



**SMR**

KÜÇÜK MODÜLER

# REAKTÖRLER



ISBN : 978-605-63465-5-2







**SMR**

KÜÇÜK MODÜLER

# REAKTÖRLER

EURELECTRIC TÜRKİYE TERMİK VE NÜKLEER ÇALIŞMA GRUBU

eurelectric  
*Türkiye*

ARALIK 2021



#### **TÜRKİYE ELEKTRİK SANAYİ BİRLİĞİ TİCARİ İŞLETMESİ**

Mustafa Kemal Mahallesi 2141 Sokak  
MOLMED Plaza No:15/9, Çankaya/ANKARA  
Yayıncı Sertifika No: 53255  
[www.tesab.org.tr](http://www.tesab.org.tr) • [tesab@tesab.org.tr](mailto:tesab@tesab.org.tr)

TESAB YAYINLARI -2

#### **KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER**

ISBN: 978-605-63465-5-2

#### **Genel Yayın Direktörü**

Gülcan KOCA

#### **Yayına Hazırlayanlar**

Eurelectric Türkiye Termik ve Nükleer Çalışma Grubu

#### **Tasarım&Baskı**

Alp Ofset Matbaacılık Ltd. Sti.  
Ali Suavi Sok. No.60 Maltepe - Ankara  
Tel. : 0.312. 230 09 97 • Faks: 0.312. 230 76 29  
[www.alpofset.com.tr](http://www.alpofset.com.tr)  
Matbaa Sertifika No: 47917

Bu yayının bütün hakları saklıdır.

© 2021, TESAB

Bu yayının hiçbir kısmı herhangi bir formda izin alınmadan  
satılamaz ya da satılmak için çoğaltılamaz.

Ancak kaynak belirtme koşuluyla, izin alınmaksızın bu  
yayından alıntı yapılabilir.

## HAZIRLAYANLAR

Bu çalışmanın hazırlanmasında, Eurelectric Türkiye Termik ve Nükleer Çalışma Grubu üyelerinden oluşan ve gönüllülük esasıyla emeği geçen ve katkı sağlayan isimler aşağıda verilmiştir.

## HAZIRLAYANLAR

Dr. İzzet ALAGÖZ

Gülcan KOCA

Muzaffer BAŞARAN

İlkin Saniye KARAPINAR

Gökçe KÜÇÜKASLAN

Merve Yağmur YARDIMCI

Behice Melis KILIÇ

Umut DÖNER

Nesrin GÜNAY

Fahrettin HOCAOĞLU

Cafer ERGİN

Kübra AYDIN

Özkan ÖZTÜRK

Cangül AKTÜRK

Seray KÜPÇÜOĞLU

Mehmet ÖZYILDIRIM

## EDİTÖRLER

Dr. İzzet ALAGÖZ

Gülcan KOCA

Muzaffer BAŞARAN

Ayten SÜMER

Fahrettin HOCAOĞLU

# Teşekkür

---

Avrupa Yeşil Mutabakatının yayınlanması ile üzerinde çalışmaların daha da yoğunlaştığı dönemde Küçük Modüler Reaktörler (SMR) konusunda, bu raporun hazırlanması için bizi yüreklendiren, motive eden ve hazırlanma aşamasından baskısına kadar desteğini esirgemeyen, başta TESAB Yönetim Kurulu Başkanı Dr. İzzet Alagöz olmak üzere Yönetim Kurulu üyeleri Orhan Kaldırım, Ömer Sami Yapıcı, Fahrettin A. Arman, Şerif Okluoğlu, Y. Hüseyin Yücebaş, Batuhan Özdemir, M. Özge Özden ve Mustafa Taşdemir'e, teşekkürlerimizi sunarız. Tüm süreci titizlikle takip ederek yanımızda olan ve her konuda desteğini esirgemeyen Selma Ülker, İlknur Atan ve TESAB Koordinatörü Ayten Sümer'e teşekkürlerimizle;

Raporun tüm sektöre faydalı olmasını dileriz. .

*SMR Yazım Ekibi*

---

EURELECTRIC, Avrupa Komisyonu içinde elektrik sektörü faaliyetlerine yön veren güçlü bir kuruluş olarak elektrik üretim, iletim, dağıtım faaliyetlerinin yanı sıra çevre, verimlilik, iklim değişikliği, e-mobilite, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik gibi elektrik üretimini doğrudan veya dolaylı olarak ilgilendiren konularda oluşturulan çalışma grupları ve komiteler marifetiyle mevzuat yapısına katkı sağlamaktadır. Ülkemiz, Eurelectric faaliyetlerine 1971 yılından bu yana katılım sağlamaktadır.



TESAB çatısı altında faaliyetler yakından takip edilmekte ve tüm çalışma gruplarına katılım sağlanmaktadır. Ayrıca Eurelectric tarafından oluşturulan tüm çalışma grupları, ülkemizde Eurelectric Türkiye Çalışma Grubu olarak TESAB çatısı altında yer almaktadır. Bu gruplardan biri olan Eurelectric Türkiye Termik ve Nükleer Çalışma Grubu tarafından hazırlanan bu raporun tüm paydaşlara fayda sağlamasını dilerim.

Avrupa Birliği'nin 2019 Aralık tarihinde yayınladığı Avrupa Yeşil Mutabakat belgesi ile 2050 yılı için net sıfır karbon hedefi belirlenmiştir. Bu hedef ile yoğun karbon üreten fosil yakıtlardan kaçınılması ve yerine yenilenebilir ve nükleer enerjinin uygulanması benimsenmiştir. Geleneksel büyük nükleer santrallerin gerek yüksek inşaat maliyetleri ve uzun inşaat süreleri gerekse de yüksek güvenlik koşullarının sağlanmasının zorlukları itibarıyla Küçük Modüler Reaktör (Small Modular Reactor - SMR) sistemlerine geçilmesi tavsiye edilmektedir.

Bu nedenle, henüz tam olarak yaygınlaşmamış ve birçok ülke tarafından tasarımı ya da araştırma çalışmaları devam eden bu sistemlerin nasıl bir teknolojiye sahip olduğu, nasıl bir süreçten geçeceği, hangi ülkeler tarafından geliştirildiğine dair bilgiler rapor kapsamında ayrıntılı olarak yer almıştır.

SMR sistemleri yakın gelecekte birçok ülke tarafından kabul görecektir ve enerji sisteminde yer alacaktır. Bu perspektifle SMR santrallerinin temel yapısının bilinmesi ve gelişmelerin takip edilmesi önemli olacaktır. Bu bilgiler ışığında hazırlanmış olan bu dokümanın nükleer enerji alanına ilgi duyan sektör uzmanları ve araştırmacı meslektaşlarım için temel bir başvuru kaynağı olacağına inanıyorum.

**Dr. İzzet ALAGÖZ**

TESAB Yönetim Kurulu Başkanı

*Daha temiz ve sürdürülebilir bir gelecek için en iyi imkan ve teknolojileri kullanarak net sıfır karbon hedefini yakalayacağız.*



# İÇİNDEKİLER

|                     |    |
|---------------------|----|
| HAZIRLAYANLAR ..... | 3  |
| TEŞEKKÜR .....      | 4  |
| ÖNSÖZ .....         | 5  |
| SUNUŞ .....         | 11 |
| KISALTMALAR .....   | 12 |
| ÖZET .....          | 19 |
| GİRİŞ .....         | 31 |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. NÜKLEER ENERJİ VE NÜKLEER SANTRAL NEDİR? .....</b> | <b>32</b> |
| 1.1. Nükleer Enerji Oluşumu-Fisyon .....                 | 33        |
| 1.2. Nükleer Santral Nedir? .....                        | 35        |
| 1.3. Nükleer Santralin Temel Bileşenleri .....           | 36        |
| 1.4. Küçük Modüler Reaktör (SMR) .....                   | 40        |
| 1.5. Nükleer Tarihçe .....                               | 41        |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2. NÜKLEER SANTRAL TEKNOLOJİSİ .....</b>                | <b>46</b> |
| 2.1 Nükleer Santral Teknolojisinin Evrimsel Gelişimi ..... | 47        |
| 2.2 Nükleer Santrallarda Reaktör Tipleri .....             | 50        |
| Basınçlı Su Reaktörü (PWR) .....                           | 50        |
| Kaynar Su Reaktörü (BWR) .....                             | 52        |
| Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR) .....                     | 52        |
| İleri Gaz Soğutmalı Reaktör (MAGNOX-AGR) .....             | 53        |
| Hafif Sulu Grafit Reaktörü (RBMK) .....                    | 54        |
| Rus Tipi Basınçlı Su Reaktörü (VVER) .....                 | 54        |
| Hızlı Nötron Reaktör .....                                 | 56        |

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3. SMR TEKNOLOJİSİ.....</b>                                                    | <b>58</b>  |
| 3.1. Su Soğutmalı (Water cooled) SMR.....                                         | 60         |
| 3.2. Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör (High Temperature Gas Cooled) SMR..... | 62         |
| 3.3. Hızlı Nötron (Fast Neutron Spectrum) SMR.....                                | 63         |
| 3.4. Ergimiş Tuz Reaktörü (Molten Salt) SMR.....                                  | 64         |
| 3.5. Mikro-Reaktörler.....                                                        | 67         |
| 3.6. Diğer Teknolojiler .....                                                     | 68         |
| <i>Araştırma Reaktörler (Research Reactors) .....</i>                             | <i>68</i>  |
| <i>Hızlandırıcı Sürümlü Sistem- ADS (Accelerated Driven System) .....</i>         | <i>69</i>  |
| <i>Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTGs).....</i>                         | <i>70</i>  |
| <hr/>                                                                             |            |
| <b>4. DÜNYADA SMR TEKNOLOJİSİ GELİŞTİREN ÜKLELER VE UYGULAMALARI.....</b>         | <b>72</b>  |
| 4.1. AMERİKA BİRLEŞİK DEVLETLERİ (ABD).....                                       | 73         |
| <i>NUSCALE.....</i>                                                               | <i>78</i>  |
| 4.2. ARJANTİN.....                                                                | 81         |
| 4.3. ÇİN.....                                                                     | 85         |
| <i>HAPPY-2000 .....</i>                                                           | <i>88</i>  |
| <i>HTR-10 &amp; HTR-PM.....</i>                                                   | <i>91</i>  |
| <i>ACP100.....</i>                                                                | <i>95</i>  |
| <i>CAP200 .....</i>                                                               | <i>98</i>  |
| 4.4. FRANSA.....                                                                  | 101        |
| <i>NUWARD.....</i>                                                                | <i>102</i> |
| <i>ASTRID .....</i>                                                               | <i>105</i> |
| 4.5. GÜNEY KORE.....                                                              | 107        |
| <i>SMART.....</i>                                                                 | <i>108</i> |
| <i>BANDI-60S .....</i>                                                            | <i>111</i> |
| 4.6. İNGİLTERE (BİRLEŞİK KRALLIK).....                                            | 112        |

|      |                                                                           |            |
|------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.7. | JAPONYA .....                                                             | 121        |
|      | <i>IMR (Integrated Modular Water Reactor) .....</i>                       | <i>123</i> |
|      | <i>CCR (Compact Containment Water Reactor) .....</i>                      | <i>125</i> |
|      | <i>DMS (Double MS – Modular Simplified and Medium Small Reactor).....</i> | <i>127</i> |
|      | <i>GTHTR300 (Gas Turbine High Temperature Reactor 300) .....</i>          | <i>129</i> |
|      | <i>HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) .....</i>             | <i>131</i> |
|      | <i>4S (Super Safe Small Simple) .....</i>                                 | <i>132</i> |
|      | <i>BWRX-300 (ABD ve Japonya) .....</i>                                    | <i>135</i> |
|      | <i>MoveLuX.....</i>                                                       | <i>136</i> |
| 4.8. | KANADA.....                                                               | 138        |
| 4.9. | RUSYA.....                                                                | 143        |
|      | <i>RITM 200.....</i>                                                      | <i>147</i> |
|      | <i>KLT-40S SMR .....</i>                                                  | <i>149</i> |
|      | <i>SVBR.....</i>                                                          | <i>151</i> |
|      | <i>BREST OD 300 .....</i>                                                 | <i>152</i> |
|      | <i>VBER-300.....</i>                                                      | <i>154</i> |

## **5. NÜKLEER SANTRAL VE SMR KARŞILAŞTIRMA..... 160**

|      |                              |     |
|------|------------------------------|-----|
| 5.1. | Teknik Ekipman.....          | 161 |
| 5.2. | Güvenlik ve Lisanslama ..... | 168 |
| 5.3. | Yakıt .....                  | 177 |
| 5.4. | Atık.....                    | 181 |

## **6. SMR YATIRIM VE MALİYET ..... 184**

|      |                  |     |
|------|------------------|-----|
| 6.1. | Maliyetler ..... | 188 |
| 6.2. | Yatırım .....    | 190 |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7. TÜRKİYE NÜKLEER SANTRAL SÜRECİ .....</b>                                       | <b>196</b> |
| 7.1. Türkiye’de Nükleer Santral tarihçe.....                                         | 197        |
| 7.2. Akkuyu Nükleer Santrali.....                                                    | 201        |
| 7.3. SMR ve Yeni Nesil Reaktör Teknolojileri açısından Türkiye’deki Gelişmeler ..... | 204        |
| 7.4. Türkiye’de Nükleer Santrallarda Mevzuat Durumu .....                            | 206        |

---

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>KAYNAKLAR .....</b> | <b>208</b> |
|------------------------|------------|

|               |     |
|---------------|-----|
| BÖLÜM 1.....  | 208 |
| BÖLÜM 2.....  | 209 |
| BÖLÜM 3.....  | 209 |
| BÖLÜM 4.....  | 211 |
| BÖLÜM 5.....  | 214 |
| BÖLÜM 6.....  | 215 |
| BÖLÜM 7 ..... | 215 |

---

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>ÖZGEÇMİŞLER.....</b> | <b>216</b> |
|-------------------------|------------|

---



*Avrupa Birliği,  
2050 net sıfır  
karbon hedefi için  
büyük kapasiteli  
nükleer santraller  
yerine kısaca SMR  
olarak adlandırılan  
küçük modüler  
reaktörleri tavsiye  
etmektedir.*

İnsanlığın var olduğu günden beri enerjiye olan ihtiyaç hep artarak devam etmiştir. Bu kapsamda Enerji talebi artan nüfus ve gelişen teknoloji ile katlanarak devam etmiştir. Enerji talebi arttıkça, daha fazla üretim yapmak için bütün birincil enerji kaynakları uzun yıllar boyu kullanılmış ve tükenme noktasına gelmiştir. Geline nokta, kullanılan kaynaklar ile şimdiye kadar çevreye verilen zararları azaltmak veya bundan sonraki süreçte de hiç zarar vermemek adına alınacak önlemler için kapsamlı çalışmalar başlatılmıştır. Avrupa Yeşil Mutabakatı bu anlamda öne çıkan önemli bir belge olarak 2050 yılını, net sıfır karbon hedefi şeklinde belirlemiştir. Aynı şekilde Birleşmiş Milletler, 1992 yılından bu yana iklim değişikliği ile mücadele etmektedir. Atılacak yeni adımlarla, daha temiz ve yaşanabilir bir dünya ile mevcut kaynakların optimum bir şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Bu aşamada fosil yakıtlardan kaçınılması ve yerine yenilebilir veya temiz enerji kaynaklarının kullanılması önerilmektedir.

Nükleer santraller, 1954 yılından bu yana ticari olarak elektrik üretiminde kullanılmakta ve her geçen gün reaktör sayısı artmaktadır. Nükleer santraller, yapısı gereği yüksek emniyet ve güvenlik kriterlerine göre inşa edilmektedirler. Bu nedenle yatırım maliyeti yüksek olabilmekte ve birçok ülke tarafından karşılanamamaktadır. Uzun yıllar bu gerçeği tecrübe eden Avrupa Birliği, 2050 net sıfır karbon hedefi için büyük kapasiteli nükleer santraller yerine kısaca SMR olarak adlandırılan küçük modüler reaktörleri tavsiye etmektedir. Ancak SMR'lar henüz ticari olarak yaygınlaşmamış olduğundan AB tarafından SMR'ların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için destek verilmektedir.

Bu kapsamda SMR'lar hakkında nükleer santral teknolojisi sahibi ülkelerin uzmanları ile teknik panel, sohbet ve konferanslar düzenlenmektedir. Sıfır karbon hedefi için nükleer endüstride öncü ülkelerde ve bu teknolojiye sahip olmak isteyen bazı ülkelerde, SMR konusunda yoğun araştırma ve değerlendirme çalışmaları yürütülmektedir.

Eurelectric Türkiye Termik ve Nükleer Çalışma Grubu olarak Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında önerilen fosil yakıttan kaçınılması ve yerine daha temiz enerji kaynaklarının kullanılmasını yakından takip ediyor ve çalışmalarımıza yansıtmaya çalışıyoruz. Bu doğrultuda Eurelectric Türkiye Termik ve Nükleer Çalışma Grubu üyeleri arasından gönüllülük esasıyla ayrı bir çalışma grubu oluşturulmuş ve kamuya açık yabancı kaynaklardan elde edilen bilgiler ve grup üyelerinin de bilgi ve tecrübeleri doğrultusunda işbu rapor hazırlanmıştır. TESAB Yönetim Kurulu Başkanı ve EÜAŞ Genel Müdürü Sayın İzzet ALAGÖZ'ün bizlere verdiği destek ile bu rapor uzun emekler sonucunda siz değerli okuyucularla buluşmuştur.

### **EURELECTRIC TÜRKİYE TERMİK VE NÜKLEER ÇALIŞMA GRUBU**

## KISALTMALAR

| KISALTMA  | AÇIKLAMA                                                                                                                                             |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1E ve N1E | Nükleer Düzenlemelere Göre Elektrikli Ekipman ve Sistemlerin Güvenlik Sınıflandırmaları                                                              |
| 4S        | Super Safe Small Simple (Japonya tasarımı reaktör)                                                                                                   |
| ABD       | Amerika Birleşik Devletleri                                                                                                                          |
| ABWR      | Advanced Boiling Water Reactor                                                                                                                       |
| AC        | Alternating Current (Alternatif Akım)                                                                                                                |
| ACP100    | Advanced Chinese Passive Pressurised Reactor (Çin'de Geliştirilmiş Entegre Edilmiş Hafif Su Reaktörü)                                                |
| ACPR50S   | Advanced Chinese Pressurised Reactors (Çin Tarafından Geliştirilen Denizde Konuşlandırılan Küçük Modüler Reaktör)                                    |
| ADS       | Accelerated Driven System (Hızlandırıcı Sürümlü Reaktör Sistemi)                                                                                     |
| AEC       | United States Atomic Energy Commission (ABD Atom Enerjisi Komisyonu)                                                                                 |
| ALARP     | As Low As Reasonably Practicable (Riskin Olduğunca En Düşük Seviyede Tutulması prensibini ifade eder.)                                               |
| ALWR      | Advanced Light Water Reactor (Gelişmiş Hafif Su Reaktörü)                                                                                            |
| AP1000    | Advanced Passive PWR (Amerikan Westinghouse Tasarımı Gelişmiş Basınçlı Su Reaktörü)                                                                  |
| Ar-Ge     | Araştırma ve Geliştirme                                                                                                                              |
| ARIS      | Advanced Reactor Information System (Gelişmiş Reaktörler Bilgi Sistemi)                                                                              |
| ASTRID    | Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration (Fransa Tarafından Geliştirilmiş Gelişmiş Sodyum Soğutmalı Küçük Modüler Reaktör) |
| BWR       | Boiling Water Reactor (Kaynar Su Reaktörü )                                                                                                          |
| BWRX-300  | Boiling Water Reactor X(Amerika ve Japonya tarafından geliştirilen küçük modüler reaktör)                                                            |
| CAP200    | China Advanced Passive PWR (Çin'de Geliştirilmiş Gelişmiş-Pasif, Basınçlı Su Reaktörü)                                                               |
| CAREM     | Central Argentina de Elementos Modulares (Arjantin Tarafından Geliştiren Küçük Modüler Basınçlı Su Reaktörü)                                         |
| CCR       | Compact Containment Water Reactor                                                                                                                    |
| CEA       | French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (Fransız Alternatif Enerjiler ve Atom Enerjisi Komisyonu)                                   |
| CERN      | Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Avrupa Nükleer Araştırma Konseyi)                                                                      |
| CHRS      | Containment Heat Removal System (Isı Çekme Sistemi)                                                                                                  |
| CGNPC     | China General Nuclear Power Group (Çin Nükleer Enerji Şirketi)                                                                                       |
| CMT       | Core Makeup Tank (Kor katma suyu tankı)                                                                                                              |
| CNEA      | National Atomic Energy Commission (Arjantin Ulusal Atom Enerjisi Komisyonu)                                                                          |



| KISALTMA  | AÇIKLAMA                                                                                                                                                           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CNNC-NPIC | China National Nuclear Corporation (Çin Ulusal Nükleer Şirketi)                                                                                                    |
| CNSC      | Canadian Nuclear Safety Commission (Kanada Nükleer Düzenleyici Kurumu)                                                                                             |
| COLA      | Construction and Operating License (İnşaat ve İşletme Lisans Başvurusu)                                                                                            |
| CPRSS     | Containment Pressure and Radioactive Suppression System (Koruma Kabı Basınç ve Radyoaktivite Baskılama Sistemi)                                                    |
| CRDM      | Control Rod Drive Mechanism (Kontrol Çubuğu Tahrik Mekanizması)                                                                                                    |
| CRIEPI    | Central Research Institute of Power Industry                                                                                                                       |
| CVCS      | Chemical and Volume Control System (Kimyasal ve Hacim Kontrol Sistemi)                                                                                             |
| ÇYSR      | Çok Yüksek-Sıcaklık Reaktörü                                                                                                                                       |
| DBC       | Design Basis Condition (Tasarım Temel Koşulları)                                                                                                                   |
| DC        | Direct Current (Doğru Akım)                                                                                                                                        |
| DEC-A     | Design Extension Condition-A (Koryum Erimesi Olmayan Tasarım Temelli Kaza - Wenra, Batı Avrupa Nükleer Düzenleyiciler Birliği'nin Sınıflandırması)                 |
| DEC-B     | Design Extension Condition-B (Koryum Erimesinin Olduğu Tasarım Temelli Kaza - Wenra, Batı Avrupa Nükleer Düzenleyiciler Birliği'nin Sınıflandırması)               |
| DHRS      | Decay Heat Removal System (Bozunma ısısı çekme sistemi)                                                                                                            |
| DMS       | Double MS (Modular Simplified and Medium Small Reactor)                                                                                                            |
| DOE       | Department of Energy (ABD Enerji Bakanlığı)                                                                                                                        |
| DVI       | Direct Vessel Injection(Direkt Basınç Kabı Enjeksiyon Hattı)                                                                                                       |
| EBS       | Emergency Boron System(Acil Durum Boronlama Sistemi)                                                                                                               |
| ECCS      | Emergency Core Cooling System (Acil Durum Kor Soğutma Sistemi)                                                                                                     |
| EDHR      | Emergency Decay Heat Removal System (Pasif Acil Durum Isı Çekme Sistemi)                                                                                           |
| EPCC      | Engineering, Procurement and Construction Contract (Mühendislik, Tedarik ve İnşaat Sözleşmesi)                                                                     |
| ERDA      | Energy Research and Development Agency (Enerji Araştırma ve Geliştirme İdaresi)                                                                                    |
| ESBWR     | Economic Simplified Boiling Water Reactor                                                                                                                          |
| ETR       | Ergimiş Tuz Reaktörü                                                                                                                                               |
| FA        | Fuel Assembly (Yakıt Demeti)                                                                                                                                       |
| FCM       | Fully Ceramic Microencapsulated(Seramik Mikro Kapsüllü Yakıt)                                                                                                      |
| FIRST     | Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology (Küçük Modüler Reaktör Teknolojisinin Sorumlu Kullanımına Dair Yapısal Oluşum) |
| FLiBe     | Florür-Lityum-Berilyum bileşikler                                                                                                                                  |

