

olan nükleer santraller termik santrallerden çok daha az maliyetli ve yakıt kullanmayan yenilenebilir enerjilerden de daha az işletim-bakım gideri olmaktadır. Tablo 5.2'den diğer enerji santrallerinin bakım ve yakıt maliyetleri incelenebilir.

Bu veriler ışığında en ucuza mal edilebilecek santraller: hidroelektrik, termik ve nükleerdir. Yapım süresi en kısa olmasına karşın, yakıt olarak tamamen dışa bağımlı olduğu için en pahalı santral türleri ise doğalgaz ve güneş santralleridir.

Tablo 5.2. Santrallerin bakım-işletme-yakıt maliyetleri, (Koç ve Şenel 2013).

Santral Türü	İşletme-Bakım Maliyeti (\$/MWh)	Yakıt Maliyeti (\$/MWh)
Doğalgazlı Termik Santral	4.15	36.09
Linyitli Termik Santral	14.95	18.39
İthal Kömürlü Termik Santral	14.13	19.65
Hidroelektrik Santral	02.03	0
Nükleer Santral	7.80	10.00
Rüzgâr Enerji Santrali	12.0	0
Jeotermal Enerji Santrali	18.0	0
Güneş Enerji Santrali (Fotovoltaik Pil)	16.0	0

Nükleer enerji santralleri çoğunlukla elektrik güç sistemini karşılamak için görev yapmaktadır. Elektrik üretim maliyetleri kısaca üç ana kısma ayrılır ve kWh cinsinden ifade edilir:

- Sermaye Maliyetleri: Malzemeler, arazi tahsisi, kredi faizleri ve inşaat giderleri olarak sıralanabilirler.
- İşletme ve Bakım Giderleri: Sigorta, vergiler ve sarf malzemeleri gibi. Bu giderler santralin işletim süresince devam eder.
- Nükleer Yakıt ve Montaj İmalat Maliyeti: Yakıtın zenginleştirilmesi, kullanılmış yakıtların tasfiye edilmesi gibi alanı kapsamaktadır.

Nükleer enerji santralleri diğer elektrik üreten santrallere göre çok yüksek sermaye maliyetine ve fakat düşük yakıt masrafına sahiptir. ABD sadece yakıt imhasını karşılamak için 0.001 \$/kWh harcamaktadır (Muray ve Holbert, 2014). Elektriğin yakıt maliyetini

doğrudan etkileyen faktörler: Tesisin ısı verimi (η_{th}) , yakıt gideri FC (\$/kg) ve yakıtın yanma oranıdır (B). Yakıt maliyet denklemi Denklem 5.1’de gösterilmiştir.

$$ef = FC / (\eta_{th} \cdot B) \quad (5.1)$$

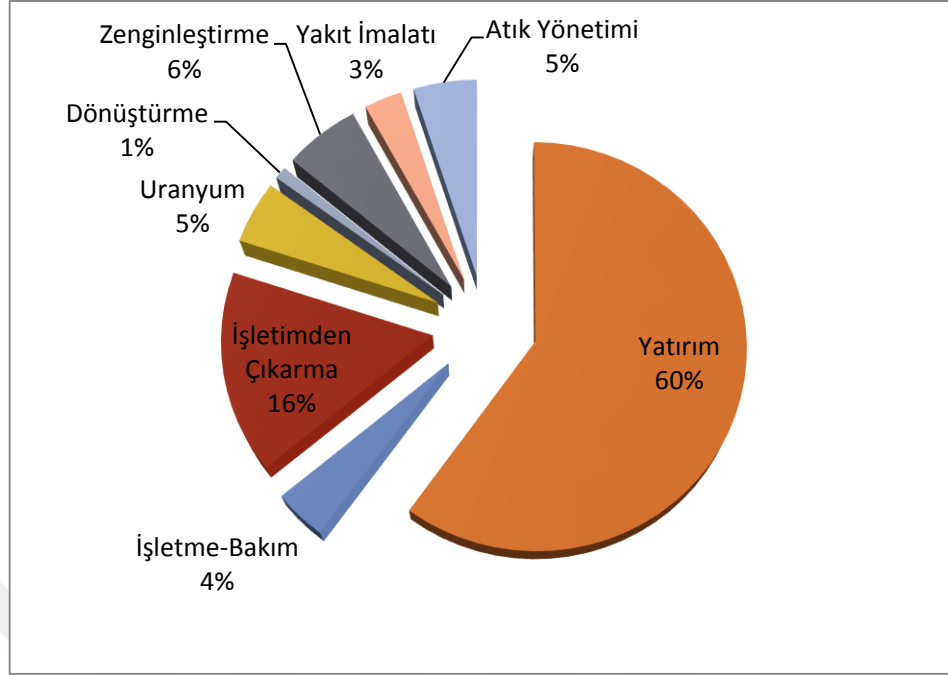
Nükleer santralde kullanılacak yakıt maliyeti çeşitli kısımlardan oluşmaktadır. Bu aşamaların ilki uranyum madenciliği, son aşama ise yakıt olarak kullanım haline getirilme halidir. Ayrıca yeniden işleme maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Uranyum, alınıp satılabilen ve piyasası olan bir madendir. En çok ticareti yapılan uranyum doğal uranyumdur. Doğal uranyum %0.71 oranında U-235 içeren uranyumdur. Bu konsantre, CANDU reaktörlerde kullanılmak üzere veya uranyum zenginleştirme tesisi olan ülkeler tarafından alınmaktadır.

Ticareti yapılan ikinci uranyum ise %3-5 civarında zenginleştirilmiş (hafif zenginlikte uranyum) olan uranyumdur. Buna uranyum oksit (UO_2) denilmektedir. Siyah ve kahverengi tonda toz maddelerdir. Hafif sulu reaktörlerin ana yakıtıdır.