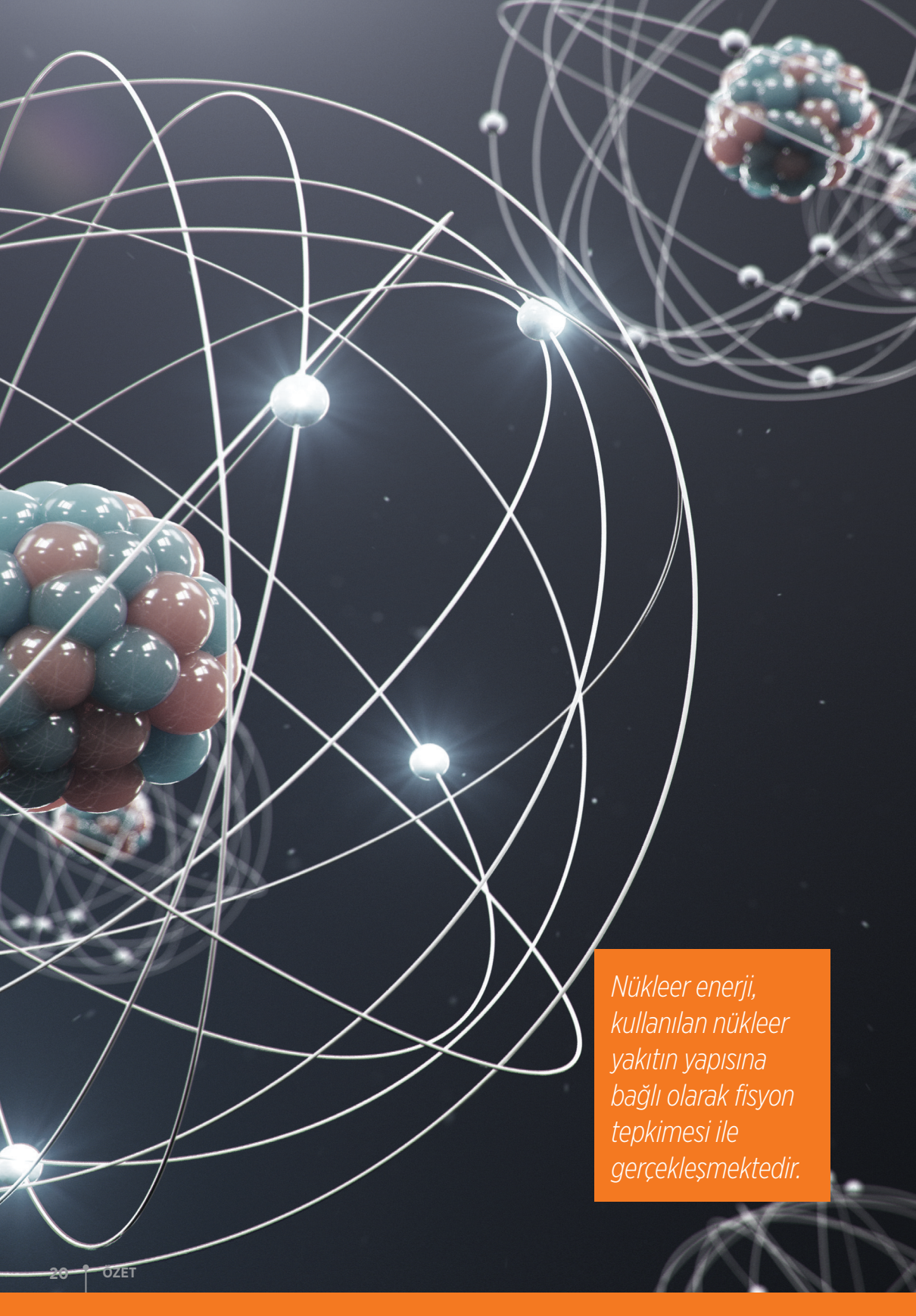
| KISALTMA | AÇIKLAMA                                                                                                                             |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FNR      | Fast Neutron Reactor (Hızlı Nötron Reaktörü)                                                                                         |
| FOAK     | First of a kind (Türünün ilk örneği)                                                                                                 |
| FSAR     | Final Safety Analysis Report (Son Güvenlik Analizi Raporu)                                                                           |
| FSER     | Final Safety Evaluation Report (Son Güvenlik Değerlendirme Raporu)                                                                   |
| GFR      | Gas-cooled Fast Reactors                                                                                                             |
| GHR      | Gas-soğutmalı Hızlı Reaktörler                                                                                                       |
| GIF      | Generation IV International Forum (IV.Nesil Nükleer Sistemler Uluslararası Forumu)                                                   |
| GT       | Gas Turbine (Gaz Türbini)                                                                                                            |
| GTHTR300 | Gas Turbine High Temperature Reactor 300                                                                                             |
| HALEU    | High-Assay Low Enriched Uranium                                                                                                      |
| HHTS     | Hybrid Heat Transport System (Nükleer Buhar Tedariği Hibrit Isı Transfer Sistemi)                                                    |
| HSS      | Hızlandırıcı Sürümlü Sistem                                                                                                          |
| HTGR     | High Temperature Gas-Cooled Reactor                                                                                                  |
| HTR      | High Temperature Gas Reactor (Yüksek Sıcaklıkta Gaz Soğutmalı Reaktör)                                                               |
| HTR-10   | High Temperature Gas-cooled Test Reactor (Çakıl Yataklı, Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Test Reaktörü)                                |
| HTR-PM   | High Temperature gas-cooled Reactor-Pebble bed Module (HTR-PMÇin’de Geliştirilen Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör)            |
| HTTR     | High Temperature Engineering Test Reactor                                                                                            |
| HVAC     | Heating, Ventilating and Air Conditioning (Isıtma Havalandırma ve Klima Sistemleri)                                                  |
| I&C      | Instrumentation and Control (Ölçü ve Kontrol)                                                                                        |
| IAEA     | International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı)                                                               |
| IFNEC    | International Framework for Nuclear Energy Cooperation (Uluslararası Nükleer Enerji İşbirliği Yapısı)                                |
| IHX      | Intermediate Heat Exchanger                                                                                                          |
| IMR      | Integrated Modular Water Reactor                                                                                                     |
| INET     | Institute of Nuclear and New Energy Technology (Çin’de Bulunan Tsinghua Üniversitesi Nükleer ve Yeni Enerji Teknolojileri Enstitüsü) |
| INL      | Idaho National Laboratory (Idaho Ulusal Laboratuvarı)                                                                                |
| IPWR     | Integrated PWR                                                                                                                       |
| IRACS    | Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System                                                                                        |
| IRR      | Internal Rate of Return (İç Kârlılık Oranı)                                                                                          |
| IRWST    | In Containment Reactor Auxiliary Cooling System (Koruma Kabı İçi Yakıt Yükleme Suyu Depolama Tankı)                                  |
| ISER     | Inherently Safe and Economic Reactor                                                                                                 |

| KISALTMA  | AÇIKLAMA                                                                                                              |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ISIR      | In-service Inspection and Repair (Muayene Ve Onarım Servisi)                                                          |
| IVR       | In vessel retention (Kap-içinde tutma)                                                                                |
| JAERI     | Japan Atomic Energy Institute                                                                                         |
| JAPC      | Japan Atomic Power Company                                                                                            |
| KA-CARE   | King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy (Kral Abdullah Atom ve Yenilenebilir Enerji Şehri)                 |
| KAERI-    | Korea Atomic Energy Research Institute (Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü)                                       |
| KEPCO E&C | Korea Electric Power Corporation Engineering and Construction (Kore Elektrik Enerjisi Şirketi -mühendislik ve inşaat) |
| KEPCO NF  | Korea Electric Power Corporation Nuclear Fuel (Kore Elektrik Enerji Şirketi -nükleer yakıt)                           |
| KHNP      | Korea Hydro & Nuclear Power (Kore Hidrolik ve Nükleer Enerji Şirketi)                                                 |
| KINS      | Korea Institute of Nuclear Safety (Kore Nükleer Güvenlik Enstitüsü)                                                   |
| KIRAMS    | Korea Institute of Radiological and Medical Sciences (Kore Radyoloji ve Tıp Bilimleri Enstitüsü)                      |
| KLT 40S   | Rusya tarafından geliştirilen denizde konuşlandırılan küçük modüler reaktör                                           |
| LEU       | Low Enriched Uranium (Düşük Zenginleştirilmiş Uranyum)                                                                |
| LFR       | Lead-cooled Fast Reactors (Kurşun-soğutmalı Hızlı Reaktörler)                                                         |
| LFTR      | Liquid Fluoride Thorium Reactor (Sıvı Florür Toryum Reaktörü)                                                         |
| LCA       | Lower Containment Area (Alt Koruma Alanı)                                                                             |
| LCOE      | Levelized Cost of Electricity (Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti)                                                   |
| LGMS      | Long-Term Cooling System Powered by Gravity (Yerçekimi İle Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi)                       |
| LOCA      | Loss Of Coolant Accident (Soğutucu Suyu Kaybı Kazası)                                                                 |
| LR        | Large Reactor (Büyük Ölçekli Reaktör)                                                                                 |
| LUEC      | Levelized Unit Electricity Cost (Seviyelendirilmiş Birim Elektrik Maliyeti)                                           |
| LWR       | Light Water Reactor (Hafif Su Reaktörü)                                                                               |
| MDEP      | Multi-national Design Evaluation Program (Uluslararası Tasarım Değerlendirme Programı)                                |
| mHTGR     | Modular High Temperature Gas-cooled Reactor (Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Modüler Reaktörler)                      |
| MHI       | Mitsubishi Heavy Industries                                                                                           |
| MISIR     | Mitsubishi Intrinsic Safe Integrated Reactor                                                                          |
| MMR       | Micro Modular Reactor(Mikro Modüler Reaktör)                                                                          |
| MOFA      | Ministry of Foreign Affairs (Dışişleri Bakanlığı)                                                                     |
| MOTIE     | Ministry of Trade, Industry and Energy (Ticaret, Sanayi ve Enerji Bakanlığı)                                          |

| KISALTMA  | AÇIKLAMA                                                                                                            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MOX       | Mixed Oxide (Yeniden İşlenmiş Plütonyum ve Uranyumdan Yapılan Nükleer Yakıt)                                        |
| MRX       | Marine Reactor X                                                                                                    |
| MSBR      | Molten Salt Breeder Reactor (Ergimiş Tuz Üretken Reaktörü)                                                          |
| MSFR      | Molten Salt Fast Reactor (Ergimiş Tuz Hızlı Reaktörü)                                                               |
| MSIP      | Ministry of Science, ICT and Future Planning (Bilim, Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Stratejik Planlama Bakanlığı) |
| MSR       | Molten Salt Reactor (Ergimiş Tuz Reaktörü)                                                                          |
| MSR       | Moisture Seperator Reheater (Nem ayırıcı ve yeniden ısıtıcı)                                                        |
| MW        | Güç Birimi (Megawatt)                                                                                               |
| NEA       | Nuclear Energy Agency (Nükleer Enerji Ajansı)                                                                       |
| NEIMA     | Nükleer Enerji İnovasyon ve Modernizasyon Yasası                                                                    |
| NIKIET    | Rusya Araştırma Enstitüsü                                                                                           |
| NGS       | Nükleer Güç Santrali                                                                                                |
| NOAK      | nth of a kind (Türünün n'inci örneği)                                                                               |
| NPV       | Net Present Value (Net Bugünkü Değer)                                                                               |
| NRC       | Nuclear Regulatory Comission (Nükleer Düzenleme Komisyonu)                                                          |
| NSSC      | Nuclear Safety and Security Commission ( Kore Nükleer Düzenleme Kurumu)                                             |
| NSSS      | Nuclear Steam Supply System (Nükleer Buhar Besleme Sistemi)                                                         |
| NUWARD    | Fransa Tarafından Geliştirilmiş Hafif Sulu Basıncılı Küçük Modüler Reaktör                                          |
| OECD      | Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü)                      |
| OKBM      | Afrikantov OKB Mechanical Engineering (Rusya'da bulunan mühendislik şirketi)                                        |
| O&M       | Operation and Maintenance (İşletme ve Bakım)                                                                        |
| ORNL      | Oak Ridge National Laboratories (Oak Ridge Ulusal Laboratuvarları)                                                  |
| Pu        | Plütonyum                                                                                                           |
| PDHR      | Passive Decay Heat Removal (Pasif Bozunma Isı Giderme)                                                              |
| PHWR      | Pressurized Heavy -Water Reactor (Basıncılı Ağır-Su Reaktörü)                                                       |
| PIUS      | Process Inherent Ultimate Safety                                                                                    |
| POSCO E&C | Posco Engineering & Construction Co. (Pohang Demir Çelik Şirketi Mühendislik ve İnşaat)                             |
| PPE       | Pre Project Engineering (Proje Öncesi Mühendislik)                                                                  |
| PSIS      | Passive Safety Injection System(Pasif Güvenlik Enjeksiyon Sistemi)                                                  |
| PSAR      | Preliminary Safety Analysis Report (Ön Güvenlik Analizi Raporu)                                                     |

| KISALTMA  | AÇIKLAMA                                                                                                                |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PWR       | Pressurized Water Reactor (Basınçlı Su Reaktörü )                                                                       |
| RCCS-RCS  | Reactor Core Cooling System (Reaktör Kor Soğutma Sistemi)                                                               |
| RCS       | Reactor Cooling System (Reaktör Soğutma Sistemi)                                                                        |
| RITM 200M | Rusya tarafından geliştirilen denizde konuşlandırılan küçük modüler reaktör                                             |
| RPS       | Reactor Protection System (Reaktör Koruma Sistemi)                                                                      |
| RPV       | Reactor Pressure Vessel (Reaktör Basınç Kabı)                                                                           |
| RVACS     | Reactor Vessel Auxiliary Cooling System                                                                                 |
| RVV       | Reactor Vent Valve (Reaktör Havalandırma Valfi)                                                                         |
| RTG       | Radioisotope Thermoelectric Generators (Radyoizotop Termoelektrik Üreteçler)                                            |
| SBWR      | Simplified BWR                                                                                                          |
| SCWR      | Supercritical Water-cooled Reactor (Süperkritik Su-soğutmalı Reaktör)                                                   |
| SDA       | Standard Design Approval (Standart Tasarım Onayı, Ön-Başvuru)                                                           |
| SFR       | Sodium-cooled Fast Reactor (Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör)                                                             |
| SGL       | Steam Generator in Liquid portion (Sıvı bölümünde yer alan buhar üretici)                                               |
| SGV       | Steam Generator in Vapour portion (Buhar bölümünde yer alan buhar üretici)                                              |
| SIT       | Safety Injection Tank (Güvenli Enjeksiyon Tankı)                                                                        |
| SLIS      | Small Leak Injection System (Küçük Sızıntı Enjeksiyon Sistemi)                                                          |
| SMR       | Small Modular Reactor (Küçük Modüler Reaktör)                                                                           |
| SNERDI    | Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute (Şanghay Nükleer Mühendislik Araştırma ve Tasarım Enstitüsü) |
| SPC -     | Smart Power Company                                                                                                     |
| ST        | Steam Turbine (Buhar Türbini)                                                                                           |
| TOSBWR    | Toshiba BWR                                                                                                             |
| TRIGA     | Training, Research, Isotope, General Atomics (Eğitim, Araştırma, İzotop ve Genel Atomik uygulamalar )                   |
| TRISO     | Tristructural ISOTropic (Küre Şeklindeki Kaplanmış Partikül Yakıtı)                                                     |
| UAMPS     | Utah Associated Municipal Power Systems                                                                                 |
| UCA       | Upper Containment Area (Üst Koruma Alanı)                                                                               |
| UO2       | Uranium Dioksit                                                                                                         |
| UPS       | Uninterruptible Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynakları)                                                                |
| VHTR      | Very High Temperature Reactor (Çok Yüksek Sıcaklık Reaktörü)                                                            |
| WACC      | Weighted Average Cost of Capital (Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti)                                                  |





*Nükleer enerji,  
kullanılan nükleer  
yakıtın yapısına  
bağlı olarak fisyon  
tepkimesi ile  
gerçekleşmektedir.*

## ÖZET

Nükleer enerji, kullanılan nükleer yakıtın yapısına bağlı olarak fisyon tepkimesi ile gerçekleşmektedir. Türkçe ifadeyle kopma olarak adlandırılabilen fisyon, en kısa tanımla atom çekirdeğinin bölünmesidir. Daha açık ifadeyle, uranyum gibi ağır bir atom çekirdeğine bir nötron çarptığı zaman, kararsız hale gelen bu atom çekirdeği, tekrar kararlı hale gelmek için iki veya daha fazla çekirdeğe bölünmektedir. Böyle bir atomun bir nötron yutması ile başlayan fisyon tepkimesi sonucunda, çok büyük bir enerji açığa çıkmaktadır. Nükleer enerji olarak adlandırılan bu enerji, elektrik üretimi başta olmak üzere farklı alanlarda değerlendirilmektedir.

Reaktör denilen basınçlı bir kap içinde gerçekleşen nükleer enerji, 1900 yıllarda reaktivitenin keşfiyle ortaya çıkmıştır. Süreç içinde yapılan deneysel ve Ar-Ge çalışmalarının sonucunda elektrik üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. İlk ticari nükleer santral 1954 yılında yapımına başlanan ve 1957 yılında şebekeye bağlanan 5MW gücündeki Rusya Moskova Obninsk Bölgesindeki santral olarak tarihte yerini almıştır.

Uranyum madeninin işlenmesiyle elde edilen yakıt peletleri vasıtasıyla reaktör içinde açığa çıkan nükleer enerji, soğutucu bir malzeme ile ısı alınarak buhar elde edilir ve türbinde işe dönüştürülerek elektrik üretimi gerçekleştirilir. Elektrik üretiminde dünyada yaygın olarak basınçlı su reaktörü (PWR) ve kaynar su reaktörü (BWR) kullanılmaktadır. PWR sisteminde, reaktör içinde elde edilen ısı ayrı bir buhar üreticiden geçirilir ve ikinci bir döngüde buhar elde edilirken BWR sisteminde doğrudan reaktör içinde buhar elde edilir ve türbine gönderilir. Soğutucu olarak genellikle su kullanılan bu tip reaktör haricinde ağır su olarak adlandırılan ağır hidrojen izotopu (D2O) kullanılan PWR sistemine benzer basınçlı ağır su reaktör tipi vardır. Yaygın olarak CANDU olarak bilinir. Bu tip reaktör haricinde soğutucu olarak su yerine gaz kullanılan sistem olarak tanımlanabilecek gaz soğutmalı reaktörler de vardır. Bunların dışında tamamen farklı bir teknoloji olan hızlı nötron reaktörleri ise fisyon zincirleme tepkimelelerinin hızlı nötronlar tarafından sürdürüldüğü bir nükleer reaktör türüdür. Bu reaktör nötron yavaşlatıcısına ihtiyaç duymaz, ancak yukarıda açıklanan reaktör türlerine göre daha fazla zenginleştirilmiş yakıt gerektirir.

Yaşanan reaktör soğutucu kaybı durumları, reaktörlerin daha emniyetli ve güvenli yapılmasını gerektirmiş ve tasarımlarda kullanılan pasif güvenlik özelliklerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Gelişen teknoloji ile bu durum, reaktörleri de daha verimli hale getirmeye zorlamıştır. Bunun sonucunda yeni nesil reaktörler geliştirilmiş ve farklı teknoloji ve kapasitelerde reaktörler tasarlanmıştır. Dünyada, nükleer

*Elektrik üretiminde dünyada yaygın olarak basınçlı su reaktörü (PWR) ve kaynar su reaktörü (BWR) kullanılmaktadır.*



santral reaktörlerinin kapasiteleri yıllar içerisinde 1200-1700 MWe kadar artmıştır. Santrallarda artan kapasite seviyeleri, inşaat süresi ve santralin mevcut elektrik şebekelerine entegrasyonu ve yapım maliyetleri gibi problemleri beraberinde getirince birçok ülke nükleer santral teknolojisinden uzak kalmıştır. Nükleer santralların zaman içinde gelişen teknoloji ile birlikte yüksek güvenli ve emniyetli yapılması gereği, yatırım maliyetlerini misliyle artmasına neden olmuştur. Bu nedenle yapılabilirlik ve kullanım kolaylığı açısından daha küçük reaktör sistemlerinin geliştirilmesi ele alınmıştır. Ayrıca SMR teknolojisi, iklim değişikliği ile mücadele kapsamında da, çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, Avrupa Komisyonun 2019 yılında yayınladığı Avrupa Yeşil Mutabakat belgesi ile “Net Sıfır Karbon 2050” hedefi doğrultusunda, SMR teknolojisi, enerji sisteminde yer alması ve geliştirilip yaygınlaştırılması için Ar-Ge çalışmalarına destek verilmesi sağlanmıştır.

Nükleer enerjide alanında önde gelen 12 ülke (Arjantin, Brezilya, Kanada, Çin, Fransa, Japonya, Rusya, Güney Kore, Güney Afrika, İsviçre ve İngiltere) ve AB Euratom, ABD liderliğinde gelecek nesil reaktörlerin birlikte geliştirilmesi konusunda, 2000 yılında “IV. Nesil için Uluslararası Forumda (Forum-GIF)” adıyla bir araya gelmişlerdir. IV. Nesil reaktörlerde; dünyanın artan enerji ihtiyaçları bir taraftan karşılanırken nükleer kaynakların daha iyi değerlendirildiği, nükleer atıkların miktarının azaltıldığı ve daha az zararlı hale dönüştürüldüğü, daha güvenli ve ekonomik özellikleri daha da geliştirilmiş ve nükleer silahların yayılması direncinin daha da artırıldığı reaktör tasarımlarına odaklanılmasına karar verilmiştir. Nükleer teknolojide öncü ülkelerde tasarlanan 130 üzeri nükleer konsept tasarımı detaylı bir şekilde ele alınmış ve teknik değerlendirmeler sonucunda 6 adet nükleer konsept, geleceğin geliştirecek IV. Nesil teknolojileri olarak seçilmiştir. Bu reaktör türleri aşağıda sıralanmıştır:

#### IV. Nesil Reaktörler

- » Çok Yüksek-Sıcaklık Reaktörü
- » Ergimiş Tuz Reaktör
- » Sodyum-Soğutmalı Hızlı Reaktörler
- » Süper Kritik Su-Soğutmalı Reaktör
- » Gaz-soğutmalı Hızlı Reaktörler
- » Kurşun-Soğutmalı Hızlı Reaktörler

Modüler nükleer santral teknolojisi, bilinen ve kabul görmüş büyük ölçekli reaktörler odağında geliştirilerek öncelikle kullanım kolaylığı ve verimlilik hedeflenerek tasarlanan sistemler olarak benimsenmiştir.

SMR teknolojisi ilk bakıldığında, büyük ölçekli (kapasiteli) santralların ekipman bazında küçültülmüşü olarak düşünülmektedir. Daha kısa boylu veya daha az sayıdaki yakıt, daha az yer kaplayacak, daha az maliyetli olacak ve daha kısa sürede yapılacaktır. Ancak geliştirilen tasarımlarda, sadece belli bir tip reaktör yapısının küçültülmüşü

değil, çok farklı tür ve teknolojiye SMR geliştirildiği görülmüştür. Nükleer teknolojiye sahip birçok ülkenin gündeminde olan SMR, teknolojisinin lisanslanabilir ve uygulanabilir olması açısından birçok farklı reaktör türünde araştırma yapılmasına katkı sağlamıştır.

İşbu raporda Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) ve Dünya Nükleer Birliği (WNA) tarafından yapılan yayınlar ışığında öne çıkan reaktör türleri aşağıda sıralanmıştır.

### SMR Türleri

1. Su soğutmalı reaktörler
2. Yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler
3. Ergimiş tuz reaktörleri
4. Hızlı nötron reaktörleri
5. Mikro reaktörler
6. Diğer Teknoloji Kullanımları
  - Araştırma Reaktörleri
  - Hızlandırıcı Sürümlü Reaktörler (ADS)
  - Radyoizotop Termoelektrik Reaktörler (RTG)

**Su soğutmalı SMR:** Dünyada yaygın olarak kullanılan ve kabul görmüş PWR sistemlerinin daha küçük ekipman boyutu ile geliştirilen tasarımıdır. Buhar üretici ve kor arasında mesafe çok azdır ve diğer ekipman birbiri ile birleşik haldedir. Kor içinde bir soğutucu kullanılmaktadır.

**Yüksek sıcaklık gaz soğutmalı SMR:** Diğer konvansiyonel nükleer reaktörlere göre daha yüksek sıcaklıklara (1000 °C'ye kadar) ulaşmaktadır. Elektrik üretim haricinde özellikle hidrojen üretimi gibi yüksek sıcaklık gerektiren bölgesel ısıtma, arıtma işlemleri ve kojenerasyon uygulamaları için ideal reaktörler olarak kabul edilmektedir. HTR tasarımının teknik temeli tri-izotropik (TRISO) kaplı kürecik yakıt kullanılmasına dayanmaktadır. Bu tür reaktörlerde yakıtların tamamı seramik olduğu ve kendiliğinden güvenli olduğu için önemli avantajlar sağlamaktadırlar. Genel olarak, HTR'nin reaktör çekirdeği, prizmatik bir blok çekirdek veya çakıl yataklı bir çekirdek olabilir.

**Ergimiş tuz reaktörleri:** Ergimiş tuz reaktörleri nükleer teknolojiler içerisinde sıvı yakıt gibi oldukça sıra dışı bir özelliğe sahiptir. Bazen Toryum yakıtlı ETR, bazen de Sıvı Florit Toryum Reaktörü olarak da adlandırılır. Diğer reaktörlerden en temel farkı, kullanılan nükleer yakıt, fertil malzeme ve soğutucunun homojen ve akışkan bir karışım şeklinde reaktör sisteminde dolaşmasıdır. Sıvı toryum florür tuzu bulunan reaktör kuşak bölgesinde (blanket region) dönüşüme uğramış olan U-233, fisil yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu reaktörler, yüksek nötron zenginliği dolayısıyla MW yük

başına ancak 1kg kadar fisil element tüketirken diğer reaktör çeşitleri daha fazla yakıt tüketirler. Bu reaktörde değişik florür tuzlarından oluşan florür-yakıt karışımı, reaktör içerisinde geçerken kritikliğe ulaşmakta ve akışkan ısınmaktadır. Bu sistemde de iki farklı ısı değiştiricisi bulunmaktadır.

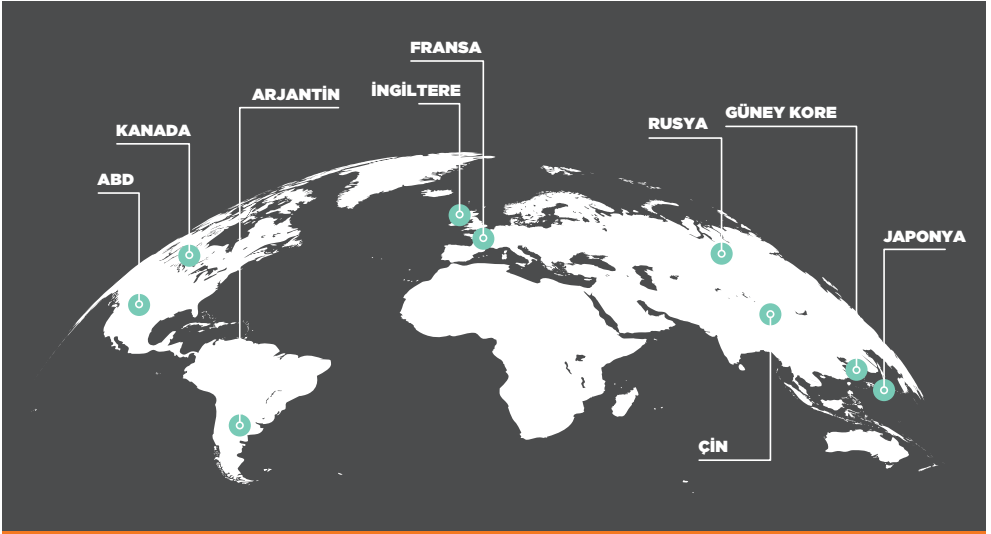
Bu reaktörler, hafif sulu reaktörlerin (LWR) iş görmüş yakıtlarında oluşan uranyum-ötesi elementlerin verimli bir şekilde tüketilmesi noktasında üstün avantajlara sahiptir. Genelde nükleer yakıt tüketmesi veya üretken bir reaktör olarak yapılandırılmış olsa da, ergimiş tuz reaktörleri, nükleer atıklardaki radyotoksitenin azaltılması için ilk akla gelen reaktör çeşididir.

**Hızlı nötron reaktörleri:** Sodyum soğutmalı, gaz soğutmalı, kurşun soğutmalı şeklinde tasarım türleri bulunmaktadır. Düşük hacminden dolayı yüksek güç yoğunluğuna sahip bir reaktördür. Bu reaktörün nötron yavaşlatıcısına ihtiyacı yoktur, ancak bir termal nötron reaktörüne kıyasla yakıt bakımından daha yüksek zenginlik oranlarına ihtiyaç vardır. Bu sistemde, kor içindeki ısı iki farklı ısı değiştiricisinden geçer. Uzun yıllardır üzerinde çalışılan bu reaktör türünde sodyum soğutmalı tiplerde 2030 veya öncesinde başarılı ticari uygulamalarının yaygınlaşması beklenmektedir.

**Mikro-reaktörler:** 10 MWe kapasitesine kadar olan reaktörler olarak tanımlanmaktadır. Mikro-reaktörler nispeten devamlı ve az enerji ihtiyacı olan uzak veya erişim kısıtlaması olan durumlar için kullanılmaktadır. Küçük adalarda veya madenlerde dizel jeneratörlerin yerine kullanılması örnek olarak verilebilir.

Mikro-reaktörler normal reaktörler gibi değişik teknolojiye sahip olabilmektedir. Isıtıcı-borulu sistemler, yüksek sıcaklık gaz reaktörleri (HTGR), ergimiş tuz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörleri (HTR) ve ergimiş-metal soğutmalı hızlı reaktörler gibi teknolojiler bulunmaktadır.

**Diğer Teknoloji Kullanımları:** SMR olarak adlandırılmayan ancak kısmen enerji ihtiyacı veya kısmen araştırma çalışmalarında kullanılan sistemlerden kısaca bahsedilmektedir. Araştırma, deniz altı uygulamaları, askeri ve uzay amaçlı olarak kullanılan reaktörlere kısaca yer verilmiştir. Bu tür reaktörler üç başlık altında “Araştırma Reaktörler, ADS ve Radyoizotop Termoelektrik Reaktörler (RTG)” incelenerek bu alandaki ilerlemelerden bahsedilmiştir.



**İşbu raporda nükleer santral konusunda öncü olan veya SMR geliştiren ülkelerin mevcut SMR tasarımları hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır. ABD, Arjantin, Çin, Fransa, G. Kore, İngiltere, Japonya, Kanada ve Rusya olmak üzere toplam 9 ülke incelenmiştir.**

**ABD:** Dünyanın en büyük nükleer güç üreticisi ABD Kasım 2021 itibarıyla net kapasitesi 95,5 GW olmak üzere işletme halinde toplam 93 adet büyük ölçekli nükleer reaktör ünitesine sahip olup; farklı kapasite ve teknoloji seçeneklerinde Küçük Modüler Reaktörleri (SMR) de desteklemekte ve geliştirmektedir. Nisan 2021 İklim Liderleri zirvesinde; SMR Teknolojisinin Sorumlu Kullanımı için Temel Altyapı (FIRST) programı projesi başlatılmış ve Dışişleri Bakanlığınca desteklenmektedir. Aynı zamanda yasal olarak da destek verilmektedir. Ülkede geliştirilen birçok SMR tasarımı için ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu NRC'ye ön-başvuruda bulunulmuştur. ABD'de şu anda geliştirme ve lisanslama aşamasında olan su soğutmalı SMR tasarımı ve teknolojisi, 60 MW(e) NuScale, SMR-160 (Holtech) ve BWRX-300 ile 195 MW(e) mPower ve 225 MW(e) Westinghouse SMR tasarımları öne çıkmaktadır. Bu tasarımlar içinde öne çıkan NUSCALE SMR tasarımı; NRC'den 2020 Ağustos ayında Tasarım Sertifikasyon Onayı almıştır. Bu onay herhangi bir SMR tasarımı için bir ilk olup, NUSCALE SMR dünyada ilk defa tam bir tasarım sertifikası alma yolunda ilerlemektedir.

**Arjantin:** Nükleer santral sahibi olan ülkeler arasında yer alan ülkede halen üç nükleer santral Atucha I (CNA-I, İspanyolca'daki baş harfleriyle), Atucha II (CNA-II) ve Embalse (CNE) olmak üzere faaliyet göstermektedir. Bu santrallardaki tecrübelerini SMR çalışmalarına da yansıtmışlardır. CAREM 25 adlı SMR tasarımı yapım aşamasındadır ve dördüncü bir nükleer santralin olası inşası için müzakereler devam etmek-

tedir. CAREM, tamamen Arjantin’de tasarlanmış ve inşa edilmiş ilk reaktördür. Bu nedenle nükleer santrallerin geliştirilmesi ve devreye alınması noktasında Arjantin kendisini SMR segmentinde dünya liderlerinden biri olarak şekillendirmektedir. CAREM reaktörün çalışma prensibi temel olarak basitleştirilmiş bir basınçlı su reaktörüne (PWR) dayanır. Yakıt olarak %3,1 zenginleştirilmiş  $U^{235}$  (uranyum dioksit) kullanılmıştır.

**Çin:** 56 adet nükleer üniteye sahip olup nükleer alanda dünyada önde gelen ülkelerden biridir. Elde ettiği bu deneyimle, SMR teknolojisinde de yenilikçi çalışmalar yürütmektedir. Dünyada en yaygın olarak kullanılan hafif su ile çalışan reaktör tasarımının yanı sıra farklı malzemelerin soğutucu ve yavaşlatıcı olarak kullanıldığı SMR tasarımları üzerinde çalışmaktadır. Çin’in HAPPY200, HTR-10& HTR-PM, ACP100, CAP200 gibi küçük modüler reaktör tasarımları dikkat çekmektedir. HAPPY-200’ün yer seçimi ve ön fizibilite çalışmaları tamamlanmış olup 2022 yılında Çin’de bir prototip (öntür) nükleer santral yapılması planlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutucu küçük modüler reaktör tasarımları olan HTR-10 ve HTR-PM tasarımları öne çıkmaktadır. Test reaktörü niteliğindeki HTR-10 için tasarım ve lisanslama aşaması tamamlanmıştır ve tam kapasite ile çalışmaya başlamıştır. HTR-PM ise elektrik üretimi için kullanılacak ticari bir tanıtım santrali olup ilk reaktör 2021 Eylül tarihinde ilk kritikliğe ulaşmıştır. ACP100, elektrik üretiminin yanı sıra ısıtma, deniz suyunun tuzdan arındırılması gibi çoklu amaçlarla tasarlanmıştır ve detaylı tasarım aşamasındadır. CAP200 için detaylı tasarım çalışmaları devam etmektedir.

**Fransa,** nükleer enerjiden elektrik üreten ülkeler arasında öncü niteliğindedir ve toplamda 58 adet hafif sulu nükleer güç santrali bulunmaktadır. Fransa’nın NUWARD ve ASTRID gibi küçük modüler reaktör tasarım çalışmaları bulunmaktadır. 2016 yılında başlayan ASTRID projesi, 2018 yılında Fransa’nın Japonya ile ortak geliştirmeyi durduracağını bildirmesi ile 2019 yılında iptal edilmiştir. NUWARD, kavramsal tasarım aşamasındadır ve 2030 yılında inşaat çalışmalarının başlaması öngörülmektedir. Fransa’nın SMR çalışmalarına tekrar ağırlık vereceğine dair resmi açıklamalar yapılmıştır.

**Güney Kore,** nükleer ile ilgili faaliyetlerini, 1957 yılından itibaren arttırarak devam ettirmiştir. Sanayileşme politikalarına paralel olarak yoğun bir nükleer enerji politikası yürüten G. Kore, kısa zamanda tasarım, üretim, inşaat, işletme, bakım, yakıt üretimi ve güvenlik gibi konularda kendini geliştirmiştir. Çernobil ve Fukushima kazalarından sonra doğası gereği daha güvenilir olan SMR çalışmalarına ağırlık vermiştir. 1997 yılında çalışmalarına başlanan ve 15 yıllık bir araştırma neticesinde 2012 yılında SMART tasarımını geliştirmiştir. Bunu takiben piyasa talebine göre yüzen nükleer santral tasarımı olan BANDI-60S tasarımı üzerinde çalışmaları devam etmektedir.

**İngiltere (Birleşik Krallık):** Nükleer enerji çalışmalarında önde gelen ülkelerden biri olarak Magnox reaktör türünde tecrübe sahibi olmuş ancak bu santrallerini kapatmıştır. Gaz soğutmalı 12 adet ve diğeri PWR olmak üzere toplam 13 adet işletmede olan reaktör sayısı ile toplamda 7833MW kapasite ile elektriğinin %20'sini nükleer santrallardan karşılamaktadır. Halen 2 adet PWR tip reaktör yapımı devam etmektedir.

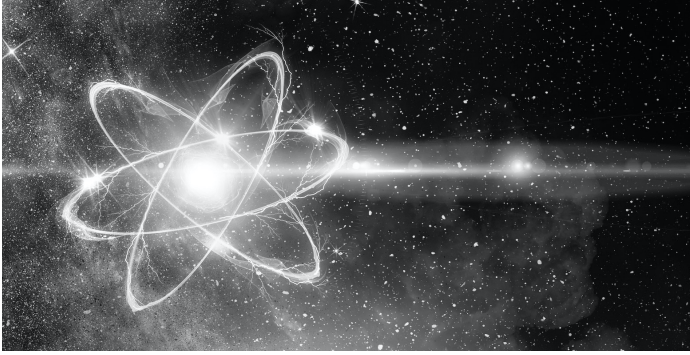
2050 yılına kadar enerji ihtiyacı bugünkünün neredeyse iki katına çıkacağı tahmin edilen Birleşik Krallık hem enerji ihtiyacını karşılama hem de net karbon salımını sıfıra indirme hedefine ulaşmak için nükleer enerjinin önemli bir rol oynayacağını savunmaktadır. Daha küçük ölçekli ve basit tasarıma sahip SMR teknolojisi 2014'ten beri hükümetin gündeminde olup proje geliştirilmesi için ciddi tutarda yatırımlar yapılmıştır. Bu kapsamda, İngiliz sanayi devi Rolls-Royce tarafından tasarlanmış patentli bir modüler konsept geliştirilmektedir. Geliştirilen tasarım UK-SMR olarak adlandırılmış ve Rolls-Royce liderliğindeki konsorsiyum ile yapılması öngörülmüştür. Üretimden doğan maliyetlerin dengelenmesi için SMR'lerin ihraç edilmesi hedeflenmektedir. Her şeyin planlandığı gibi gitmesi halinde ilk SMR'lerin 2030'larda faaliyete geçmesi beklenmektedir.

**Japonya,** nükleer santrallardan elektrik üreten ve bu alanda teknoloji geliştiren ülkeler arasında yer almaktadır. Nükleer santral tecrübesini SMR alanına da yansıtmıştır. 1990'lara kadar SMR tasarımları geliştirilmesine rağmen SMR kurulumu gerçekleştirilememiştir. Japonya'da IV. Nesil reaktör geliştirilmesine yönelik 2000 yılından sonra SMR Ar-Ge çalışmaları ve tasarım geliştirilmesi yeniden yapılmaya başlanmıştır. 11 Mart 2011'deki deprem ve Fukushima kazasından sonra Japonya'da SMR dâhil olmak üzere nükleer santral yapımı durdurulduğundan SMR'nin Japonya'daki geleceği belirsizdir. Nükleer enerji politikası Japonya'da tartışma halinde olmasına rağmen Japon SMR tasarımlarına ait kurulum faaliyetleri diğer ülkelerde devam etmektedir.