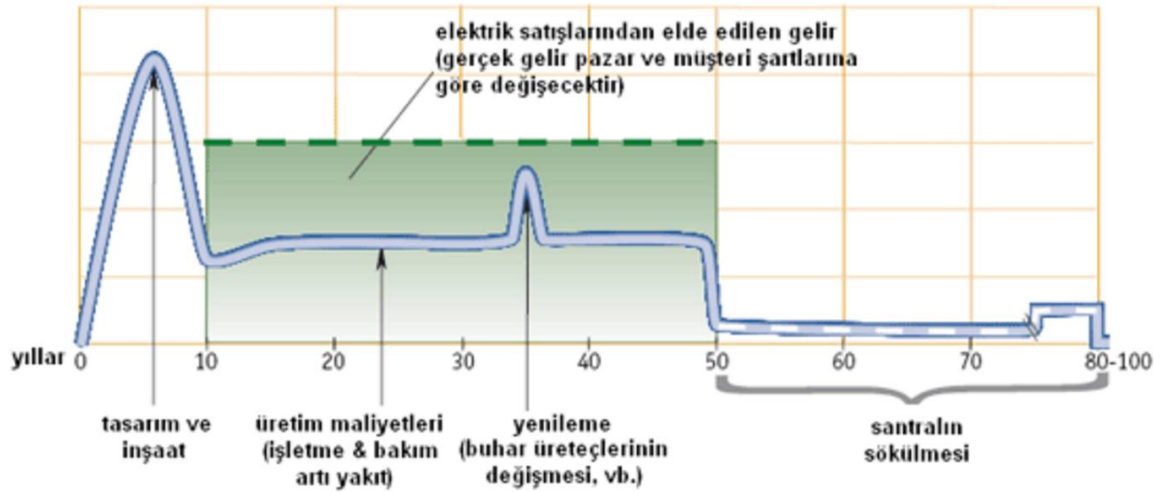
Diğer bir ticari uranyum ise %20 oranında zenginleştirilen uranyumdur. Bu yakıt ise araştırma reaktörlerinde kullanılmaktadır. Bu orandan daha yüksek zenginlikteki uranyum ticari olarak alınıp satılamamaktadır. Çünkü %20’nin üzerindeki zenginlik, nükleer silahların başlangıcıdır (UNYTS, 1997).

Uranyum piyasasındaki fiyatlar yukarda bahsedilen üç ana maddenin fiyatlarıdır. 2016 itibarıyla Doğal uranyumun fiyatı 27-30 \$/kg civarında değişmektedir. %3-4 oranında zenginleştirilmiş uranyumun fiyatı 450 \$/kg civarındadır (UXC , 2016). Bu bilgilerden faydalanarak, Şekil 5.1’de bir nükleer santralin maliyet dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Nükleer santralin maliyet oranları dağılımı.

Dört ünitelik bir nükleer santralin toplam maliyeti ise yaklaşık 20 milyar \$ civarında olduğu belirtilmektedir. Akkuyu için önerilen maliyette bu yöndedir. Nükleer santraller kurulduktan yaklaşık 10 yıl içerisinde maliyetleri amorti etmekte ve kara geçmektedir. Şekil 5.2 elektrik üretim maliyetlerinin bileşimlerini göstermektedir.

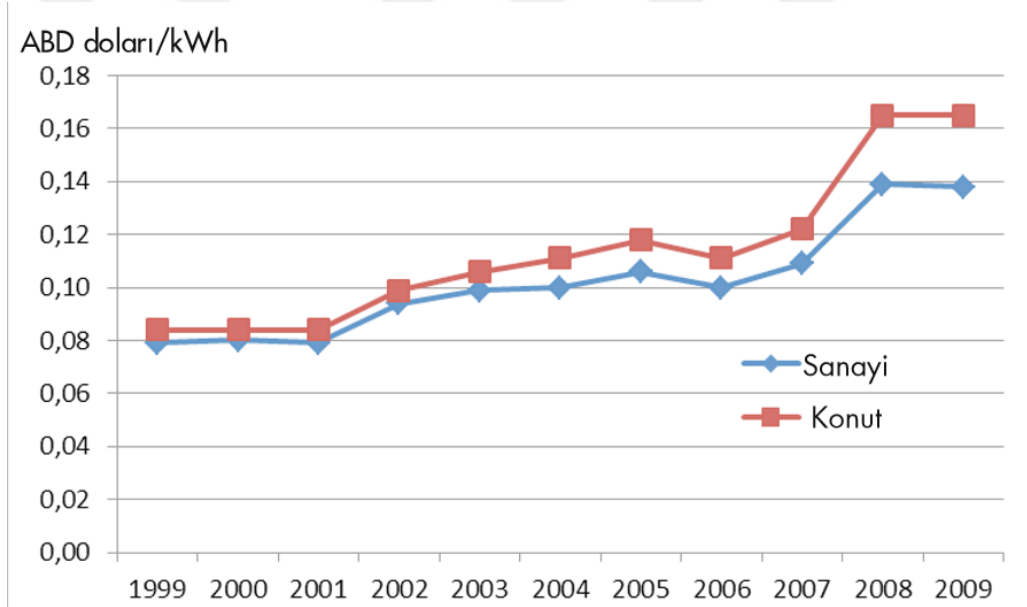


Şekil 5.2. Nükleer elektrik üretim maliyetlerini oluşturan bileşenler, (NED, 2016).

5.2. Mersin Akkuyu'nun Mali Analizi

5.2.1. Akkuyu Santrali'nin Elektrik ve İlk Yatırım Maliyeti

Akkuyu Nükleer Santral antlaşmasına göre, Türkiye birinci ve ikinci ünitenin üreteceği elektriğin % 70'ini, diğerlerinin ise %30'unu, 15 yıl boyunca 12.35 cent/kWh (KDV hariç) fiyattan satın alacaktır (Ülgen vd., 2011). Şekil 5.1'de Türkiye'nin yıllara göre değişen nominal elektrik fiyatları süreci gösterilmektedir. 2009 yılındaki ortalama nominal elektrik fiyatı 0.17 \$/kWh olarak belirtilmiştir. Nükleer reaktörlerden alınacak elektrik fiyatı 0.1235 \$/kWh rakamı ise gayet avantajlı görünmektedir.