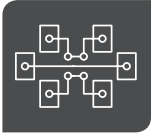
**Kanada,** nükleer enerji faaliyetlerine 1942'de ağır su nükleer reaktörün araştırılması ve tasarlanması amacıyla başlamıştır. Nükleer araştırma ve teknolojiye lider ülkelerden biri olan Kanada, 19 reaktör 13,5 GWe kapasite ile elektriğinin yaklaşık %15'ini nükleer enerjiden sağlamaktadır. CANDU ağır su reaktör alanında uzun yıllar tecrübesi bulunmaktadır. 2018 yılında SMR geliştirilmesi konusunda bir yol haritası yayınlanmıştır. Bu alanda kabul görmüş CANDU® teknolojisine dayanan 300MW(e) bir reaktörü, basitleştirilmiş sistemler, daha az bileşen ve modüler bir tasarıma sahip olacak şekilde geliştirmek üzere halen çalışmalar devam etmektedir. CSMR olarak adlandırılan tasarımın hedefleri, kompakt bir düzende yüksek kapasite reaktörüne sahip düşük maliyetli, düşük karbonlu bir güç elde edilmesidir. 2028 yılına kadar bir SMR'ın yapılması hedeflenmektedir.



**Rusya**, ilk nükleer santrali yapan bir ülke olarak nükleer enerji uygulamalarında önder ülkelerden biridir. Bu tecrübesini SMR uygulamalarına da yansıtmış olup 50 yılı aşkın süredir buz kırıcı filolarında SMR teknolojisini kullanmaktadır. Buz kırıcı filolarındaki SMR işletme tecrübesinden faydalanarak elektrik üretim gibi farklı alanlarda yeni SMR tasarımları geliştirmektedir. Türünün tek örneği ilk yerli SMR tasarımı; yüzer santral olarak tasarlanan Akademik Lomonosov, Aralık 2019'da Rusya'nın Pevek şehrinde şebekeye bağlanmıştır. İki KLT-40S reaktör modülüne sahip santralin her bir ünitesi 35 MW gücünde elektrik üretebilmektedir. Yüzer santralin devreye girmesinin ardından 23 Aralık 2020 tarihinde Rosatom (Rusya Devlet Nükleer Enerji Kurumu) ile Yakutistan Hükümeti arasında Ust-Kuyga'da SMR teknolojisine dayalı santral inşaatı için bir anlaşma imzalanmıştır. Bu projede buz kırıcı filolarında kullanmakta olduğu SMR teknolojisinden yararlanılarak üretilen RITM-200 reaktörünün kullanılması planlanmıştır.



**Geleneksel büyük ölçekli nükleer santraller ile SMR'lar karşılaştırılması teknik ekipman, güvenlik - lisanslama, yakıt ve atık açılarından değerlendirilmiştir.**



**Teknik ekipman** açısından karşılaştırıldıklarında, su soğutmalı SMR'ların, dünyaca kabul gören teknolojiler olan büyük ölçekli reaktör tasarımları baz alınarak geliştirildiği görülmektedir. Büyük ölçekli santrallara göre SMR tasarımlarında, sistem ve bileşenlerin sayısı büyük ölçüde azaltılmıştır. Bazı SMR tasarımlarında birincil sistemin bileşenlerinin, reaktör kabının içine veya yakınına entegre edilebildiği görülmektedir. SMR tasarımlarındaki modülerleşme ve sistem entegrasyonu ile tasarımın sadeleştirilmesi; bileşen, maliyet ve mühendislik risklerinde ve soğutma suyu ihtiyacında azalmayı sağlamaktadır. Bunun yanında SMR tasarımları; deniz suyu tuzdan arındırma, bölgesel ısıtma, endüstriler için proses ısısı tesisleri vb. gibi farklı amaçlar için de kullanılabildikleri, küçük ve daha zayıf şebekelere sahip ülkelere kolayca uyarlanabilmektedir.



**Lisanslama** açısından değerlendirildiğinde, düşük kurulu gücünün olmasına ve birçok pasif güvenlik özelliğine sahip yenilikçi teknolojileri kullanmasına rağmen lisanslama söz konusu olduğunda büyük ölçekli reaktörler ile nihai hedefi aynıdır; çalışanların, halkın ve çev-

renin olası bir kaza durumunda korunmasını sağlamak, kaza risklerini ve herhangi bir radyoaktif salınımı en aza indirmektir. SMR'ların ömrü boyunca büyük ölçekli reaktörlere göre farklı aşamaları mevcuttur ve bu aşamalarda da farklı lisanslama yaklaşımları gerektirmektedir. Hali hazırda bulunan lisanslama çerçeveleri %5'in altında zenginleştirme ile uranyum oksit yakıt kullanan büyük tek üniteli LWR'lerin kapsamlı deneyim tabanına dayanmaktadır. Yeni tasarımlar ile yaşanacak zorluklardan biri sınırlı deneyimdir.. Amerika'ya ait NuScale tasarımı ile Güney Kore'ye ait SMART tasarımlarını standart tasarımları onaylanmıştır. Çin'e ait ACP100 tasarımı inşaat için detaylı tasarım aşamasındadır.



**Güvenlik** açısından incelendiğinde, SMR güvenlik konusu büyük ölçekli reaktörlerden farklı değildir. En önemli hedef çalışanların, halkın ve çevrenin olası bir kaza durumunda korunmasını sağlamak, kaza risklerini ve herhangi bir radyoaktif salınımı en aza indirmektir.

Büyük ölçekli reaktörlerin daha çok aktif güvenlik sistemleri mevcuttur ancak SMR'ların güvenlik sistemleri daha çok pasif sistemlere dayanır. Tasarımlarının basitleştirilmesi ile dışarıdan operatör müdahalesi ve olumsuz çevre etkileri azaltılmıştır, kapasite faktörleri büyük ölçekli reaktörlere göre daha yüksektir, sistem bileşenlerinde arıza olasılığı düşüktür.



**Yakıt** açısından değerlendirildiğinde, SMR sistemlerinde, genellikle büyük nükleer güç reaktörlerinde kullanılan yakıt kullanılmasına rağmen reaktör tasarımına göre yakıt ve yakıt çevrimleri değişiklik gösterebilmektedir. Son geliştirilen yenilikçi SMR'lar; yakıt geometrisi, yakıt tipi, yakıt zenginleştirme oranları, yakıt ikmal periyotları

açısından farklılık göstermektedir. İlk SMR tasarımları; büyük nükleer reaktörlerde kullanılmakta olan standart hafif su reaktörlerinin (LWR) mevcut tasarım boyutlarında değişiklik yapılarak elde edilmiştir. Bu nedenle ilk SMR tasarımlarda yakıt olarak genelde %5'e kadar zenginleştirilmiş uranyum kullanılmış ve bu oran sonraki tasarımlarda arttırılmıştır. SMR'lar büyük nükleer santrallara göre daha kısa boyutlu veya daha az sayıda yakıt kullanırlar. Geleneksel nükleer reaktörlerde yakıt ikmal periyodu 1-2 yılı iken, SMR tasarımlarında bu periyot daha uzundur. 30 yıl yakıt değişimi yapmadan işletmede kalabilen SMR tasarımları mevcuttur. Yakıt çevrimi seçimi SMR'ın kullanılacağı ülke tarafından yapılmaktadır.



**Atıklar** açısından incelendiğinde, SMR ve büyük nükleer santrallar benzerlik göstermektedirler. Nükleer santrallerde üretim sonucunda yakıtlar, kullanılmış yakıt veya atık olarak adlandırılır. Atıklar, içerdikleri radyoaktivite miktarına göre; muaf, çok kısa ömürlü, çok düşük-düşük-orta-yüksek seviyeli radyoaktif atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Bunların arasında yüksek seviyeli atıkların kaynağı kullanılmış yakıtlar

olup çevre ve insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. Her ülkenin kullanılmış yakıt yönetimi farklılık gösterebilir. Rusya, Fransa ve İngiltere gibi ülkeler kullandıkları yakıtları kısmen yeniden işleyerek tekrar değerlendirir. Kapalı çevrim olarak bilinen bu sistem atık yönetimi açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Diğer ülkeler ise kullanılmış yakıtları doğrudan bertaraf etmeyi tercih ederler. Bu yöntemde, kullanılmış yakıtlar belli bir süre, genellikle 10 yıl, havuzlarda depolandıktan sonra nihai bertaraf tesislerinde uzun yıllar saklanmaktadır. Uranyum zenginleştirilmesi SMR'larda büyük nükleer reaktörlere göre daha fazla olduğundan kullanılmış yakıtların havuzlarda depolama süreleri artabilmektedir.



**SMR yatırımları açısından,** büyük ölçekli reaktörlere kıyasla yatırım riski daha düşük olacağı tahmin edilmektedir. Öğörülebilir maliyetler sundukları için günümüzde cazip yatırım imkânlarıyla nükleer enerji sektöründe ilgi odağı haline gelmişlerdir. İleri kaynak tekniklerinin ve robotik montaj yöntemlerinin harmanlanmasıyla elde edilecek

prefabrike parçaların ilgili bölgelere taşınarak inşaat sahasında bir araya getirilip montajının yapılması, maliyetlerin çok daha doğru tahmin edilebilir olmasını sağladığı gibi uzun proje sürelerinde yaşanabilecek maliyet dalgalanmalarının önüne geçilmesi noktasında da fırsatlar sunmaktadır. Tesis kurulumunda zamansal ve mekânsal esneklik sağlayan, daha kısa teslim süreleriyle ölçeklenebilir, modüler ve küçük boyutlu olan SMR'ler, yatırımcıların değişen piyasa koşullarının erken sinyallerine daha hızlı ve rahat adapte olmalarına olanak tanır. Böylelikle yatırımcılar geleneksel büyük ölçekli reaktör yatırımından daha az piyasa belirsizliğine maruz kalırlar. Üretilen kWe başına düşen yatırım maliyetinin SMR'ler için daha düşük olabileceğini gösteren mevcut tahminler elbette modüllerin üretimi için tesislerin başarılı bir şekilde lisanslanmasına ve kurulmasına, seri üretim boyutuna ve sipariş hacmine büyük ölçüde bağlıdır.

Türkiye'de nükleer enerji ile ilgili ilk çalışmalar 1955 yılında "Atom Enerjisinin Barışçıl Amaçlarla Kullanılması" amacıyla toplanan 1. Cenevre Konferansı'ndan hemen sonra başlamıştır. 1956 yılında Atom Enerjisi Komisyonu (AEK) kurulmuştur. Gerekli altyapı çalışmalarından sonra 70'li yıllardan itibaren bir nükleer santral yapımı için girişimler başlatılmış ancak ekonomik gelişmeler öncelik almıştır. AEK, Akkuyu Sahası için 1976 yılında "Yer Lisansı" vermiş ve akabinde 1977 yılında, 600 MW nominal kapasiteli bir nükleer santral yapımı için ihaleye çıkmış, ancak sonuçlanmamıştır. İlerleyen süreçte 1983 yılında yine ihale açılmış ancak sonuca ulaşılamamıştır. Ukrayna'da (eski SSCB) Nisan 1986'da meydana gelen Çernobil Nükleer Kazasının yarattığı olumsuz ortam nedeniyle, Türkiye'de nükleer santral çalışmaları askıya alınmıştır. Epey bir zaman sonra Aralık 1996'da yine bir ihale yapılmıştır. Bu ihale değerlendirmesi kapsamlı bir şekilde yapılmış ancak sonuç onaylanmamıştır. Ara

verilen faaliyetler, 20 Kasım 2007 tarihli, 5710 sayılı “Nükleer Güç Santrallerinin Kurulması ve İşletilmesi ile Enerji Satışına İlişkin Kanun Tasarısı” Kanun ile tekrar başlatılmıştır. Mülga TETAŞ, 2008 yılında, 4000 MWe kapasiteli Akkuyu’da kurula-  
cak nükleer santral için ihale açmış ancak istenildiği gibi sonuçlanmamıştır. Bu  
nedenle yapılan görüşmeler neticesinde 12 Mayıs 2010 tarihinde T.C. Hükümeti ile  
Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında Türkiye Cumhuriyeti’nde Akkuyu Sahasında  
Bir Nükleer Santral Yapılmasına İlişkin milletlerarası antlaşma imzalanmıştır. Bu  
antlaşmaya göre Rusya devlet şirketi Rosatom, 4800 MW toplam kurulu güce sahip  
VVER- 1200 tipi 4 adet nükleer reaktör kurup işletecektir. Santralin ilk ünitesi 2023  
yılında devreye alınacaktır.

Yine aynı tarihlerde ikinci bir nükleer santral yapımı için farklı ülkelerle Sinop sahası  
üzerinde müzakereler yapılmıştır. Yapılan görüşmeler sonucunda Japon MHI-Itochu  
ve Fransız Engie firmalarının ortaklığında EÜAŞ’ın da dahil olduğu bir milletlerarası  
antlaşma imzalanmıştır. Bu antlaşma uyarınca sahanın fizibilite çalışması yürütül-  
müştür. Süreç içinde bu projeye amacı doğrultusunda EÜAŞ, EUAS Int. ICC şirketi-  
ni kurmuş ve EÜAŞ bünyesinde bulunan Nükleer Santraller Dairesi kapatılmıştır.  
Fizibilite çalışmaları EUAS Int. ICC marifetiyle yürütülmüştür. Çalışma sonucunda  
Sinop Nükleer Santral Projesi finansal anlamda uygun bulunmamış ve proje askıya  
alınmıştır. Bu faaliyetin yanı sıra EUAS Int. ICC, İngiliz Rolls-Royce firması ile bir SMR  
yapımı için ön görüşme yapmıştır.

Diğer taraftan hızlı nötronları ve toryum kapalı yakıt çevrimini kullanan ergimiş tuz  
reaktörünün nükleer güvenlik bakımından detay çalışmalarının tamamlanması için  
2015’te AB ülkelerinin katıldığı bir EURATOM projesi olan SAMOFAR başlamıştır.  
Türkiye’den FİGES A.Ş. ve TÜBİTAK’ın da gözlemci statüsünde katıldığı bu projede  
EVOL reaktörünün ısı değiştiricilerinin (birinci ve ikinci devreler) hesaplarını ve ta-  
sarımalarını yapmak üzere FİGES A.Ş. görev almıştır.







*Nükleer enerjinin santrallarda kullanımından kaynaklı olası olumsuz durumlara karşın çevreye zarar vermemesi için sağlam ve yedekli ekipman kullanımından insan eğitimine kadar çok detaylı bir güvenlik sistemi uygulanmaktadır.*

Sanayi devrimi ile birlikte insanlığın enerjiye olan talebi her geçen gün artarak devam etmiş ve enerjinin nasıl ve ne şekilde sağlanacağı her zaman araştırma konusu olmuştur. Bu araştırmalar, teknolojinin katlanarak gelişmesini ve yeni yöntemlerin geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Enerji talebini karşılama yöntemlerinden biri de birim yakıtta en yoğun enerji üretme imkanı veren nükleer enerjidir. Radyoaktivitenin keşfiyle temelleri atılan nükleer enerjinin elektrik üretiminde kullanımı ilk olarak 1954 yılında Rusya Federasyonu Moskova Obninsk Bölgesinde işletmeye alınmasıyla başlamıştır. Zaman içinde, kullanılan reaktör teknolojisinin geliştirilmesi ve yaşanan olumsuz durumlara karşı sürekli yapılan iyileştirmeler neticesinde bugün nükleer enerjiden elektrik üretimi yapan ülke sayısı otuzu geçmiştir. Nükleer enerjinin santrallarda kullanımından kaynaklı olası olumsuz durumlara karşı çevreye zarar vermemesi için sağlam ve yedekli ekipman kullanımından insan eğitime kadar çok detaylı bir güvenlik sistemi uygulanmaktadır. Bu nedenle nükleer santralların işletmeye alınması çok kolay olmamaktadır. Bu durumu aşmak ve elektrik üretiminde daha yaygın hale getirmek için nükleer teknolojide arayışlar devam etmektedir.

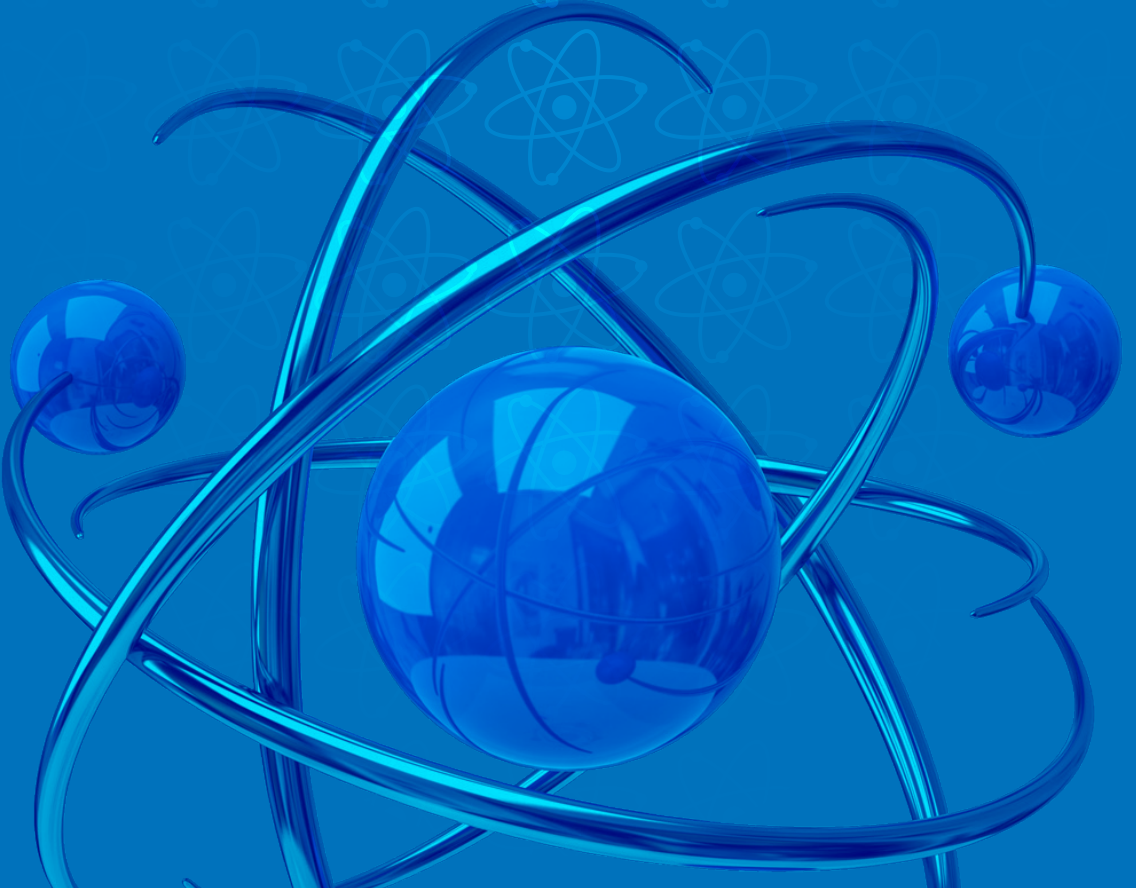
Diğer taraftan Birleşmiş Milletler tarafından iklim değişikliği ile mücadele çalışmaları 1992 yılından bu yana devam etmektedir. Avrupa Birliği, 2050 yılında sıfır karbon hedefi ile Avrupa Yeşil Mutabakat belgesini Aralık 2019'da yayınlamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı, Mayıs 2021'de "Net-Zero 2050" raporu yayınlayarak sıfır karbon hedefini desteklediğini göstermiştir. 2050 yılında sıfır karbon hedefine ulaşmak için belirlenen stratejiler, özellikle enerji alanında yoğun kullanılan fosil yakıtlardan uzaklaşılması ve yerine yenilenebilir enerjinin kullanılmasını amaçlamaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları kapasite kullanımı, ülkelerin coğrafi konumu ve sürdürülebilirlik açısından talebi karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla bu konuda özellikle de Avrupa Birliği, alternatif olarak nükleer santralların kurulmasını önermektedir. Ancak nükleer santralların yüksek güvenlik koşullarına bağlı olarak yatırım maliyetleri de yükselmekte ve bu durum da yapılabilirliklerini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle büyük ölçekli nükleer santrallar yerine, lisanslamada yeni aşamalar kaydeden küçük modüler reaktörler kısaca SMR (small modular reactor) denilen sistemlerin geliştirilmesi ve desteklenmesi benimsenmiştir. Özellikle nükleer santral teknolojisinde öncü ülkelerde bu alanda yoğun araştırmalar yürütülmektedir.

Bu rapor, küçük modüler reaktörler nedir, nasıl bir teknolojiye sahiptir, diğer büyük nükleer santral teknolojilerinden farkları nelerdir, yapım maliyeti nasıldır, hangi ülkelerde nasıl bir çalışma yürütülmektedir ve hangi aşamaya gelinmiştir gibi konuların yanı sıra, Türkiye'de nükleer santral süreci ve gelinecek noktaya dair konuların da ele alındığı genel bir bilgi sunmaktadır.

# BÖLÜM

NÜKLEER ENERJİ VE  
NÜKLEER SANTRAL  
NEDİR?