Şekil 5.3. Türkiye elektrik fiyatları değişim grafiği, (Ülgen vd., 2011).

Kurulacak her santralin ilk maliyeti denilen yatırım maliyeti en önemli etkidir. Nükleer santrallerin ilk yatırım maliyetleri 2500-5000 \$/kW olarak değişmektedir. Türkiye'de kurulacak olan VVER-1200 tipi reaktör için ilk yatırım maliyeti, VVER-1150 esas alınarak 2933 \$/kW olarak belirlenmiştir. Bu maliyet ekonomik dalgalanmalar göz önünde bulundurularak 3000 \$/kW olarak kabul edilebilmektedir (Ülgen vd., 2011). O halde 4800 MW gücündeki bir santralin ilk yatırım maliyeti 14 milyar \$ civarındadır. Türkiye, şimdiye kadar yatırım maliyeti olarak Akkuyu için 3 milyar \$ civarında harcama yapmıştır (ANAŞ, 2016).

5.2.2. Akkuyu'nun Yakıt Maliyeti

İlk yatırım maliyetlerinden sonra en önemli maliyet yakıt maliyetidir. Türkiye, zenginleştirme tesisine sahip olmadığı için yakıtı yine Rus şirketinden tedarik edecektir. Akkuyu'da kullanılacak yakıt %3-5 oranında hafifçe zenginleştirilmiş uranyum olacaktır. Akkuyu Nükleer Santrali'nin yıllık yakıt maliyeti ortalama 360 milyon \$ olarak açıklanmıştır. Yıllık 360 milyon \$'lık yakıt ile yaklaşık 40 milyar kWh elektrik üretilmektedir. 40 milyar kWh elektrik üretmek için 8 milyar m³ doğalgaz kullanılmaktadır. 8 milyar m³ doğal gazın maliyeti ise yaklaşık 3.6 milyar \$'dır (ANAS, 2016). Bu bilgiler Tablo 5.3'te özetlenmiştir.

Tablo 5.3. Türkiye için nükleer ve doğalgaz santrali yakıt miktar ve fiyatları

	Yakıt Miktarı	Yakıt Fiyatı	Yıllık Elektrik Üretimi
Nükleer santral	120 ton uranyum	360 milyon \$	40 milyar kWh
Doğalgaz santrali	8 milyar m ³ doğalgaz	3.6 milyar \$	40 milyar kWh

Tablo 5.3'teki bilgilere bakılarak, 80 milyar kWh elektrik üretecek bir doğalgaz santraline 6 yılda ödenecek para ile Akkuyu Nükleer Santrali inşa edilebileceğini söylemek mümkündür. Akkuyu inşa edildiğinde ise bir yılda, doğal gaz santralinden 10 kat daha düşük yakıt maliyetiyle elektrik üretebilecektir.

Santralin işletimde olduğu sürece en önemli maliyeti ise işletim ve bakım maliyeti olacaktır. Bu maliyette de yine VVER-1150 reaktörü esas alınarak bu maliyetin 16.8 \$/MWh civarında olacağı belirtilmektedir (Ülgen vd., 2011).

5.2.3. Akkuyu'nun Atık Maliyeti

Proje şirketi, TEİAŞ tarafından alınan elektrik satış anlaşması kapsamında, kullanılmış yakıt ve radyoaktif yakıt yönetimi hesabına 0.15 cent/kWh değerinde bir ödeme yapacaktır. Anlaşmaya göre atıklardan da şirket sorumludur ve kullanılmış yakıtlar, Rusya'ya taşınabilir ve oradaki tesislerde yeniden işleme sokulabilir.

Bir atık deposunda depolanan KNY ve bunun imhası için, kWh başına üretim maliyetlerindeki artış %10 civarında olmaktadır. ABD, KNY programının MWh başına 1 \$ olduğunu açıklamıştır (WNA, 2016).

Yakıt döngüsü maliyetleri 4-11 \$/MWh aralığında ve ortalama 9.34 \$/MWh olmaktadır. Bu aralık hem ön hemde arka uç için toplam rakamlardır. Yakıt döngüsünün ön aşaması yaklaşık olarak 7.8 \$/MWh civarındadır. Arka uç için de yaklaşık 1.54 \$/MWh eklenirse toplam 9.34 \$/MWh olmaktadır. Akkuyu antlaşmasındaki yakıt maliyetleri de bu hesaplara paralel seyretmektedir (Ülgen vd., 2011). Akkuyu nükleer santralinin yıllık 40 milyar kWh elektrik üretimi hesaba katılırsa, yıllık atık miktarına ayrılacak maliyet 370.36 milyon \$ olacaktır.

5.2.4. Akkuyu'nun İşletmeden Çıkarma Maliyetleri

Nükleer santralin son maliyeti işletmeden çıkarma maliyetidir. Kuruluşundan ve gerçekleştireceği revizyonlardan sonra (yaklaşık 100 yıl) bu reaktörlerin sökülmesi ve işletimden çıkarılmaları gerekmektedir.

Türkiye ve Rusya arasında yapılan nükleer anlaşmalara göre, işletmeden çıkarma ve söküm işlemlerinin hepsi yetkili Rus şirket tarafından yapılacaktır. Ros Atom şirketi, atık maliyetinde olduğu gibi işletmeden çıkarma için de bir hesapta 0.15 cent/kWh tutarında ödeme yapacaktır.

İşletmeden çıkarma maliyeti, bir nükleer santralin ilk maliyetlerinin yaklaşık %9 ile %15'ini oluşturmaktadır. Akkuyu'nun ilk yatırım maliyeti 14 milyar \$ kabul edilirse, işletmeden çıkarma maliyeti yaklaşık 1.5 milyar \$ olacaktır. ABD, bu maliyetleri 0.1 ile 0.2 cent/kWh civarında açıklamaktadır (WNA, 2016).

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında, dünyanın enerji ve nükleer enerji durumu hakkında güncel bilgiler verilmiş ve 50 yıla aşkın bir süredir nükleer santral kurmaya çalışan Türkiye'nin çalışmaları incelenmiştir. Türkiye'nin nükleer teknoloji alandaki ilk önemli adımı olan Akkuyu Nükleer Santrali (ANS)'nin gelişimi, maliyeti ve atıkları üzerinde araştırma yapılmış; kurulması planlanan diğer santraller, ülkenin uranyum ve toryum kaynakları hakkında da bilgiler sunulmuştur. Bu tez ile, Türkiye'nin nükleer geleceği hakkında analizler yapılmış ve öneriler sunulmuştur.

Nükleer enerji hakkında son yıllarda olumsuz bir hava oluşturulmaktadır. Özellikle ABD'nin uzun bir süredir yeni santral inşaa etmediğini öne sürerek dünyanın nükleerden vazgeçtiği ve bazı ülkelerin nükleer santralleri kapattığı yönünde haberler yapılmaktadır. Oysa bu haberler üzerinden nükleer enerjiden vazgeçildiğini söylemek ciddi bir bilgi eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Gelişen teknolojiler sayesinde yeni bir santral yapmak yerine mevcut bir santralin ömrü yaklaşık 40 yıl daha uzatılabilmektedir. Bu uygulama, yeni bir santral kurmaktan çok daha ucuza mal olmaktadır. ABD gibi nükleer devi ülkelerin şu anda yaptıkları işlem budur.

Nükleer enerji, birçok enerji türü gibi avantajları ve dezavantajları olan bir enerjidir. Nükleer santrallerin temel yakıtı olan uranyumun az miktarıyla çok büyük oranda enerji sağlanabilmektedir. Yakıt taşımacılığı kolaydır. Nükleer santrallerin, sera gazı ve asit yağmuru gibi etkileri hemen hemen yoktur. Nükleer enerji çalışmaları uzun bir tecrübeye ve bilimsel dayanaklara sahiptir. Enerji maliyeti karşısında yakıt maliyeti düşüktür. Bu avantajlar nükleer enerjiyi cazip hale getirmektedir.

Öte yandan nükleer santrallerin henüz çözölememiş yüksek aktiviteli atık sorunu, ciddi bir kaza sonrasında çevreye salınabilecek radyoaktif maddeler, acil durum kontrol sistemleri, kuruluş maliyetinin yüksekliği gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca uluslararası engeller ve yaptırımlar da hükümetlerin bu alanda yatırım yapmasını zorlaştırmaktadır.

Türkiye, kuracağı ilk nükleer santral için, Rusların ürettiği VVER-1000 reaktörünün geliştirilmiş hali olan VVER-1200 (AES-2006) reaktörünü seçmiştir. VVER-1200 aktif güvenlik sistemleri ve yüksek verime sahip bir reaktör olacaktır. Rusya, VVER-1200'ün ilk santralini 2016 sonunda işleme alacağını duyurmuş ve halen dünyada 10 adet reaktör kurulma aşamasındadır. Ayrıca VVER-1000'den gelen 15 yıllık bir tecrübe söz

konusudur. TAEK koşul olarak Rusya'dan bu reaktörün lisanslanmış ve inşaatına başlanılmış bir örneğini istemektedir. Santralin güvenliğinin tespiti lisanslanma yapılırken belirtilmektedir. VVER-1200 reaktörleri inşaat lisansları alınarak Rusya'da kurulmaktadır. Seçilen reaktör dünyada en çok kullanılan ve en çok tecrübeye sahip olunan "Hafif Sulu Basıncılı Su Reaktörü (PWR)" dır. Akkuyu mevkiinde kurulması da soğutucu suyun denizden alınmasını sağlayacak ve ek olarak su kuleleri yapılmayacaktır.

ANS Atatürk barajından 55 kat daha küçük bir alana kurulacaktır. Enerji santralleri kurulurken kapsayacağı alan da göz önünde bulundurulmalıdır. Toplumda zannedildiği gibi nükleer santraller çevresinde her şeyin yok olduğu yapılar değildir. Tam tersine hemen nükleer santral kıyısında insanların yüzebileceği plajların olduğu santrallerdir. Tez içerisinde örnekler sunulmuştur.

Nükleer santralin ülkeye sağlayacağı diğer bir fayda ise ülkemizin topraklarında bulunan uranyum ve toryum kaynaklarının işletilebilmesidir. Böylece hem yerli kaynaklar faaliyete geçirilmiş hem de yakıttan kazanç sağlanmış olacaktır. Zira ithal edeceğimiz uranyum on kat daha maliyetli olacaktır. Toryum kaynağı şu anda yakıt olarak kullanılsa da yakın bir zamanda kullanılacağı tahmin edilmektedir ve bu alandaki çalışmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, uranyum ve toryum kaynakları ile reaktörde uranyumun yanması sonucu oluşan plütonyum yakıtı detaylıca incelenmiştir.

Nükleer santral kurmak, Türkiye için bir alternatiften çok mecburiyete dönüşmüştür. Hidroelektrik kaynakları büyük ölçüde kullanılmış, onlarca termik ve doğal gaz santrali kurulmuştur. Maalesef ki doğal gaz ve ithal kömür ile sağlanan enerji ile ülkemiz dışarıya bağımlı bir konuma gelmiştir. Nükleer santral kurulumu ile Türkiye, teknoloji sahasında gelişmeler kat edecek ve ileriki bir süreçte kendi uranyum kaynaklarını kendisi kullanabilecektir. Akkuyu santralının anlaşmalarına göre santrali 15 yıl boyunca Rus şirket işletecek ve ardından tecrübeli Türk mühendislerle bırakacaktır.