1



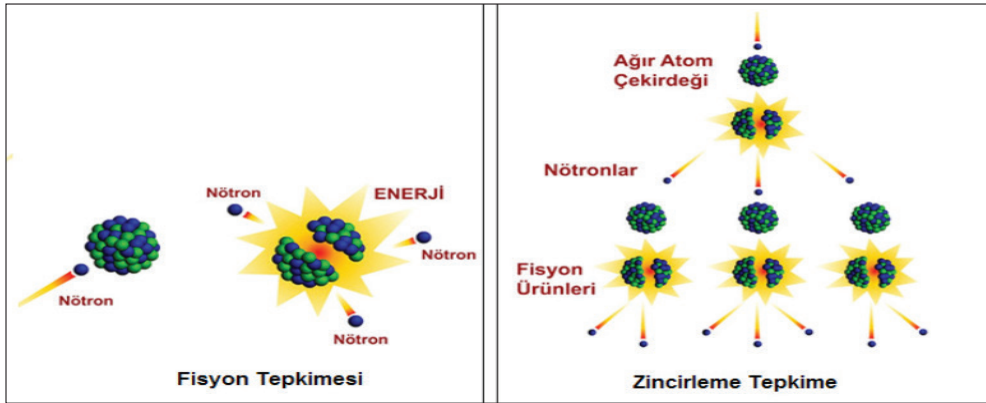


# 1. NÜKLEER ENERJİ VE NÜKLEER SANTRAL NEDİR?

## 1.1. Nükleer Enerji Oluşumu-Fisyon

Nükleer enerji, kullanılan nükleer yakıtın yapısına bağlı olarak fisyon tepkimesi ile gerçekleşmektedir. Çekirdek bölünme olarak adlandırılabilen **Fisyon** (kopma), bir nötronun uranyum gibi ağır bir atom çekirdeğine çarparak yutulması sonucu bu atomun çekirdeğinin kararsız hale gelerek daha küçük iki veya daha fazla çekirdeğe bölündüğü tepkimedir. Böyle bir atomun bir nötron yutması ile başlayan fisyon tepkimesi sonucunda, Şekil 1.1'de görüldüğü üzere çok büyük bir enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan büyük miktardaki enerji ile birlikte, birden fazla nötron da ortaya çıkmaktadır. Çekirdek tepkimeleri sonucunda açığa çıkan enerji, kimyasal tepkimelere göre yaklaşık milyon kat daha fazladır. Fisyonun yanı sıra sıklıkla karıştırılan füzyon ise hafif nükleer çekirdeklerin birleşmesi sonucu açığa çıkan ve dünyadaki yaşam kaynağı güneşin ve evrendeki tüm yıldızların yakıtının da kaynağı olan **füzyon** (birleşim/kaynaşım) tepkimeleridir [1.1].

*Çekirdek tepkimeleri sonucunda açığa çıkan enerji, kimyasal tepkimelere göre yaklaşık milyon kat daha fazladır.*



Şekil 1.1: Fisyon (Bölünme/kopma) tepkimesi ve zincirleme tepkime [1.2]

### Uranyum

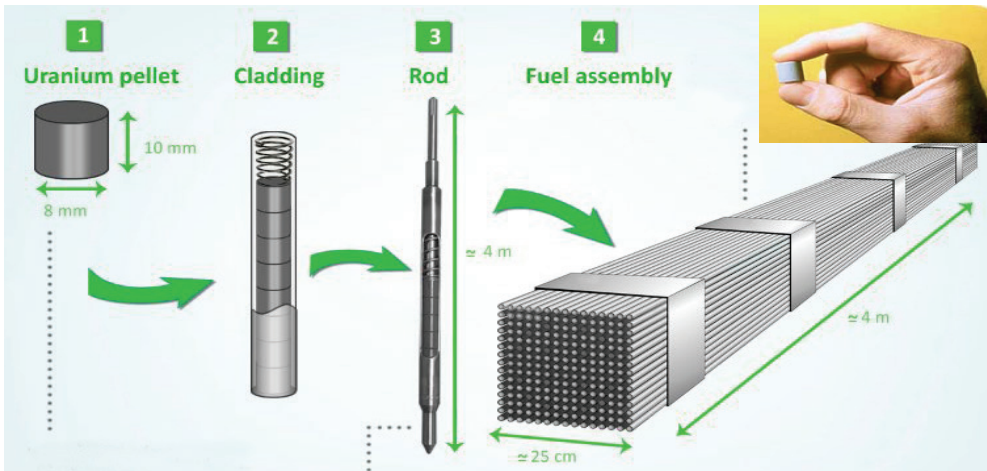
Uranyum doğada, U-235 (~ %0,7) ve U-238 (~ %99,3) izotopları şeklinde bulunabilmektedir. Bunlardan sadece U-235 izotopu, yavaşlatılmış serbest nötronlarla kolayca reaksiyona girer ve çekirdek bölünerek 2 ila 3 adet yüksek kinetik enerjili nötron ve fisyon ürünleri oluşur. U-238 izotopu, doğal uranyum içinde bol miktarda bulunur ancak yavaş nötronlarla fisyon reaksiyonuna girmez. Bununla birlikte dönüşü-

me uğrayarak Plutonyum-239'un oluşumunu sağlar. Plutonyum, fisyon tepkimesine girebilen ama doğada tabii olarak bulunmayan yapay bir elementtir (94 proton ve 145 nötron) [1.3].

Bir gram U-235'in tamamı fisyonu girdiği zaman,  $8,2 \times 10^{10}$  J enerji açığa çıkmaktadır. Bu miktar, ısı değeri yaklaşık  $5 \times 10^6$  J/kg olan yaklaşık 17 ton linyite eşdeğerdir. Normal olarak 1 ton doğal uranyumdan 44 milyon kWh elektrik üretilmektedir. Bu miktar elektrik için taş kömürü kullanılırsa 20.000 ton, doğal gaz kullanılırsa 8,5 milyon m<sup>3</sup> gereklidir. İşletmede olan reaktörler için önemli bir parametre olan yakıt yanma oranı (burn-up), yakıttan ne kadar enerji çekildiğini tariflemektedir. Bu, ton başına gigawatt-gün veya megawatt-gün olarak ölçülür ve potansiyeli yakıtın zenginleştirme yüzdesine orantılıdır. Bugüne kadar %4 zenginleştirmeye 40 GWd/t ile sınırlandırılmış olan bu değer bugün %5 zenginleştirme, daha iyi ekipman ve yakıt demetleriyle 60 GWd/t mümkündür. Yakın gelecekte %6 zenginleştirmeye 70 GWd/t olması beklenmektedir ve böylece yakıt değişimi süresi yaklaşık 24 ay gibi artarken çıkarılacak kullanılmış yakıt miktarı ve yakıt çevrim maliyeti %20 azalacaktır.

### Yakıt

Toz halindeki uranyum oksit preslenerek ve 1400°C'a kadar ısıtılarak silindir şeklindeki Şekil 1.2'de görülen peletlere (yakıt haplarına) dönüştürülür. Bu peletler metal borulara dizilerek yakıt çubukları elde edilir. Metal borular yüksek sıcaklığa ve korozyona (yenim) mukavim paslanmaz çelik veya zirkonyum alaşımından yapılmaktadır. Çubuklar yan yana dizilerek önce yakıt levhaları, levhalar da yan yana monte edilerek yakıt demetleri oluşturulur. Tipik bir BWR reaktörü için 46.000 yakıt çubuğu ve 750 civarında yakıt demeti kullanılmaktadır [1.4].



Şekil 1.2: İşlenmiş Uranyum (Yakıt çubukları) [1.4, 1.5]

## Radyasyon (Işınım)

Nükleer enerji teknolojisinin temelinde radyoaktivite olgusu vardır. Henri Becquerel radyoaktiviteyi 1896'da keşfetmiştir. Bazı elementlerin kimyasal yapısı gereği atom çekirdekleri karardır. Çekirdekleri kararsız olan atomlar ise kararlı hale gelmek için belli bir zaman diliminde bozunurlar. Radyoizotop olarak adlandırılan bu yeni yapı oluşumunda radyasyon açığa çıkmaktadır. Atom çekirdeğinden kaynaklanan radyasyonun farklı türleri vardır [1.6]:

**Alfa ışınımı**, pozitif yüklü helyum çekirdekleridir ( $^4_2\text{He}$ ). İnce bir kağıt tabakası tarafından kolayca durdurulur.

**Beta ışınımı**, negatif yüklü elektronlardır. İnce bir su veya metal tabakası tarafından durdurulur.

**Gama ışınımı**, çok kısa dalga boylu elektromanyetik dalgalardır. Birçok malzemeden kolayca geçebildiğinden gama ışınımından korunmak için kalın kurşun levhalar ve beton bloklar kullanılır.

**Işınım**, canlı hücrelerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle ortamlarda ışınım ölçümleri yapılır ve buna göre zarar noktasında uyarı yapılarak tedbir alınır [1.6].

Işınım ölçümleri için kullanılan radyoaktivite birimleri aşağıdaki gibidir:

1 Becquerel = bozunum/s,

1 Curie =  $3,7 \times 10^{10}$  bozunum/s'dir.

Örnek olması açısından Çernobil reaktör kazasından sonra açığa çıkan sadece Cs-137 kaynaklı radyoaktivite yaklaşık 2 Milyon-Curie (MCI) iken, maden suyundaki radyoaktivite 10-12 piko Curie düzeyindedir.

Canlılar tarafından soğurulan radyasyon dozunun birimi Sievert (Sv), soğurulan 1 J/kg enerjinin, radyasyon türünün kalite faktörüyle çarpımından elde edilir. Gama radyasyonunun kalite faktörü 1 iken, alfa radyasyonunun kalite faktörü 20'dir. Bu da alfa kaynağı olan maddelerin vücuda alınmasının tehlikesini göstermektedir. İnsanlar için bir akciğer filmi çekildiğinde 0.1 mSv dozunda X radyasyonu alınmaktadır.

## 1.2. Nükleer Santral Nedir?

Nükleer santral, termik santral (kömür ve doğalgaz santralleri gibi fosil kaynaklı) prensibi çerçevesinde, bir yakıttan sağlanan ısı ile sistem çevriminde kullanılan suyun buhar haline getirilerek türbin -jeneratör sistemlerinde işe dönüştürülmesiyle elektrik enerjisi elde edilen bir sistemler topluluğu olarak tanımlanabilir. Yakıt çubuklarından elde edilen ısı, reaktör denilen bileşende sağlanmaktadır. Nükleer reaktör içerisinde gerçekleşen zincirleme fisyon tepkimeleri sonucu ortaya çıkan ısı,

genellikle işlenmiş ve yakıt çubuğu haline getirilmiş uranyumdan elde edilmektedir. Nükleer reaktörler, nükleer zincirleme tepkimenin başlatılması ve kontrol edilmesi amacıyla tasarlanmış sistemlerdir. Santrallarda elektrik üretiminde, denizaltılarda ise hareket amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik üretim santrallerinde, bir reaktör ve ilgili sistemlerin olduğu bölüm genellikle bir ünite olarak tanımlanmaktadır.

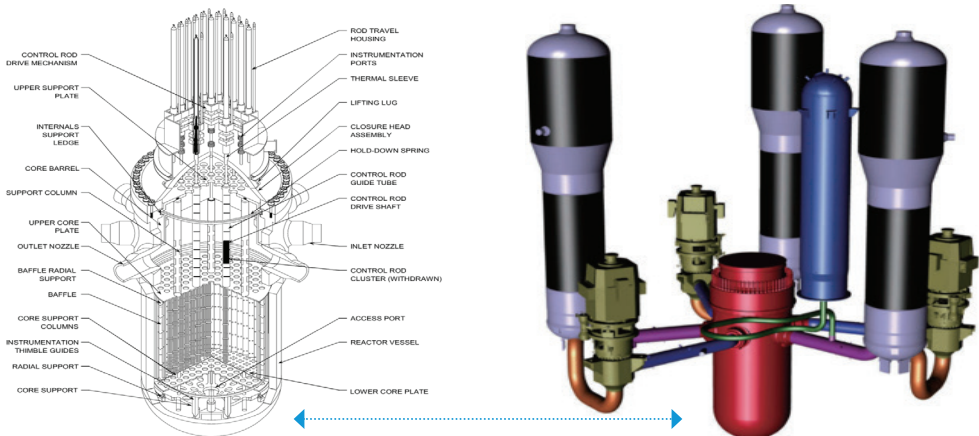
Nükleer santraller, içerdiği nükleer reaktör teknolojilerindeki farklılıklara göre değişik şekillerde adlandırılır. Dünyadaki 453 nükleer santralin yaklaşık olarak üçte ikisi, “Basınçlı Su Reaktörü (PWR)” dır. Kalan kısmın çoğu “Kaynar Sulu Reaktör (BWR)” ve “Basınçlı Ağır Sulu Reaktör (PHWR)” teknolojisi olmak üzere en çok kullanılan nükleer santral tipleridir. Bunlara ek olarak; Gaz Soğutmalı Reaktörler (GCR), Hızlı Üretken Reaktörler (FBR) ve Grafit Yavaşlatıcılı (İlmlayıcı) Su Soğutmalı Reaktörler (LWGR) de bazı ülkeler tarafından kullanılmaktadır.

### 1.3. Nükleer Santralin Temel Bileşenleri

Nükleer santraller fisyon tepkimesini kullandıkları için diğer santrallara göre özellikle güvenlik açısından farklı sistemlere sahiptir. Birincil soğutma sistemi ve ikincil soğutma sistemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Birincil soğutma sisteminde basın kabı, buhar üretici, basınçlandırıcı ve pompalar mevcuttur. İkincil soğutma sistemi ise buhar üretici, türbin, jeneratör, yoğuşturucu (kondenser) ve pompalardan oluşmaktadır [1.7].

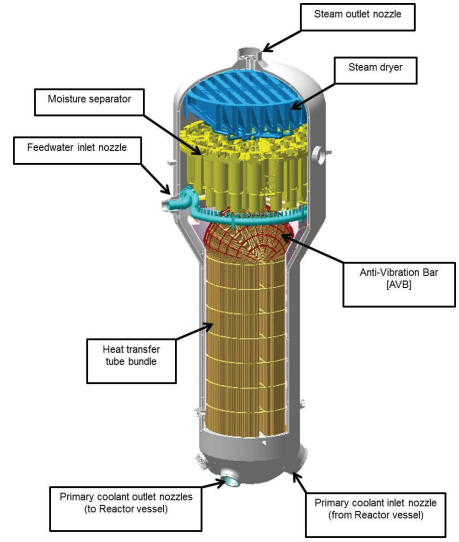
#### Santral Bileşenleri

**1. Reaktör Basınç Kabı:** Reaktör çekirdeği ile birlikte içinde soğutma suyu ve oluşan kızgın suyu barındıran içinde fisyon tepkimelerinin gerçekleştiği, yüksek sıcaklığa ve basınca dayanıklı büyük silindirik çelik kaplardır [1.7]. Temsili çizimi Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3: Basınç kabı [1.8, 1.9]

**2. Buhar Üretici:** Basınçlı su reaktörlerinin (PWR) soğutma sisteminin bir parçası olup reaktörden gelen yüksek basınçlı birincil soğutma sıvısı, ikincil bir devre olarak bu sistemden geçerek türbine gönderilecek buhar üretilmektedir. Isı değiştiricisi veya ısıyı bir akışkandan diğerine aktaran büyük ısı değiştiricileri (eşanjörleri) olarak adlandırılabilir. Tasarıma bağlı olarak değişmekle birlikte her yapı yaklaşık 800t ağırlığa sahiptir ve yaklaşık 2 cm çapında 3000 ila 16.000 tüp boru içermektedir. Buhar üreticilerindeki boruların, titreşmeyecek ve sürtünmeyecek şekilde tasarlanması, birikintilerin akışı engellemeyecek şekilde temizlenmesi ve korozyonu önlemek için kimyasal olarak muhafaza edilmesi önemlidir. Reaktördeki su radyoaktif olduğundan, buhar üreticindeki olası sızıntılar, çıkış borusundaki N-16 seviyeleri izlenerek tespit edilebilir [1.10].



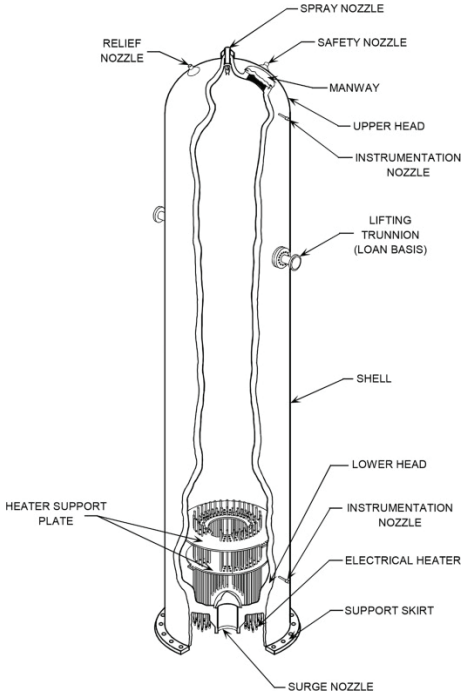
Şekil 1.4: Buhar üretici [1.8, 1.11]

**3. Koruma Kabı (Containment):** Reaktör içerisinde herhangi bir ciddi arıza olması durumunda reaktörü, uçak çarpması vb. dış müdahalelerden ve çevreyi radyasyon etkilerinden korumak için tasarlanmış bir yapıdır. İçinde reaktör ve ilgili buhar üreticileri, basınçlandırıcı ve yardımcı ekipman yer almaktadır. Genellikle bir metre kalınlığında beton ve çelik yapıdan oluşmaktadır. Son gelişen sistemlerde, reaktör bütünlüğünün bozulması durumunda ergimiş koron çevreye zarar vermeme için basınç kabı altına kor tutucu olarak adlandırılan özel yapılar tasarlanmıştır [1.10].



Şekil 1.5: Koruma kabı [1.12]

**4. Basınçlandırıcı:** Basınçlı su reaktör (PWR) tiplerinde kullanılan bir ekipmandır. Basınçlı su reaktörünün temel çalışma prensibinde amaç reaktör soğutma suyu/sıvısının kaynamamasını sağlamaktır. PWR'larda kaynamanın meydana gelmemesi çok önemli bir güvenlik parametresi olduğu için reaktördeki soğutma suyu, kaynama meydana gelmeyecek kadar yüksek bir basınçta tutulur [1.9].



**Şekil 1.6:** Basınçlandırıcı [1.9]



**Şekil 1.7:** Türbin sistemin açık gösterimi [1.15]

ğıştiricisi olarak tanımlanabilir. Sistemdeki borularda çevrim suyu dolaşırken, boru çevresinde soğutma kulesinden gelen soğutma suyu dolaşmaktadır. Sistem çevrim suyu bu ekipman vasıtasıyla su olarak sisteme geri döndürülebilir. Basıncılı su reaktöründe su, buhar üreticine geri gönderilirken, kaynar su reaktöründe reaktör çekirdeğine geri döner.

**7. Soğutma Kulesi:** Nükleer santrallarda soğutma işlemi genellikle nehir veya deniz gibi büyük kapasiteli suyu olan rezervler tercih edilmektedir. Nehir/Deniz olmayan yerlerde soğutma işlemi için soğutma kulesi tercih edilmektedir.

Basınçlandırıcı, PWR'larda sıcak hat olarak bilinen birincil devre üzerinde yer alır ve tasarıma bağlı olarak sistemdeki basıncın belli bir değer aralığında tutulmasını sağlar (genellikle 15-16 MPa). Kısım su ile dolu basınçlandırıcıda, sıcaklık 350°C (662°F) dolayında tutulmaktadır. Sistem basıncının düşmesi durumunda elektrikli ısıtıcılar tarafından, istenen basınca göre doyma sıcaklığına kadar (kaynama noktası) su ısıtılırken, basınç-yükseldiğinde emniyet vanalarının açılmasıyla basınç dengesi korunmaktadır [1.13].

**5. Türbin:** Nükleer santrallarda, yüksek basınç ve düşük basınç türbini ile tek bir rotor boyunca düzenlenmiş jeneratör kullanılmaktadır. Diğer termik santrallara benzer bir şekilde buharın iş yaptığı ve elektriğin üretildiği ekipmandır. Türbine gelen yüksek ısı buharından 1.800 MW'a kadar güç üretebilir. Türbinler, endüstrideki en yüksek verimlilikle son derece güvenli ve güvenilir olacak şekilde tasarlanmıştır [1.14].

**6. Yoğuşturucu (Kondenser):** Türbinden çıkan su ve buhar karışımını yoğuşturmak için kullanılır. Türbinden çıkan buharı, soğutmak için tasarlanmış büyük bir ısı de-



## Reaktör Bileşenleri

**1. Yakıt:** Nükleer enerjinin en önemli temel taşı olan yakıt yukarıda bahsedildiği gibi tabiatıta doğal olarak bulunan uranyumdan sağlanmaktadır. Bölünebilen ve bölünmesiyle ısı açığa çıkaran bir madde olan U-235, nötronların çarpması ile kolayca fisyon tepkimesini gerçekleştirebilmektedir. Yaygın ticari reaktörlerde, doğada bulunandan daha yüksek konsantrasyonlarda U-235 kullanıldığından (%2-5), bu yüksek konsantrasyon zenginleştirme yöntemi ile elde edilmektedir. Zenginleştirme yapmadan doğal uranyumu yakıt olarak kullanan ticari reaktörler de mevcuttur [1.13].

Yavaşlatıcısı hafif su ( $H_2O$ ) olan reaktörlerde, yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum kullanılır. Uranyumun zenginleştirilmesi, doğal Uranyumun içindeki U-235 izotopu oranının artırılması demektir. Nükleer santrallarda %2-5 oranında U-235 içeren yakıt kullanılır. Araştırma reaktörlerinde zenginleştirme oranı genelde %20 düzeyindedir. Bir BWR santral türünde kullanılan yakıt demeti Şekil 1.8'de görülmektedir [1.14].