Akkuyu Nükleer Santrali (ANS) kurulacak diğer santraller için önemli bir tecrübe olacaktır. Akkuyu'nun yaklaşık maliyeti 20 milyar \$ olarak belirlenmiştir. Bu rakamın büyük çoğunluğunu yatırım maliyetleri oluşturmaktadır. %3-5 arasında zenginleştirilmiş olan uranyum yakıtı, Rus şirket tarafından karşılanacaktır. Akkuyu'da ilk etapta 2500 civarı personel çalışacak ve ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Rusya'da nükleer eğitimi gören öğrenciler de ülkeye döndüklerinde Akkuyu santralinde görev alarak projenin millileşmesine yardımcı olacaktır. Yapılan sözleşmeye göre Türkiye elektriği

12.5-15 cent/kW değerinden alacaktır. Bu rakam mevcut elektrik fiyatları ile karşılaştırıldığında gayet uygun bir fiyat olarak görünmektedir.

Yaptığımız hesaplamalara göre Akkuyu’da kurulacak olan dört reaktörden çıkacak kullanılmış yakıtlar yakıt demeti şeklinde depolandığı zaman, bir olimpik havuz ancak 121 yılda dolmaktadır. Oysa bir reaktörün ömrü şu anda en fazla 60 yıldır. Revize edilerek 100 yıla çıkartılabilir. Bu süre zarfında havuzdaki kullanılmış yakıtlar yeniden işlenmeye tabi tutulursa atıkların ebadı 1/25 oranında küçülecektir. Eğer yakıtları demet şeklinde değil de sadece çubuk şeklinde depolanabilirse bu havuzun dolması 200 yıla kadar uzamaktadır. Fakat kullanılmış yakıtlar şimdiki teknoloji ile çubuk şeklinde depolanamamaktadır. Yakın zamanda bazı iyileştirmeler yapıldıktan sonra bu metot çok daha avantajlı olacaktır. Havuzlarda depolama işlemi bütün ülkelerde güvenle yapılmaktadır. Nihai depolama ve geri dönüşüm ile ilgili çalışmalar geliştirilene kadar bu yol en güvenli ve mantıklı yol olarak görünmektedir. Bu işlemin tek dezavantajı sürekli bakım yapılmasıdır.

Amerika uzun zamandır çalışmasını yürüttüğü nükleer atıkları yer altına depolama projesini durdurmuş ve herhangi bir bütçe ayırmayacağını bildirmiştir. Atık toplama işlemi sırasıyla 1998, 2010 ve 2020’ye ötelenmiştir. Yucca Dağı’ndaki nihai depolama alanına şimdiye kadar gömdüğü bir yakıt yoktur çünkü kullanılmış yakıtların geri dönüştürülmesi çok cazip ve avantajlıdır. Fakat yeniden dönüştürme tesisleri ileri teknoloji ve maliyet içeren bir iştir.

Türkiye, nükleer santral alanındaki çalışmaların ilkinin Akkuyu ile başlatmış ve ikinci sırada ise Sinop Nükleer Santrali için görüşmeleri başlatmıştır. Sinop’un ardından planlanan üçüncü santral Kırklareli İğneada mevkiine kurulacaktır. Türkiye, yakıt imalatı, zenginleştirme ve geri dönüşüm işlemlerini yapabilmesi için bahsi geçen üç santrali kurmalı ve yeterli tecrübelerle sahip olmalıdır.

Sonuç olarak, Türkiye ilk nükleer santralini Akkuyu mevkiine kuracaktır. Bu santral Ruslar tarafından geliştirilen VVER 1200 türü hafif sulu basınçlı reaktör (PWR)’dür. Santral 15 yıllık yap işlet devret şeklinde kurulacak ve 15 yıl sonra santral işletimi Türkiye’ye devredilecektir. Kullanılacak yakıt %3-5 oranında hafif zenginleştirilmiş uranyumdur. Aynı zamanda Türkiye’de de uranyum çıkarma çalışmalarına başlanmış ve yerli yakıt kullanma imkânı sağlanacaktır. Santral her şey dâhil yaklaşık 20 milyar \$’a mal olacak ve Türkiye elektriği 12.5-15 cent/kW değerinden satın alacaktır. Santralden çıkacak olan düşük ve orta derecedeki atıklar TAEK tarafından kolaylıkla imha edilecektir. Bu atıklar hastanelerden çıkan atıklar ile eşdeğer olan

atıklardır. Kullanılmış yakıtlar ise yüksek aktiviteye sahip atıklar olarak değerlendirilmektedir. Bunlar Akkuyu santrali içerisindeki havuzlarda depolanacaktır. Akkuyu'dan çıkacak olan toplam atık 121 yılda ancak bir olimpik havuzu dolduracaktır. Oysa santralin ömrü revizyon ile beraber 100 olacağı için Akkuyu'dan çıkacak KNY'lar bir olimpik havuzu yeterince dolduramayacaktır. Bu atıklar yaklaşık 20-30 yıl havuzlarda soğutulmaya ve depolanmaya bırakılacaktır. Kullanılmış yakıtların işlenip işlenmeyeceği konusunda yapılan bir antlaşma veya çalışma yoktur. Türkiye, ileriki süreçte bu konuyu ele alacaktır. Fakat kullanılmış atıkların yeniden işlenip yeni yakıtlar elde edilmesi ve böylece atık miktarının küçültülerek depolanması en uygun yol olacaktır.