Şekil 1.8: BWR yakıt demeti [1.4]

Nükleer santrallarda maliyet önemli olduğu ve reaktör büyüklüğünde bir kısıtlama bulunmadığı için %2-5 oranında zenginleştirme yeterlidir. Ama bir nükleer denizaltısında reaktör boyutunun küçük olması gerektiğinden kullanılan yakıtın zenginliği de %90 düzeyindedir.

**2. Yavaşlatıcı (Moderatör):** Fisyon sonucu ortaya çıkan hızlı nötronların tekrar fisyon tepkimesinin devam ettirebilmesi ve verimliliği artırmak için bu nötronların yavaşlatılması gereklidir. Bunun için reaktörlerde yavaşlatıcı (moderatör) kullanılır. Yavaşlatıcı, fisyon sonucu oluşan yeni nötronların yavaşlatılmasını sağlayacak hafif bir malzeme olmalıdır. Yavaşlatma işlemi için yaygın olarak normal su ( $H_2O$ ) kullanılır, alternatifleri ise ağır su ve bir karbon formu olan grafittir. Bu şekilde hızlı nötronların hızının düşürüldüğü malzemeye yavaşlatıcı (ılımlayıcı) denmektedir [1.13].

**3. Soğutucu:** Nükleer fisyon sonucu oluşan ısıyı yakıttan çekmek ve yakıtın sıcaklığını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için akışkan bir malzemeye ihtiyaç duyulur. Eğer elektrik üretimi için soğutucu olarak su kullanılıyorsa, kor içine ısınan su ya buhar olarak doğrudan türbinlere gönderilir veya gerekli buharı üreten ısı değiştiricisine gönderilir. Hafif su haricinde, döteryum atomları içeren ağır su, hava,

karbondioksit, helyum gibi gazlar, sıvı sodyum, sıvı sodyum-potasyum alaşımı, kurşun veya bismut gibi ergimiş metaller yanı sıra hidrokarbonlar dahil olmak üzere çeşitli maddeler soğutucu olarak kullanılmıştır. Bu tür maddeler, genel olarak, iyi ısı iletkenleridir ve fisyon tarafından üretilen termal (ısı) enerjiyi yakıttan üzerlerine almış olurlar. Bu ısı, araştırma reaktörlerinde olduğu gibi ya doğrudan atmosfere atılır ya da nükleer santralin buhar üreten ekipmanına taşınması sağlanır. Genellikle aynı madde, hafif ve ağır su durumunda olduğu gibi hem soğutucu hem de yavaşlatıcı olarak işlev görür [1.13].

**4. Kontrol Çubukları:** Reaktör içindeki tepkimesiyle hızını kontrol etmek veya durdurmak için yakıt çubuklarının aralarında yer alacak şekilde tasarlanan ve duruma göre dışarı çekilen veya içeri alınan nötron emici çubuklardır. Bor, gümüş, indiyum, kadmiyum ve hafniyum gibi malzemeden yapılırlar. PWR kontrol çubukları üstten, BWR kontrol çubukları ise reaktörün alt kısmından girecek şekilde tasarlanmıştır. Kontrol çubukları ile bir zincir reaksiyonu kontrol edilebilir reaktörün hassas bir şekilde kritik tutulabilmesini sağlamak açısından çok önemli bir yeri vardır [1.10, 1.13].

**5. Reflektör (Yansıtıcı):** Reaktör çekirdeğinin içini çevreleyen ve yakıtın olmadığı bölge olarak tanımlanan reflektör, çekirdekten sızan nötronların sayısını azaltmak ve böylece bir kısmını reaktör çekirdeğine geri döndürmek için kullanılan özel malzemedir. Reflektör aynı zamanda, kaçacak nötronları içeride tutarak reaktör güç yoğunluğunun düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Reflektör, araştırma reaktörlerinde deney düzeneklerinin bulunduğu bölge olduğundan önemlidir. Bazı araştırma reaktör tasarımlarında, reflektörler, deneysel amaçlar için yüksek nötron yoğunluklarının elde edilebildiği merkezi adalar olarak çekirdeğin içine yerleştirilmiştir.

## 1.4. Küçük Modüler Reaktör (SMR)

Küçük Modüler Reaktör, çok genel ifadeyle, 300 MWe eşdeğer veya daha küçük kapasiteli olarak seri üretim tekniğine uygun bir yaklaşımla tasarlanmış kısa inşaat süresine sahip nükleer reaktörler olarak tanımlanabilir. Bu genel tanım, farklı tip reaktör tasarımını içermektedir ve her tasarım lisanslanabilir şeklinde kabul edilmemelidir [1.16].

Seri imalat kapsamında, daha fazla düzeyde modülerleştirme, standardizasyon ve fabrika tabanlı yapı tasarlanarak entegre olması sağlanmaktadır. İmal edilen bu modüler yapı kurulacağı yere taşınabilir ve yerinde monte edilebilmektedir. Bu durum inşaat sürelerinde öngörülebilirlik ve tasarruf sağlamaktadır.

Bugün genellikle devrim niteliğinde bir nükleer enerji teknolojisi olarak kabul edilmelerine rağmen, küçük boyutlu nükleer reaktörler bu alanda yeni bir gelişme değil-

dir. Aslında, 1950’lerin sonlarında ve 1960’larda hafif su reaktörü (LWR) teknolojisine bağlı olarak geliştirilen ve kullanılan ilk ticari reaktörler, küçük denizaltı reaktörlerinin büyük ölçüde büyütülmüş halidir denilebilir. Aynı dönemde, hükümetler tarafından çeşitli güvenlik ve askeri amaçlar için çok çeşitli küçük reaktörler inşa edildi. Mevcut küçük reaktörleri potansiyel bir oyun değiştirici yapan şey, sadece boyutları değil, tasarımlarının dönüştürücü güvenlik özellikleri, teslimat modelleri ve yeni iş durumları oluşturmak için kasıtlı olarak daha küçük boyuttan yararlanmasıdır [1.16].

## 1.5. Nükleer Tarihçe

Nükleer enerjinin kullanımı ve yayılması devam ederken bu sürecin nasıl geliştiği ve nükleer santrallerin tarihsel gelişimi aşağıda kronolojik olarak açıklanmaya çalışılmıştır.

**1789:** Alman bir kimyager olan Martin H. Klaproth tarafından “uranyum” keşfedildi. Bu yeni elementi 1781’de keşfedilen Uranus gezegeninden esinlenerek “uranyum” adı ile isimlendirdi ancak aslında keşfettiği madde uranyumun bir oksit bileşiği idi. Uranyumun saf metal olarak elde edilmesi bundan 52 yıl sonra (1841’de) Fransız kimyacı E.M. Peligot tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde uranyum yalnızca cam ve seramiği renklendirmek amaçlı kullanılmıştır [1.17].

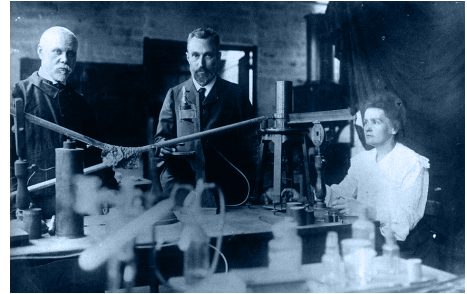
**1895:** Wilhelm Rontgen tarafından, vakumlu bir cam tüpün içerisinden elektrik akımı geçirerek x-ışınları üretmesi sonucunda iyonize edici radyasyon keşfedilmiştir [1.18].

**1896:** Fransız fizikçi Henri Becquerel, uranyum-radyum karışımı bir maddenin fotoğraf plakasında kararmaya sebep olduğunu gördü. Bu kararmanın sebebini uranyum-radyum karışımının beta ve alfa parçacıkları yaymasına bağladı.

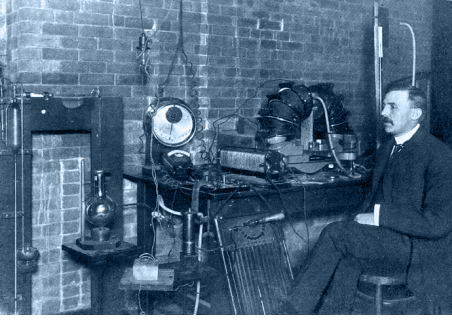
Pierre Curie ve Polonya asıllı Marie Curie, uranyum radyum karışımının fotoğraf plakasında kararma meydana getirmesi olayına “radyoaktivite” (ışın etkinlik) adını verdi. Bu ikili daha sonra radyum ve uranyumu birbirinde ayırdı ve radyum medikal alanda tedavide kullanıldı. Radyoaktivitenin keş-



**Şekil 1.9:** Wilhelm Rontgen [1.19]



**Şekil 1.10:** Henri Becquerel, Pierre Curie ve Marie Curie (soldan sağa)[1.20]



**Şekil 1.11:** Ernest Rutherford [1.19]

finde rol alan bu üç bilim insanı, 1903 yılında Nobel fizik ödülünü paylaşmıştır [1.20].

**1902:** Yeni Zelanda doğumlu İngiliz nükleer fizikçi Ernest Rutherford, çekirdeklerin radyoaktivite sonucunda alfa ve beta yayması ile yeni bir element oluştuğunu gösterdi. Rutherford, 1908 Nobel kimya ödülünü kazandı.

**1919:** Altın folyoyla yapmış olduğu Rutherford Saçılım Deneyiyle de bilinen Rutherford, nitrojen içeren vakum ortama radyum kaynağından çıkan alfa parçacıkları göndermesi sonucunda nitrojen atomlarının yeniden oluştuğunu ayrıca ortamda oksijen açığa çıktığını gözlemledi ve atom çekirdeğinde yüksüz bir parçacığın bulunması gerektiğini ileri sürdü.

**1932:** İngiliz fizikçi James Chadwick, Rutherford'un öngördüğü yüksüz parçacığı yani nötronu keşfetti. Bu keşif ona 1935 yılında Nobel ödülünü getirdi [1.21].

**1939:** Danimarkalı fizikçi Niels Bohr, fisyonun U-238'den çok U-235'ten kaynaklandığını, fisyon olma olasılığının yavaş nötronlar ile hızlı nötronlara göre daha yüksek olduğu iddiasını ortaya attı. Szilard ve Fermi bir moderatör kullanarak Bohr'un bu iddiasının doğruluğunu kanıtladı. Aynı yıl Bohr ve Wheeler, İkinci Dünya Savaşı'ndan iki gün önce bunu yayımladılar. Fisyon reaksiyonu ilk kez 1939 yılında Fransa'da Frédéric Joliot, Hans von Halban ve Lew Kowarski tarafından deneysel olarak sap-tanmıştır.

**1939:** ABD, Kanada ve İngiltere'nin ortak olarak yürüteceği Manhattan Projesi başladı [1.22].

**1940:** ABD'li nükleer kimyacı Glen T. Seaborg ve ekibi, Berkeley- Kaliforniya'da, atom numarası 94 olan elementi, yani "Plütonyum"u saf olarak elde etti ve 1941 Şubat'ında kimyasal olarak ayırmıştır [1.23].



**Şekil 1.12:** İlk nükleer reaktör, Chicago Pile-1[1.25]

**1942:** Chicago Üniversitesinin futbol sahasının altındaki bir alanda Fermi ve ekibi ilk nükleer fisyon zincir reaksiyonunu gerçekleştirdi. Bu ilk nükleer reaktör "Chicago Pile-1" (CP-1) diye bilinir [1.24].

**1945:** Manhattan projesinin ürünü olan ilk atom bombası test amaçlı olarak Trinity'de (New Mexico) patlatıldı. Chadwick de bu

denemeyi izleyenler arasındaydı. Onun 13 yıl önce keşfettiği parçacığın (nötron), 7 yıl önce keşfedilen bir nükleer tepkimesiyle, 4 yıl önce keşfedilen bir elementin bir izotopunu (plütonyum- 239) parçalaması sonucunda devasa bir enerjinin kontrolsüz olarak açığa çıkması sağlandı [1.26].

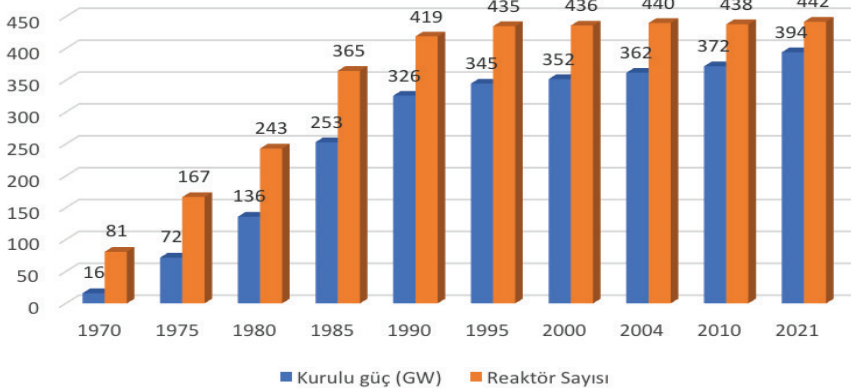
**1954:** İlk sivil amaçlı nükleer reaktör, 26 Haziran 1954 tarihinde Rusya Federasyonu Obninsk-Moskova'da işletmeye alınmıştır. 5 MW-elektrik gücündeki bu reaktör, nükleer reaktörlerin atası olarak bilinir [1.27]. Tarihsel olarak ilk nükleer enerji santralının şehir hatlarına bağlantısı, elektrik şebekesine 1957 yılında Rusya'nın Obninsk şehrinde gerçekleşmiştir.



**Şekil 1.13:** Rusya'nın Obninsk şehrindeki ilk sivil amaçlı nükleer reaktör[1.19]

Nükleer santrallerin yaygınlaşması 1970'li yılların başındaki petrol krizi ile birlikte hız kazanmıştır. Petrol ve diğer hidrokarbon kaynaklarına sahip olmayan ülkeler, bu kaynaklara olan bağımlılıklarını azaltmak ve enerji arz güvenliklerini temin etmek amacıyla nükleer santrallara yönelmişler ve bu yönde ilerlemişlerdir. Nükleer reaktör sayısının kurulu güç olarak artışı IAEA PRIS [1.28] değerleri üzerinden oluşturulan Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.1:** Nükleer gücün tarihsel gelişimi



1979 yılında ABD’ deki Three Mile Island kazası sonrası nükleer santrallara yönelik kapsamlı bir çalışma başlatılarak bundan sonra kaza yaşanmaması için gerekli alt-yapı oluşturulmaya çalışılmıştır. Birçok ülke nükleer reaktörler için güvenlik (safety), emniyet (security) ve şeffaflık (transparency) adı altında derin çalışmalar ve yeni düzenlemeler yaparak nükleerle ilgili gerekli olan bütün tedbirler alınmaya başlanmıştır. Dünya üzerindeki bütün reaktörlerin güvenlik seviyesi en üst seviyededir ve yapılan çalışmalar şeffaflığını koruyarak ilerlemektedir.

### Dünya’da Kullanılan Reaktör Tipleri

Dünya’da işletme halindeki nükleer santralların reaktör tipleri, sayısı, kurulu gücü, yakıt tipi, soğutucu, yavaşlatıcı bilgileri ile bulunduğu ülkeler Tablo 1.2’de gösterilmektedir.

Eylül 2021 verilerine göre dünyada toplamda 442 tane nükleer reaktör işletme halindedir. İşletmedeki reaktörlerin toplam kurulu gücü yaklaşık 394 GW değerindedir. İnşaat halinde ise toplamda 51 adet nükleer reaktör mevcuttur. İnşaat halindeki reaktörlerin toplam kurulu gücü 54 GW değerindedir [1.28].

**Tablo 1.2:** Ticari işletmede olan veya işletilebilir nükleer santrallar [1.29]

| REAKTÖR TİPİ                         | ÜLKELER                                            | SAYI       | GWE        | YAKIT                               | SOĞUTUCU    | YAVAŞLATICI |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Basıncılı Su Reaktörü (PWR)          | ABD<br>Fransa<br>Japonya<br>Çin<br>Rusya<br>G.Kore | 302        | 287.0      | Zenginleştirilmiş $UO_2$            | Su          | Su          |
| Kaynayan Su Reaktörü (BWR)           | ABD<br>İsveç<br>Japonya                            | 63         | 64.1       | Zenginleştirilmiş $UO_2$            | Su          | Su          |
| Basıncılı Ağır Su reaktörü (PHWR)    | Kanada<br>Hindistan<br>Romanya                     | 49         | 24.5       | Doğal $UO_2$                        | Ağır Su     | Ağır Su     |
| Gelişmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (AGR) | Birleşik Krallık                                   | 14         | 7.7        | Doğal U<br>Zenginleştirilmiş $UO_2$ | $CO_2$      | Grafit      |
| Hafif Sulu Grafit Reaktörleri (LWGR) | Rusya                                              | 12         | 8.4        | Zenginleştirilmiş $UO_2$            | Su          | Grafit      |
| Hızlı Nötron Reaktörleri (FBR)       | Rusya                                              | 2          | 1.4        | $PuO_2$ ve $UO_2$                   | Sıvı Sodyum | -           |
| <b>TOPLAM</b>                        |                                                    | <b>442</b> | <b>393</b> |                                     |             |             |

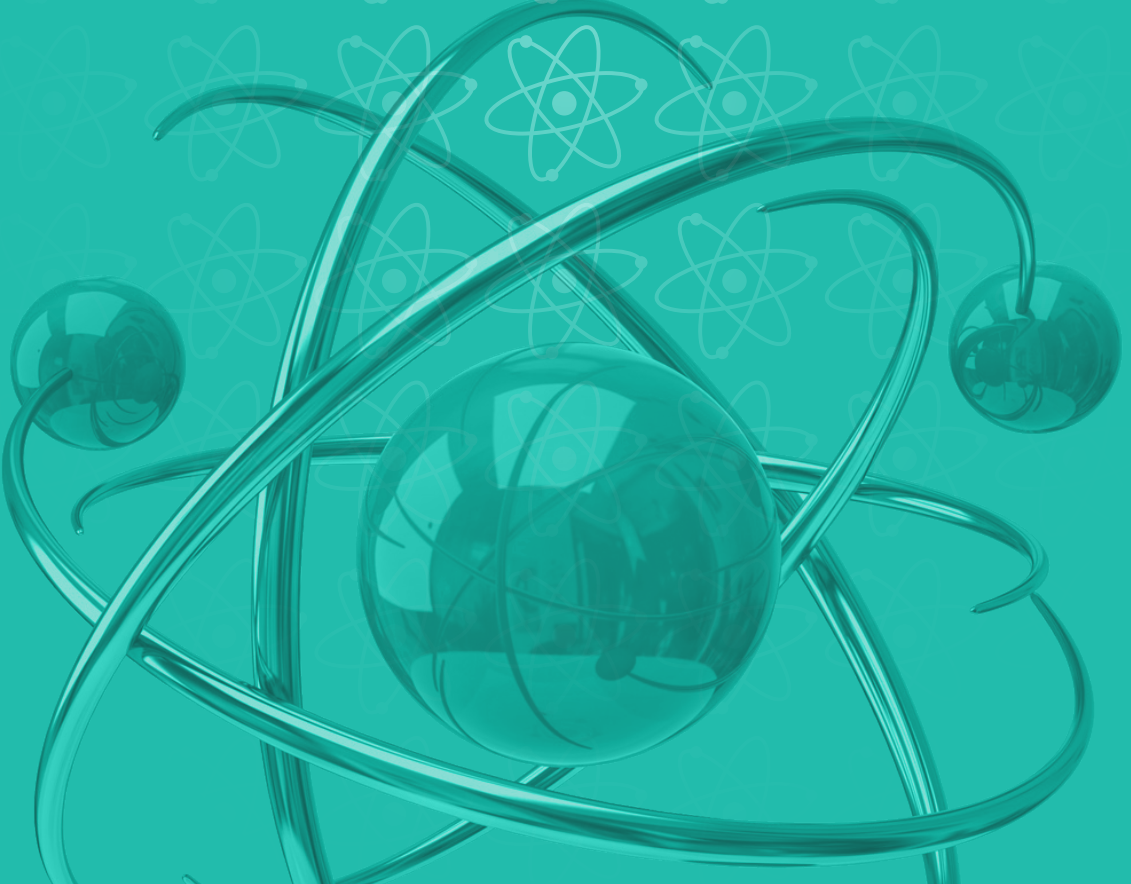






# BÖLÜM

NÜKLEER SANTRAL  
TEKNOLOJİSİ



## 2. NÜKLEER SANTRAL TEKNOLOJİSİ

### 2.1 Nükleer Santral Teknolojisinin Evrimsel Gelişimi

Nükleer teknolojinin elektrik üretiminde kullanılmasına yönelik ilk çalışmalar, 1950'li yılların başlarında büyük ölçüde ticari olarak elektrik üretiminden uzak prototip I. Nesil reaktörler olarak başlamıştır. Nükleer santralların teknolojik yeterliliklerinin ve ekonomik olarak rekabet edebilirliklerinin kanıtlanması ile birlikte, 1960'lı yılların ortalarından itibaren nükleer santral programlarında ciddi bir genişleme başlatılmış ve 1970'ler nükleer santralların elektrik üretimindeki payının önemli derecede arttığı yıllar olmuştur. Bu dönemde yaygınlaşan ve hali hazırda küresel nükleer elektrik üretiminin çok önemli bölümünü teşkil eden bu sistemler II.Nesil reaktörler olarak sınıflandırılmıştır. Bu reaktörler, özellikle 1979 Three Miles Island ve 1986 Çernobil kazalarından sonra; güvenlik özelliklerinin iyileştirilmesi ve doğalgaz kombine çevrim santralları ile rekabet edebilirliğinin sağlanması hedeflerine yönelik daha da geliştirilmeye başlanmıştır. Bu çalışmalar III.Nesil reaktörlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. III.Nesil reaktörler, II. Nesil reaktör tasarımlarının kullanılmış ve kabul görmüş teknolojiler baz alınarak geliştirildiğinden, evrimsel tasarımlar olarak adlandırılmaktadır [2.1]. Nükleer santrallarının evrimsel geçimi Şekil 2.1'de gösterilmektedir.

*Nükleer santrallarla ilgili ilk çalışmalar 1950'li yılların başlarında büyük ölçüde ticari olarak elektrik üretiminden uzak prototip I. Nesil reaktörler olarak başlamıştır.*



Şekil 2.1: Nükleer Reaktörlerin Gelişimi (2.2).

#### IV. Nesil Reaktörler

Nükleer enerjide alanında önde gelen 12 ülke (Arjantin, Brezilya, Kanada, Çin, Fransa, Japonya, Rusya, Güney Kore, Güney Afrika, İsviçre ve İngiltere) ve AB Eura-tom, ABD liderliğinde gelecek nesil reaktörlerin birlikte geliştirilmesi konusunda, 2000 yılında “IV. Nesil için Uluslararası Forumda (Generation IV International Forum-GIF)” adıyla bir araya gelmişlerdir [2.3].

IV. Nesil reaktörlerde; dünyanın artan enerji ihtiyaçları bir taraftan karşılanırken nükleer kaynakların daha iyi değerlendirildiği, nükleer atıkların miktarının azaltıldığı ve daha az zararlı hale dönüştürüldüğü, daha güvenli ve ekonomik özelliği daha da geliştirilmiş ve nükleer silahların yayılması direncinin daha da artırıldığı reaktör tasarımlarına odaklanılmaktadır. Bütün bu yaklaşımlar çerçevesinde, nükleer teknolojiye söz sahibi ülkelerden 100 kadar uzman, 130 üzeri nükleer konsept tasarımı detaylı bir şekilde ele almıştır. Pek çok açıdan yenilikçi olan ve önemli tasarım değişiklikleri içeren IV. Nesil nükleer reaktörler üzerinde teknik değerlendirmeler sonucunda bugün 6 adet nükleer konsept, geleceğin geliştirilecek IV. Nesil teknolojileri olarak seçilmiştir [2.3]. Görsel olarak Şekil 2.2’de verilen bu reaktör türleri aşağıda sıralanmıştır:

» Çok Yüksek-Sıcaklık Reaktörü (VHTR)

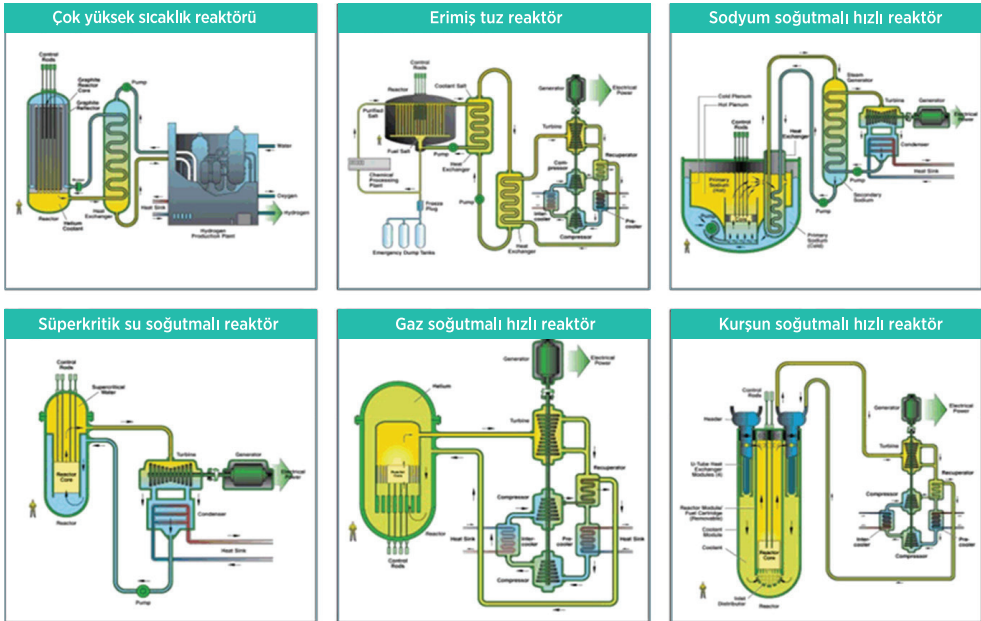
» Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR)

» Sodyum-soğutmalı Hızlı Reaktörler (SFR)

» Süper Kritik-Su-soğutmalı Reaktör (SCWR)

» Gaz-soğutmalı Hızlı Reaktörler (GFR)

» Kurşun-soğutmalı Hızlı Reaktörler (LFR)



Şekil 2.2: Tasarımları yapılan IV. Nesil Reaktör Sistemleri Tasarımları [2.4]

Geleceğin reaktör teknolojileri için aday olan bu nükleer teknolojilerde dikkati çeken en önemli özellik, Tablo 2.1'de görüleceği üzere nükleer kaynaklardan maksimum şekilde istifade edilmesi ve nükleer atıkların gerek miktar gerekse de etkinlik anlamında en aza indirilmek istenmesidir. Bu nedenle nükleer teknolojilerin kapalı (yakıt) çevrimine ve hızlı nötron teknolojilerine evrilmeye başladığı görülmektedir. IV. Nesil reaktör tasarımların 2030'lu yıllardan itibaren ticari hale gelmesi beklenmektedir [2.3].

**Tablo 2.1:** IV. Nesil olarak kabul edilen reaktör özellikleri [2.3]

| Reaktör Sistemi | n° Spektrumu | Soğutucu       | Çıkış Sıcaklığı (°C) | Yakıt Çevrimi | Kapasite (MWe)                 |
|-----------------|--------------|----------------|----------------------|---------------|--------------------------------|
| VHTR            | Termal       | He             | 900-1000             | Açık          | 250-300                        |
| SFR             | Hızlı        | Sodyum         | 500-550              | Kapalı        | 50-150<br>300-1500<br>600-1500 |
| GFR             | Hızlı        | He             | 850                  | Kapalı        | 1200                           |
| LFR             | Hızlı        | Kurşun Pb      | 480-570              | Kapalı        | 20-180<br>300-1200<br>600-1000 |
| SCWR            | Hızlı Termal | Su             | 510-625              | Kapalı/Açık   | 300-700<br>1000-1500           |
| MSR             | Hızlı Termal | Florür Tuzları | 700-800              | Kapalı        | 1000                           |



## 2.2 Nükleer Santrallarda Reaktör Tipleri

Elektrik üretmek için ticari olarak işletilmekte ve geliştirilmekte olan reaktörler nötron hızına, yakıt cinsine ve yavaşlatıcı/soğutucu akışkan cinslerine göre sınıflandırılmaktadırlar [2.5].

### Nötron hızına göre;

- » Termal reaktörler
- » Hızlı reaktörler

### Yakıt cinsine göre;

- » Doğal uranyum yakıtlı reaktörler
- » Zenginleştirilmiş uranyum yakıtlı reaktörler

### Yavaşlatıcı/soğutucu akışkan cinslerine göre;

- » Hafif su reaktörleri (Light water reactor-LWR)
- » Basıncılı hafif su soğutmalı reaktörler (Pressurised Water Reactor-PWR)
- » Kaynar hafif su soğutmalı reaktörler (Boiling Water Reactor-BWR)
- » Ağır su soğutmalı reaktörler (Pressurised Heavy Water Reactor-PHWR)
- » Ağır su yavaşlatıcılı ve hafif su soğutmalı reaktörler
- » Gaz soğutmalı ve grafit yavaşlatıcılı reaktörler
- » Sıvı metal soğutmalı hızlı üretken reaktörler

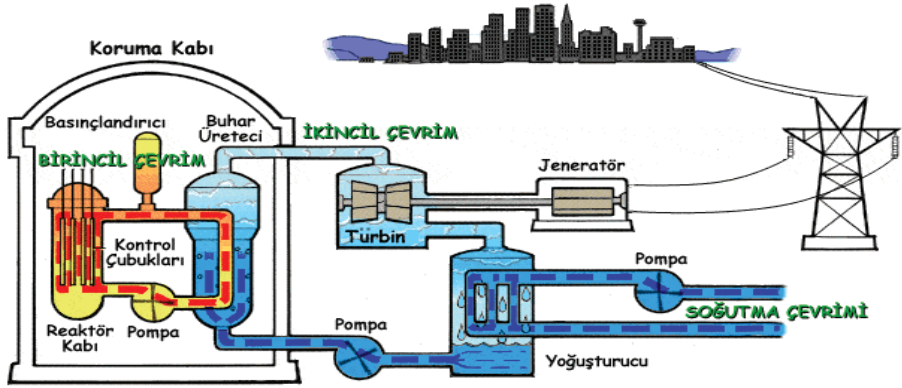
Bu reaktörlerin içinde en yaygın olanlar PWR, BWR ve PHWR'dir. Ticari olarak günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan reaktör tipleri aşağıda kısaca açıklanmaya çalışılmıştır:

### Basıncılı Su Reaktörü (PWR)

Geleneksel termik santrallerin yapısında olduğu gibi bu sistemlerde de amaç buhar elde etmektir. PWR sistemlerinde iki çevrim suyu vardır. Birinci çevrim suyu, reaktör ile buhar üreteçleri arasında dolaşırken, ikinci çevrim suyu ise, buhar üretici ile türbin arasında dolaşım yapmaktadır.

Yakıt çubuklarının herbirinde nükleer fisyon sonucu ısı açığa çıkar [2.5, 2.6]. Bu ısıdan yararlanmak için yakıt demetleri arasından su geçirilir. Burada 300-320 °C'ye kadar ısınan suyun kaynamasını önlemek için 155 bar civarında yüksek basınç uygulanır. Reaktör içinde ısınmış olan birinci çevrim suyu, buhar üretecinden geçirilerek ikinci döngü suyu buharlaştırılır ve buradan da buhar türbinine gönderilerek ona bağlı jeneratörde elektrik üretilir [2.7].



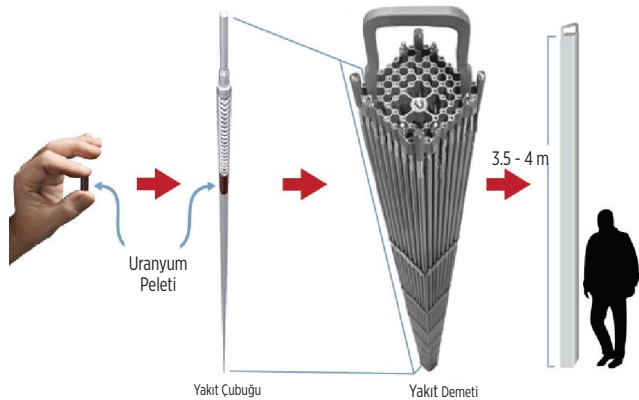


Şekil 2.3: Basınçlı su reaktörü (PWR) [2.8]

Reaktör kabında, birinci su devresinin ısı dengesini korumak veya artırma/azaltma işlemleri için sisteme bor gönderilir veya grafitle kaplı bor içeren kontrol çubukları sistemdeki yakıt demetlerinin arasındaki boşluklara yerleştirilerek ısı üretim dengesi dolayısıyla reaktörde tepkime kontrolü sağlanır. Kontrol çubukları yakıt çubukları arasına tamamen indirildiklerinde fisyon reaksiyonları durdurulur [2.5]. Basınçlı su reaktör çevriminin basit şeması Şekil 2.3'te görülmektedir.

Basınçlı su reaktörü bulunan bir nükleer santralde, nükleer ada olarak adlandırılan bölümde, nükleer güç reaktörü, reaktör soğutma suyu devresindeki buhar üretici ve dolaşım pompası yer alırken; türbin adası olarak adlandırılan bölümde ise türbin-jeneratör grubu, yoğusturucu (kondenser), soğutma kulesi, dolaşım pompaları vb. mekanik ve elektrik bileşenler yer almaktadır.

Yakıt çubukları, genellikle zirkonyumdan yapılmış ve silindirik şeklindeki metal boruların içine %3-5 oranında zenginleştirilmiş uranyum peletlerinin yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Yakıt peletleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir. PWR içinde her birinde 200-300 yakıt çubuğunun oluşturduğu bir yakıt demetinden yaklaşık 150-250 adet bulunmaktadır. Bir reaktöre yüklenen uranyum miktarı 80-100 ton civarındadır [2.5].

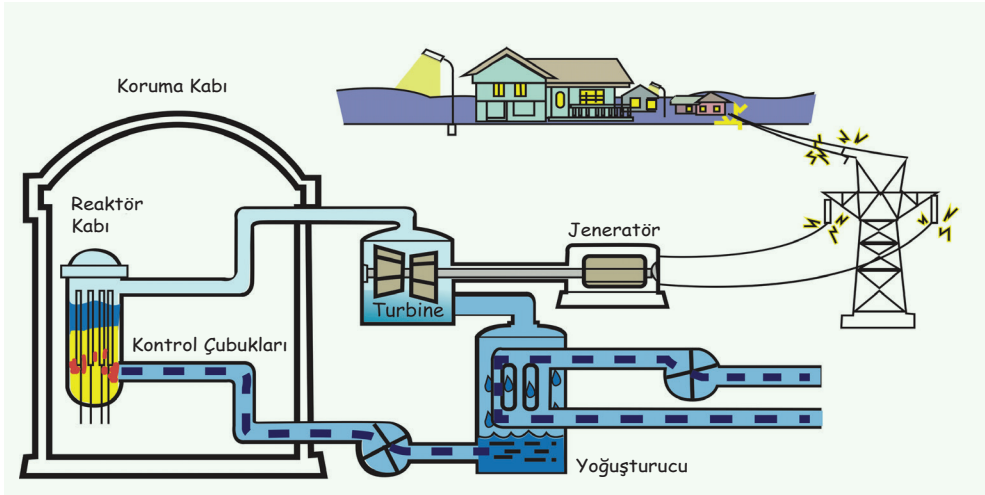


Şekil 2.4: Uranyum pelet ve yakıt çubuğu [2.9]

Dünya'daki reaktörlerin yarısından fazlası PWR'dır. Bu yaygın kullanım nedeniyle çok tecrübe kazanılmış olması bir avantajdır. Hafif su ucuzdur ve özellikleri bilinmektedir. Bununla birlikte sistem basıncı yüksek olduğundan daha pahalı boru sistemleri ve reaktör kabı gerektirmektedir.

### Kaynar Su Reaktörü (BWR)

Kaynar Su Reaktöründe (BWR), tek çevrim vardır. Reaktör içinde açığa çıkan ısı, soğutucu olarak kullanılan suyu buharlaştırır ve elde edilen buhar doğrudan türbin sistemine gönderilir. Reaktör kabındaki suyun basıncı PWR'a göre daha düşük olup 70 bar civarındadır. Dolayısıyla su 285 °C civarında kaynamaya başlar. Reaktör kabı, üst kısmında %12-15 kuru buhar toplanacak şekilde tasarlanmıştır [2.5, 2.6]. Kaynar su reaktör çevriminin basit şeması Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5: Kaynar su reaktörü (BWR) [2.8]

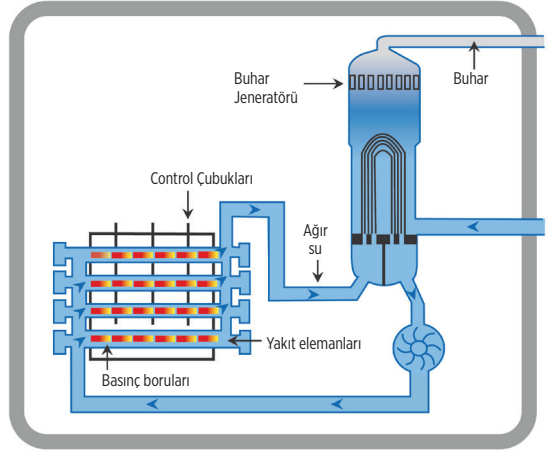
BWR tipi bir nükleer santralde, nükleer güç reaktörü, türbin-jeneratör grubu, yoğuşturucu (kondenser), soğutma kulesi, dolaşım pompaları vb. mekanik ve elektrik bileşenler yer almaktadır.

BWR yakıt demetlerinde 90-100 yakıt çubuğu bulunur ve bir reaktörde yaklaşık 750 yakıt demeti vardır. Bu nedenle reaktörde bulunan uranyum miktarı 140 ton civarındadır [2.7].

### Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR)

Basınçlı ağır su reaktörü ticari olarak CANDU ismiyle anılmaktadır. En önemli özelliği, hem soğutucu hem de yavaşlatıcı olarak ağır su ( $D_2O$ ) ve yakıt olarak yaklaşık %0,7 oranında U- 235 ihtiva eden doğal uranyum kullanmasıdır [2.5, 2.6].

Bu teknoloji, genel işleyiş açısından buhar üretici ve ikinci su/ buhar çevrimi tasarımı yönünden PWR tasarımına benzemektedir. Reaktör içinde elde edilen ısı birinci çevrim suyuna aktarılır. Bu su, buhar üreticiden geçerek ikinci çevrim suyunu buharlaştırır. Elde edilen buhar türbine gönderilir. Basınçlı ağır su reaktör çevriminin basit şeması Şekil 2.6'da görülmektedir.



**Şekil 2.6:** Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR) [2.6]

CANDU yakıt demeti, yarım metre uzunluğundaki 37 adet yakıt çubuğunu ve bu çubukları bir arada tutan yapıyı ihtiva eder. Yakıt kanalında 12 adet yakıt demeti uç uca yerleştirilir.

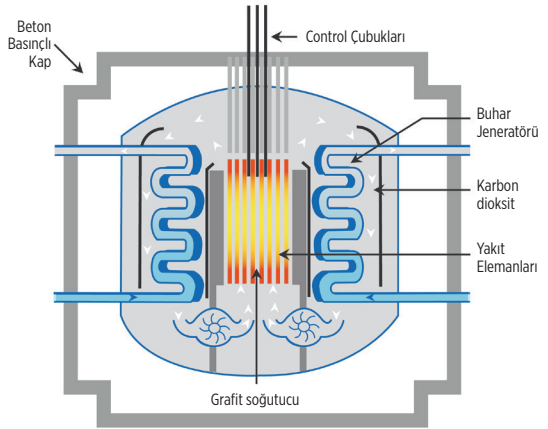
CANDU tipi reaktörün önemli avantajlarından biri, doğal uranyum kullanılmasıdır, diğer bir deyişle zenginleştirilmeye ihtiyaç duyulmaz [2.5, 2.6]. Ayrıca yakıt yüklemesi, işletme sırasında yapılabilir. Buna karşılık PWR ve BWR'da yakıt yüklemesi sırasında santralin devre dışı bırakılması gereklidir.

### İleri Gaz Soğutmalı Reaktör (MAGNOX-AGR)

Yavaşlatıcı olarak grafit ve soğutucu olarak karbon dioksit kullanan İngiliz gaz soğutmalı II.Nesil reaktördür.

Yakıt demetleri arasında karbon dioksit gazı geçer ve burada  $CO_2$  sıcaklığı  $650^{\circ}C$ 'ye çıkar. Bu sıcaklıktaki  $CO_2$ , buhar üretici borularına geçer. Bu işlem çelik basınç kabı ve beton muhafaza içinde gerçekleşir. İleri gaz soğutmalı reaktör çevriminin basit şeması Şekil 2.7'de gösterilmektedir.

Yakıt yükleme işletme sırasında yapılabilir. Reaktör durdurulması diğer reaktörlere benzer şekilde kontrol çubuklarının, yakıt içine



**Şekil 2.7:** İleri Gaz Soğutmalı Reaktör (AGR) [2.6]

indirilmesi ile gerçekleşir. Ayrıca ikinci bir durdurma sistemi olarak soğutucuya azot enjekte edilmektedir [2.5 ve 2.6].

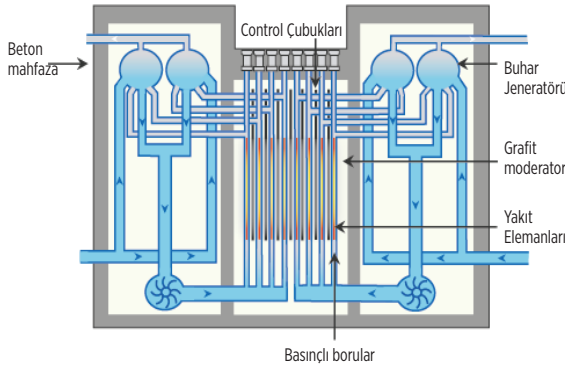
Yakıt, paslanmaz çelik tüpler içine yerleştirilmiş %2,5–3,5 zenginleştirilmiş UO<sub>2</sub> peletleridir.

AGR, MAGNOX reaktörlerden geliştirilmiştir. MAGNOX reaktörleri de yavaşlatıcı olarak grafit, soğutucu olarak CO<sub>2</sub> kullanırken, yakıt olarak doğal uranyum kullanır. İngiltere’de son MAGNOX reaktörü 2015’te kapatılmıştır.

### Hafif Sulu Grafit Reaktörü (RBMK)

Rus tasarımı BWR’lara RBMK adı verilir. RBMK, Rusça, Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny ve İngilizce High-power Channel Type Reactor olarak ifade edilen yüksek-güç kanal tipireaktörü olarak tanımlanmaktadır [2.6].