KAYNAKÇA

- Adur Madencilik. (2016, Haziran 07). *Temrezli Projesi*. Adur Madencilik:
<http://adurmadencilik.com/icerik.php?no=8> adresinden alınmıştır
- Akkuyu NGS A.Ş. (2011). *ÇED Raporu*. Ankara: DOKAY-ÇED Çevre Mühendisliği Ltd. Şti.
- Altın, V. (2007, Aralık). 4. Nesil Nükleer Santraller. *Tübitak*, 7-19.
- ANAŞ. (2016, 05 10). <http://www.akkunpp.com/>. Akkuyu Nükleer A.Ş.:
<http://www.akkunpp.com/proje-hakkinda> adresinden alınmıştır
- Boyla, M., & Canküyer, Y. (1995). Nükleer Enerji Terimleri Sözlüğü. ankara: TDK.
- British Petroleum. (2015, Mayıs 25). *BP Statistical Review of World Energy*. London: BP.
- Charles, F. (2011). *Nuclear Energy, What Everyone Needs to Know*. Oxford University Press.
- DPT. (1996). *Nükleer Enerji Hammaddeleri: Uranyum - Toryum*. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu- Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu- Jeotermal Enerji Çalışma Grubu Raporu. Ankara: DPT Yayınları.
- DSİ. (2016). *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*. 04 21, 2016 tarihinde
<http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=149> adresinden alındı
- ENS. (2003). *European Nuclear Society*. <http://www.euronuclear.org/> adresinden alınmıştır
- ETKB. (2012). *Nükleer Güç Santralleri ve Türkiye*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Ankara: Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi.
- ETKB. (2016, Mayıs 24). *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. Enerji Bakanlığı Web Sitesi: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik> adresinden alınmıştır
- Haber Türk. (2015). *Haber Türk*. Haber Türk Web sitesi:
<http://www.haberturk.com/ekonomi/enerji/haber/1116665-yozgatta-ilk-uranyum-2016da-cikarilacak> adresinden alınmıştır
- Haynes, W. M. (2011). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (92. b.). CRC Press.
- Hürriyet. (2015, Ekim 14). <http://www.hurriyet.com.tr/enerji-bakani-3-nukleer-santral-igneada-planlaniyor-30309135> adresinden alınmıştır

- IAEA. (1996). *International Basic Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2013). *Power Reactor Information Systems*.
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 33-34.
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering* (3. b.). U.S.A: Pearson Education Inc.
- Muray, R. L., & Holbert, K. E. (2014). *Nuclear Energy, AN Introduction to Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Process* (7. b.). U.S.A: Elsevier Inc.
- NED. (2016). Nükleer Enerji Dünyası: <http://www.nukleer.web.tr> adresinden alınmıştır
- Nuclear Power. (2016, Mayıs 19). Nuclear Power web sitesi: <http://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/uranium/> adresinden alınmıştır
- Nükleer Akademi. (2016, 08 28). <http://nukleerakademi.org/>:
<http://nukleerakademi.org/video-nukleer-enerji-santralleri-nasil-calisir/> adresinden alınmıştır
- Nükte. (2016). *Nükleer Teknoloji Bilgi Platformu*. <http://www.nukte.org/node/281> adresinden alınmıştır
- Özemre, A. Y., Bayülken, A., & Gençay, Ş. (2000). *50 Soruda Türkiye'nin Nükleer Enerji sorunu*. İstanbul: Kaknüs Yayınları.
- Planet Ark. (2016). Planet Ark web sitesi: <http://planetark.org/enviro-news/item/59202> adresinden alınmıştır
- Radikal. (2007, Kasım 09). *Nükleer santral için geri sayım başlıyor*. Mayıs 25, 2016 tarihinde Radikal Gazetesi: <http://www.radikal.com.tr/turkiye/nukleer-santral-icin-geri-sayim-basliyor-828121/> adresinden alındı
- Rosatomoverseas. (2015). *The VVER today: Evolution, Design, Safety*. Russia: Rosatom Overseas JSC.
- Sabah. (2009, Kasım 11). *Sabah Gazetesi*. Sabah Gazetesi web sayfası: http://www.sabah.com.tr/ekonomi/2009/11/20/nukleer_santral_ihalesi iptal adresinden alınmıştır
- SNCPT. (2016, Ekim 15). *State Nuclear Power Technology Corporation*. <http://www.snptc.com.cn/> adresinden alınmıştır

- Şirin, M. S. (2010). An Assesment of Turkey's Nuclear Policy in Light of South Korea's Nuclear Experience. *Energy Policy*, 6144-6153.
- TAEK. (2016, Ağustos 29). <http://www.taek.gov.tr/nukleer-guvenlik/nukleer-enerji-ve-reaktorler/168-nukleer-atiklar.html> adresinden alınmıştır
- TEİAŞ. (2016, 04 28). www.teias.gov.tr. 04 28, 2016 tarihinde Türkiye Elektrik İletişim A.Ş: http://ytbs.teias.gov.tr/ytbs/frm_login.jsf adresinden alındı
- The Shift Project Data Portal. (2016). Mayıs 25, 2016 tarihinde <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvChart> adresinden alındı
- Tsoufanidis, N. (2013). *The Nuclear Fuel Cycle*. American Nuclear Society.
- U.S. NRC. (2016, Mayıs 25). *Nuclear Regulatory Commission*. <http://www.flickr.com/people/nrcgov> adresinden alınmıştır
- UNYTS. (1997). 1.Ulusal Nükleer Yakıt Teknolojisi Sempozyumu. *Bildiriler Kitabı. I*. İstanbul: TAEK.
- UXC . (2016, 08 29). Uranium Prices: www.uxc.com/p/prices/UxCPrices.aspx adresinden alınmıştır
- Ülgen, S., Or, İ., Saygın, H., Kumbaroğlu, G., & Atıyas, İ. (2011). *Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli*. Ekonomi ve Dış Politika Araştırmalar Merkezi. İstanbul: EDAM Yayınları.
- Ülgen, S., Or, İ., Saygın, H., Kumbaroğlu, G., & Atıyas, İ. (2012). *Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli-II*. Ekonomi ve Dış Politika Araştırmalar Merkezi. İstanbul: EDAM Yayınları.
- WNA. (2016). *World Nuclear Association*. Nisan 13, 2016 tarihinde <http://world-nuclear.org/>: <http://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> adresinden alındı
- WNN. (2016, Ekim 28). *World Nuclear News*. <http://www.world-nuclear-news.org/>: <http://www.world-nuclear-news.org/> adresinden alınmıştır
- Zabunoğlu, H. O. (2012, Ekim). Nükleer Atıklar ve Geri Dönüşümü. *Standard Ekonomik ve Teknik Dergi*, 75-79.
- Zabunoğlu, O. (2014, 12 24). *Nükleer Yakıt Çevrimi ve Toryum'un Yeri*. Hacettepe Nükleer Enerji Mühendisliği: http://www.nuke.hun.edu.tr/tr/webfiles/Announcements/Th_ve_NYC.pdf adresinden alınmıştır

Zabunoğlu, O. (2015). Nükleer Yakıt Çevrimi: Mevcut Durum, Özgün Hususlar, İlgili Meseleler. *Enerji ve Diplomasi Dergisi*, 1(4), s. 25-37.



EKLER

EK 1: NÜKLEER ENERJİ TARİHİ KRONOLOJİSİ

- 1895 Wilhelm Roentgen x-ışınlarını keşfetti.
- 1896 Henry Becquerel radyoaktiviteyi keşfetti.
- 1898 Marie Curie radyoaktif çekirdekler olan Polonyum ve Radyumu keşfetti.
- 1899 Rutherford alfa ve beta diye iki farklı ışınım keşfetti.
- 1900 Fredrick Soddy radyoaktif elemelerin kendiliğinden bozunduğunu keşfetti ve buna izotop ismini verdi.
- 1905 Albert Einstein $E=mc^2$ formülü ile özel görecelik ile ilgili makalesini yayınladı.
- 1913 Bohr nükleer ve kuantum arasındaki ilişkiyi kuran atom yapısı kuramını yayınladı.
- 1917 Einstein Quantum kuramını yayınladı. Bu kuramla ilk kez ışık foton kavramı ortaya çıktı.
- 1919 Rutherford azot gazını alfa ile bombardımana uğrattı ve oksijen izotopları ve protonlar ortaya çıktı. Böylece çekirdekte protonların varlığı ispat edildi. Bu tepkime aynı zamanda ilk nükleer tepkime olarak tarihe geçti.
- 1923 Broglie elektronların hem dalga Hemde parçacık olduğunu keşfetti.
- 1925 Heisenberg, Max Born ve sonrasında Schrödinger kuantum mekaniğini formüle etti
- 1927 Heisenberg Belirsizlik prensibini açıkladı. Buna göre bir maddenin aynı anda hem konumunu hem de hızını bulmak mümkün değildir.
- 1932 Chadwick berilyum yaprak üzerine alfa ışınları göndererek nötronu keşfetti.
- 1937 RADAR sistemi keşfedildi.
- 1938 Alman fizikçiler Otto Hahn ve Fritz Strassmann fisyon ile alakalı atom bombasının önünü açan bir dizi deneylere başladılar.
- 1940 Neptünyum keşfedildi.
- 1941 Plütonyum keşfedildi ve bu elementinde atom bombası olarak kullanılabileceği rapor edildi. ABD başkanı Roosevelt, Manhattan projesi ile atom bombası imali için çalışmaları başlattı.
- 1942 Manhattan bilimsel projelerinin başına Robert Oppenheimer getirildi. Oak Ridge, Tennessee’de çalışmalara başlandı.
- 1945 U-235 doğal uranyumdan ayırma işlemi ilk kez gerçekleştirildi. 16 Temmuz’da ilk atom bombası denemesi New Mexico’da gerçekleştirildi (Trinity). 6 Ağustosta Küçük Oğlan isimli Uranyum bombası Hiroşima’da, Şıman adam isimli plütonyum

- bombası Nagazaki üzerinde patlatıldı. Hiroşima’da 100 binden fazla, Nagazaki’de 74 bin insan öldü.
- 1946 BM Atom Enerji komisyonu ilk kez toplandı.
- 1949 SSCB Joe 1 isimli plütonyum bombasını Semipalatinisk (Kazakistan) üzerinde patlattı.
- 1951 EBR I isimli deneysel üretken reaktörü Idaho Ulusal Mühendislik laboratuvarında, 150 Watt gücündeki 4 ampülü yakacak kadar elektrik üretti.
- 1952 ABD ve SSCB hidrojen ve atom bombası denemeleri yaptı.
- 1954 Amerika’nın ilk denizaltısı USS Nautilus deniz altına indirildi.
- 1955 Nükleer reaktörler için ilk patent Amerikan patent ofisi tarafından Atom Enerji komisyonuna sunuldu.
- 1956 Elektrik üretimi için 5MW gücündeki ilk santral Rusya-Obinsk’te işletmeye girdi.
- 1957 Avrupa Atom Enerji Topluluğu ve Evrupa Ekonomik Topluluğunu oluşturan Roma Antlaşması imzalandı.
- İlk özel sektör nükleer santrali Dresden-I, ABD’de inşaa edilmeye başladı.
- 1958 İtalya, Latina isimli 200 MW gicindeki santralin inşasına başladı.
- Fransa ilk defa kullanılmış yakıtı yeniden işleme tesisi açtı.
- 1959 ABD nükleer silah çalışmalarında füze gibi önemli sonuçlar elde etti.
- 1962 CANDU reaktörleri geliştirildi.
- 1966 ABD, Çin, Japonya, İsviçre ve Fransa gibi ülkeler nükleer santral ve silah yapımında ilerlemeler kaydetti.
- 1968 Nükleer Silahsızlanama Antlaşması (NPT) imzalandı.
- 1973 Petrol Krizi ortaya çıktı ve nükleere olan talep büyük oranda arttı.
- 1977 Voyager 2 uzay gemisinin enerjisi için plütonyum peletleri kullanıldı.
- 1983 ABD yüksek seviyeli atıkların nihai depolanması için çalışmalara başladı.
- 1986 Çernobil kazası meydana geldi.
- 1990 Fransa, MOX imalat fabrikasını açtı fakat işleme beş yıl sonra geçilebildi.
- 1991 Dünyanın ilk 3. nesil ileri tasarımı reaktörü Japonya’da kuruldu (Kashiwazaki Kariwa-6).
- 1995 NPT’ye imza atan 178 ülke antlaşmayı yeniledi.
- 2007 Türkiye nükleer santral için Rusya ile antlaşmalara başladı.
- 2010 İran’da nükleer yakıt zenginleştirme krizi yaşandı.
- 2011 Japonya’nın Fukushima Daichi nükleer santralinde büyük bir kaza meydana geldi.

- 2015 Ürdün, Mısır, Cezayir, Bangladeş, Bolivya, Endonezya, Vietnam, Gana, Arjantin gibi ülkeler nükleer santral kurmak için Rus ve ve Amerikan nükleer şirketleri ile sözleşmeler imzaladı.
- 2016 Finlandiya, Rusya ile beraber VVER 1200 türü reaktör kurulması için çalışmalara başladı.

Daha ayrıntılı tarihçe ve bilgi için bkz. (NED, 2016)



EK 2: NÜKLEER ENERJİ SÖZLÜĞÜ

Ağır Su	İçinde hidrojen atomları yerine döteryum izotopları bulunan sudur.
Ağır Sulu Reaktör	Yavaşlatıcı olarak ağır su kullanan reaktör türüdür.
Akut Işınlanma	Kısa süreli ve yüksek düzeyli ışınlama.
Bombardıman	Bir madde üzerine artarda gönderilen tanecikler.
Çoğalma Katsayısı (k)	Belirli bir zaman aralığında üretilen nötron sayısının, kaçan ya da soğrulan nötron sayısına oranıdır. İdeal olan değer 1'dir.
Doz Eşdeğeri	Bir dokunun belirli bir noktadaki soğrulmuş dozun (D), nitelik etkenin (Q) ve diğer değiştirici etkenlerin (N) çarpışması sonucu oluşan değer (H) doz eşdeğer birimi Sievert (Sv)'tir. $H=D.Q.N$ $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Fertil	Kendiliğinden bölünemeyen, bölünebilmesi için fisil maddeye ihtiyaç duyan maddeler.
Fisil Madde	Kendiliğinden ya da nötron ile tepkimeye giren, kendiliğinden bölünebilen madde.
Fisyon	Ağır çekirdeklerin parçalanarak iki veya üç parçaya ayrılması ve böylece enerji açığa çıkarmasıdır. Çekirdek bölünmesi.
Füzyon	Çekirdek kaynaşması. İki hafif maddenin daha ağır bir maddeye dönüşmesidir.
Hafif Su	Günlük hayatta kullandığımız sudur.
Hızlı Nötron	Enerjisi 0.1 MeV değerinden fazla olan nötronlar.
Işınım	Enerjinin elektromanyetik dalgalar veya parçacık halinde şeklinde yayılmasıdır.

Kısa Ömürlü Atık	Radyoaktifliği belirli bir denetim sonucunda yarıya inen ve yarı ömrü yaklaşık 30 yıl olan atıklardır.
Kritik	Çoğalma katsayısının (k) 1'e eşit olmasıdır.
Kontrol Çubuğu	Reaktör kalbine yerleştirilerek zincirleme tepkimeyi denetlemeye yarayan çubuklardır. Genelde Bor, Kadmiyum ve Zirkonyum gibi elementlerden yapılır.
Nükleer Yakıt	Reaktörde enerji üretmek için kullanılan fisil nüklid içeren maddelerdir.
Nükleer Zehir	Çok yüksek nötron soğurma etkin kesiti nedeniyle, reaktifliği azaltabilen maddedir.
Pelet	Nükleer yakıtların sigara izmariti şekline getirilmiş son hali. Bu peletler nükleer yakıt çubuklarına yerleştirilirler.
Reaktör Kalbi	Yakıt unsurlarını içeren ve enerjiyi üreten bölümdür.
Sızıntı Işınım	Kaynak zırhından geçerek yayılan zararlı ışıınım.
X Işıınları	Fotonlardan oluşan ve dalga boyları gözle görülenden çok daha düşük olan gama ışını dışındaki ışıınlardır.
Yakıt Çevrimi	Nükleer yakıtın geçirdiği işlenme aşamaları.
Yakıt Çubuğu	Yakıt olarak doğal uranyum kullanan reaktörde, çubuk biçimindeki yakıt unsurudur.
Yansıtıcı	Koruyucu zırhın iç bölümünü saran ve nükleer tepkime sırasında

sızan nötronların geriye dönerek tekrar tepkimeye girmesini sağlayan donanımdır. Nötronların geriye dönme olasılığı albedo ile belirlenir.

Yavaşlatıcı

Reaktörde gerçekleşen zincirleme tepkimelerde ortaya çıkan hızlı nötronları yavaşlatmaya yarayan, genellikle su veya grafitten oluşan reaktör elamanlarıdır.

Zenginleştirme

Bir elementin izotop oranında fisil maddeyi artırma işlemidir.

Zincir Tepkimesi

U-238 gibi üretken çekirdeklerin nötron kaparak yeni fisil madde oluşturmalarıdır.

Daha fazla sözcük için bkz. (Boyla & Canküyer, 1995)

EK 3: DÜNYADAKİ NÜKLEER SANTRALLERDEN ÖRNEKLER



İspanya – Vandellòs Nükleer Santrali (PWR)



Japonya – Mihama Nükleer Santrali (PWR)



Kanada – Point Lepreau Nükleer Santrali (CANDU), 7 Reaktörden oluşuyor.



Fransa – Cattenom Nükleer Santrali (PWR), Santral deniz suyu ile soğutulmadığı için su kuleleri kullanılmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet POLATOĞLU, 1990 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğretim ve Liseyi Elazığ'da tamamladı. 2014 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2016 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Astrofizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen çalışmaya devam etmektedir. İngilizce ve Arapça dillerini bilmektedir.