Hafif sulu grafit reaktör (RBMK) çevriminin basit şeması Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.8:** Basınçlı Ağır Su Reaktörü (PHWR) [2.6]

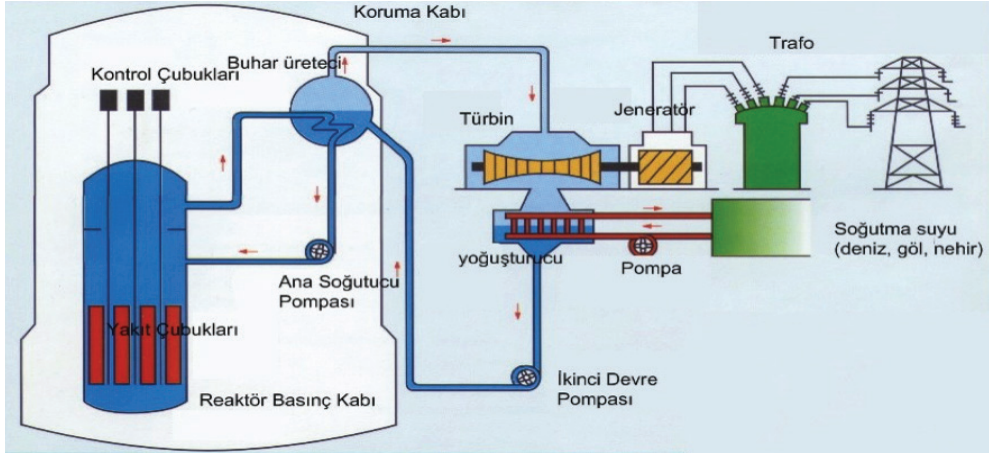
Grafitin yavaşlatıcı ve suyun soğutucu olarak kullanıldığı dünyada başka reaktör tasarımı yoktur. Çernobil Santralindeki reaktör RBMK’dir ve bu nedenle RBMK’nin bazı tasarım özelliklerinin emniyetli olmadığı Çernobil (Chernobyl) kazası ile kendini göstermiştir. Kazadan sonra tercih edilmeyen RBMK için Çernobil kazası sonrası önemli tasarım değişikliğine gidilmiştir [2.5 ve 2.6].

### Rus Tipi Basınçlı Su Reaktörü (VVER)

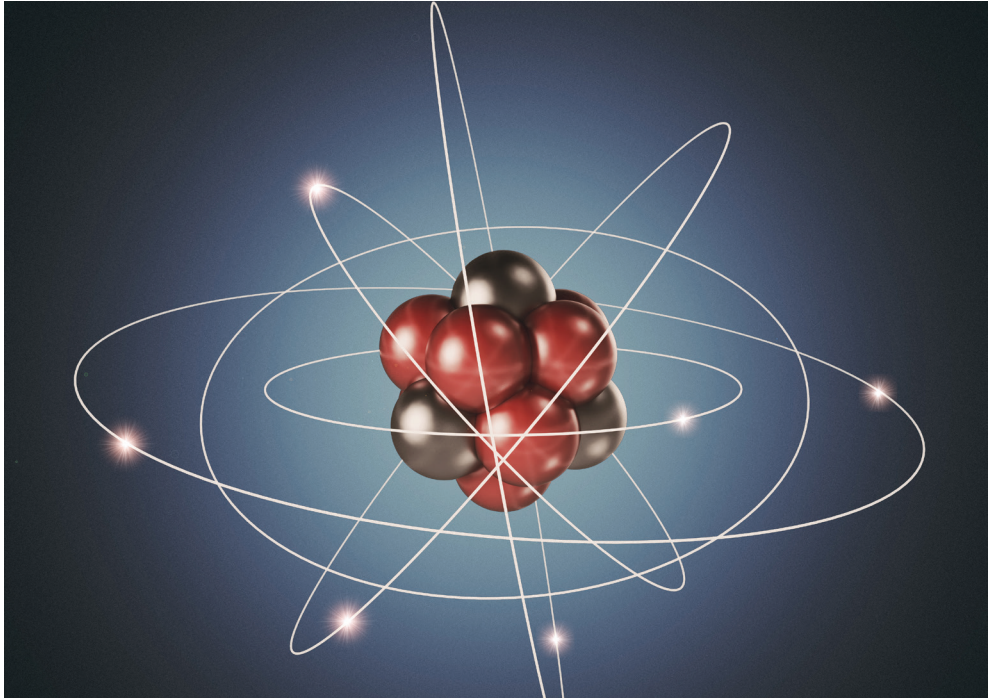
Türkiye Mersin İli, Akkuyu mevkiinde yapımı devam eden nükleer santraldaki tasarımın VVER tip reaktör olması nedeniyle bu başlığa yer verilmiştir. Rus tipi basınçlı su reaktörleri geleneksel olarak su soğutmalı-su yavaşlatıcılı tip reaktörler kısaca VVER olarak adlandırılmaktadır. VVER tip reaktörler, genel işleyiş açısından iki çev-

Yavaşlatıcı olarak grafit kullanan ve her yakıt kanalı için ayrı su soğutması olan bir reaktördür. Bu tasarıma ayrıca hafif sulu grafit reaktör (LWGR) de denilmektedir. Kaynar su reaktöründe (BWR) olduğu gibi su, yaklaşık 6,9 MPa civarında yakıt kanallarında kaynar ve buhar elde edilir. Buhar tek bir devrede ayrıştırılır. Bu reaktör, diğer reaktörlerden çok farklı olarak 1964 – 1966 arasında tasarlanmıştır. Grafi-

rime sahip olmasından dolayı PWR ile aynı tasarım özelliğine sahiptir. VVER tipi reaktörlerin diğer basınçlı su reaktörlerinden en önemli farkları yatay buhar üreticileri ve altıgen örgü biçiminde yerleştirilmiş yakıt demeti tasarımlarıdır. Çift katmanlı koruma binası bulunmaktadır. Rusya tarafından tasarlanan VVER, Çernobil kazası sonrası zaman içinde geliştirilmiştir [2.5 ve 2.6]. VVER tipi reaktör çevriminin basit şeması Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9: VVER Tipi Bir Reaktör [2.11]





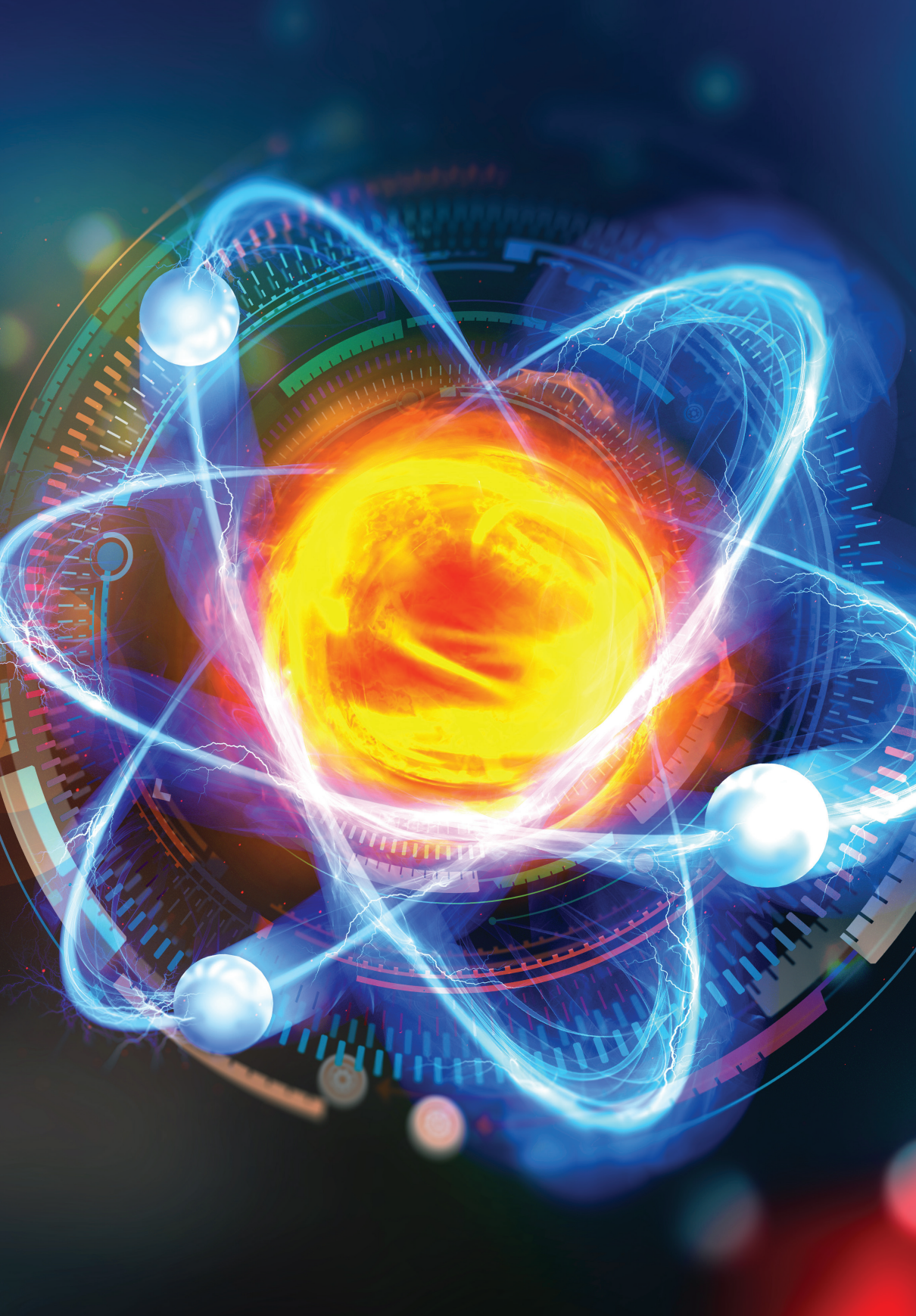
## Hızlı Nötron Reaktörü

Hızlı Nötron Reaktörü; fisyon zincirleme tepkimelerinin hızlı nötronlar tarafından (ortalama olarak 0,5 MeV veya daha yüksek enerjileri taşıyan) sürdürüldüğü bir nükleer reaktör türüdür. Bu reaktör nötron yavaşlatıcısına ihtiyaç duymaz ve genellikle Pu temel yakıt olarak kullanılır [2.6].

Ülkelerin işletmede ve inşa halinde olan nükleer santral reaktör sayısı ve kapasitesine ait bilgiler Kasım 2021 itibariyle güncel olarak Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.2:** Ülkelere göre işletme ve inşa halindeki nükleer reaktör durumu (Mayıs 2021) [2.12]

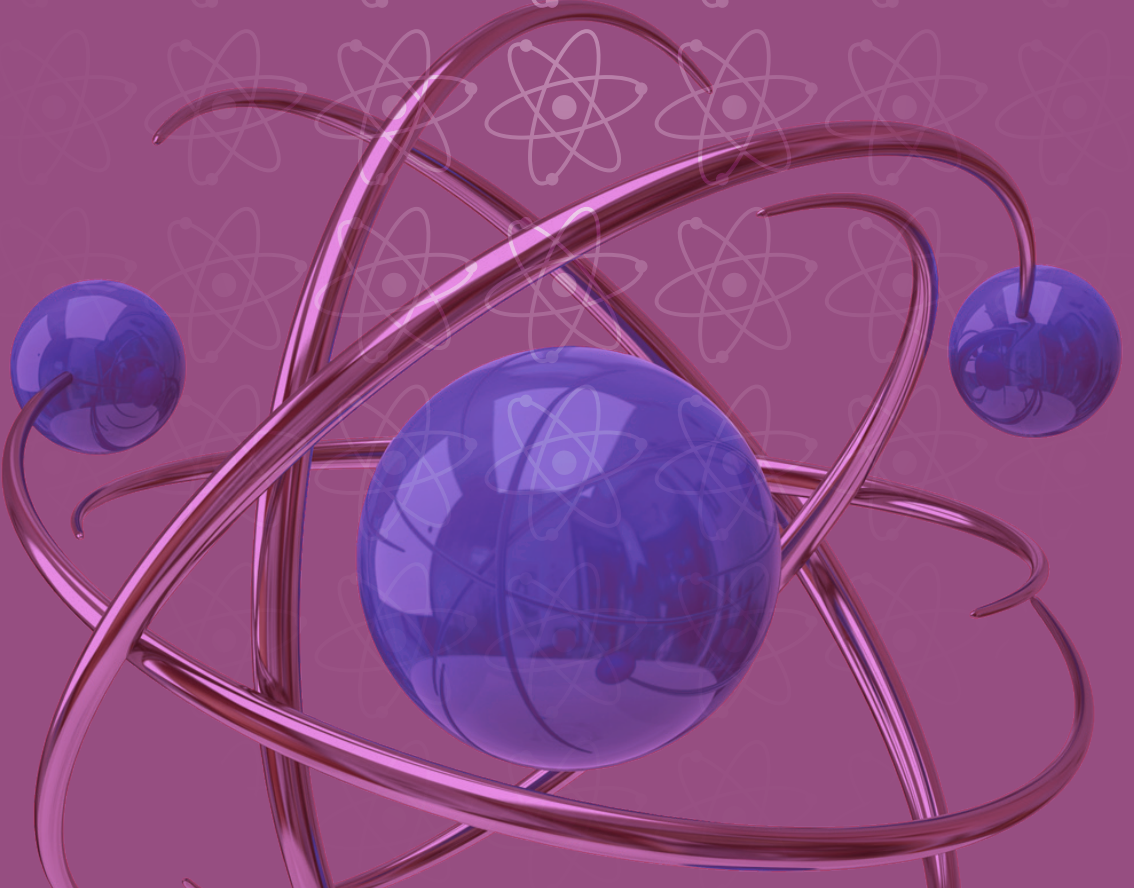
| Ülkeler          | İşletmede Reaktör Sayısı | İşletmede Toplam Kurulu Güç (MW) | İnşası Devam Eden Reaktör Sayısı | İnşası Devam Eden Toplam Kurulu Güç (MW) |
|------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| ABD              | 93                       | 95523                            | 2                                | 2234                                     |
| Fransa           | 56                       | 61370                            | 1                                | 1630                                     |
| Çin              | 52                       | 49589                            | 14                               | 13875                                    |
| Rusya            | 38                       | 28578                            | 3                                | 3459                                     |
| Japonya          | 33                       | 31679                            | 2                                | 2653                                     |
| Güney Kore       | 24                       | 23150                            | 4                                | 5360                                     |
| Hindistan        | 23                       | 6885                             | 6                                | 4190                                     |
| Kanada           | 19                       | 13624                            | -                                | -                                        |
| Ukrayna          | 15                       | 13107                            | 2                                | 2070                                     |
| Birleşik Krallık | 13                       | 7833                             | 2                                | 3260                                     |
| İspanya          | 7                        | 7121                             | -                                | -                                        |
| Belçika          | 7                        | 5942                             | -                                | -                                        |
| İsveç            | 6                        | 6882                             | -                                | -                                        |
| Almanya          | 6                        | 8113                             | -                                | -                                        |
| Çekya            | 6                        | 3934                             | -                                | -                                        |
| Pakistan         | 5                        | 2242                             | 1                                | 1014                                     |
| İsviçre          | 4                        | 2960                             | -                                | -                                        |
| Finlandiya       | 4                        | 2794                             | 1                                | 1600                                     |
| Macaristan       | 4                        | 1902                             | -                                | -                                        |
| Slovakya         | 4                        | 1837                             | 2                                | 880                                      |
| Arjantin         | 3                        | 1641                             | 1                                | 25                                       |
| Tayvan           | 3                        | 2859                             | -                                | -                                        |
| Brezilya         | 2                        | 1884                             | 1                                | 1340                                     |
| Bulgaristan      | 2                        | 2006                             | -                                | -                                        |
| Meksika          | 2                        | 1552                             | -                                | -                                        |
| Romanya          | 2                        | 1300                             | -                                | -                                        |
| Güney Afrika     | 2                        | 1860                             | -                                | -                                        |
| Birleşik Arap E. | 2                        | 2690                             | 2                                | 2690                                     |
| Ermenistan       | 1                        | 415                              | -                                | -                                        |
| Belarus          | 1                        | 1110                             | 1                                | 1110                                     |
| İran             | 1                        | 915                              | 1                                | 974                                      |
| Hollanda         | 1                        | 482                              | -                                | -                                        |
| Slovenya         | 1                        | 688                              | -                                | -                                        |
| Bangladeş        | -                        | -                                | 2                                | 2160                                     |
| Türkiye          | -                        | -                                | 3                                | 3342                                     |
| <b>TOPLAM</b>    | <b>442</b>               | <b>394467</b>                    | <b>51</b>                        | <b>53870</b>                             |



# BÖLÜM

SMR TEKNOLOJİSİ

# 3





### 3. SMR TEKNOLOJİSİ

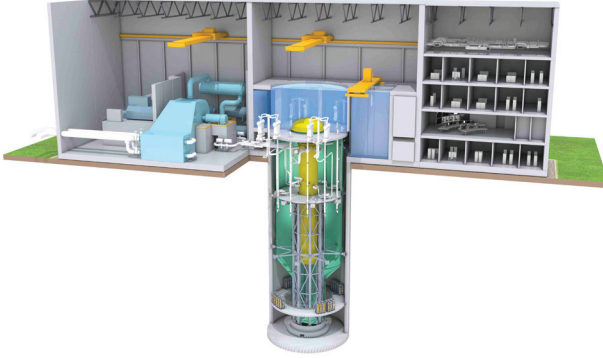
Dünyada, nükleer santral reaktörlerinin kapasiteleri yıllar içerisinde 1200-1700 MWe kadar artmıştır. Bu duruma gelinmesinin en önemli nedeni nükleer santralların işletme ve bakım (O&M) maliyetlerinin azaltılmasıdır. Bu süreç, günümüzün gelişmiş yeni nesil reaktör (III ve III+ Nesil reaktörler) tasarımlarında kullanılan pasif güvenlik özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Gelişen teknoloji ile bu durum, reaktörleri de daha verimli hale getirmeye zorlamıştır. Ayrıca santrallarda artan kapasite seviyeleri, inşaat süresi ve santrallın mevcut elektrik şebekelerine entegrasyonu ve yapım maliyetleri gibi problemleri de beraberinde getirmiştir. Yapılabilirlik ve kullanım kolaylığı açısından daha küçük reaktör sistemlerinin geliştirilmesi ele alınmıştır.

Modüler nükleer santral teknolojisi, bilinen ve kabul görmüş büyük ölçekli reaktörler odağında geliştirilerek öncelikle kullanım kolaylığı ve verimlilik hedeflenerek tasarlanan sistemlerdir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın "Net Zero 2050" raporunda ve Avrupa Yeşil Mutabakat belgesinde yer alan sıfır karbon hedefi doğrultusunda SMR teknolojisinin enerji sisteminde yer alması ve geliştirilip yaygınlaştırılması için Ar-Ge çalışmalarına destek verilen yeni teknolojik sistemdir. Temel olarak SMR teknolojisinin, IAEA bakış açısıyla geliştirilmesindeki hedefler şunlardır [3.1]:

*SMR teknolojisi enerji sisteminde yer alması ve geliştirilip yaygınlaştırılması için Ar-Ge çalışmalarına destek verilen yeni teknolojik sistemdir.*

- » Daha geniş bir kullanıcı ve uygulama yelpazesi için esnek enerji üretimi ihtiyacını karşılama,
- » Mevcut eskiyen fosil yakıtla çalışan enerji santrallarının değiştirmek veya daha kesintili yenilenebilir enerji içeren bir şebekeyi geliştirme,
- » Doğal ve pasif güvenlik özellikleri aracılığıyla güvenlik performansını artırma,
- » Daha az yerleşik elektrik şebekesi altyapılarına sahip uzak bölgeler için alternatif sunma,
- » Nükleer ve alternatif enerji kaynaklarını birleştiren enerji sistemleri için olanaklar sunmaktır.

SMR'daki "modüler" özelliği, Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, gemi yapımı ve havacılık gibi diğer gelişmiş sanayiden benimsenerek geleneksel nükleer reaktörlerin ekipman boyutu daha küçük, daha birbiri içinde birleşik olarak çalışabilen ve fabrikada imal edilerek sahada montajı yapılabilir hale getirilmesi anlamına gelmektedir. Nükleer açıdan, reaktör soğutucu sisteminin çeşitli bileşenlerini (örn. çekirdek, basınçlandırıcı, buhar jeneratörü ve pompalar) tek bir reaktör basınç kabı (RPV) içine yerleştirilerek tek bir ekipman haline getirilmiştir. Bu birincil bileşenlerin RPV'ye dahil edilmesi, büyük çaplı boru sistemini ortadan kaldırmakta ve böylece büyük ge-



**Şekil 3.1:** Örnek bir SMR modüler görünümü [3.2]

çalışmalara neden olmuştur. Bu kapsamda öne çıkan reaktör türleri aşağıda sıralanmıştır [3.3]. Ancak, SMR sadece elektrik üretiminde değil, başka amaçlar için de kullanımı olduğundan aşağıda yapılan sınıflandırma elektrik üretimi ve diğerleri şeklinde yapılmıştır.

|                                                                |
|----------------------------------------------------------------|
| 1. Su soğutmalı reaktörler                                     |
| 2. Yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler                    |
| 3. Ergimiş tuz reaktörleri                                     |
| 4. Hızlı nötron reaktörleri                                    |
| 5. Mikro reaktörler                                            |
| 6. Diğer Teknoloji Kullanımları                                |
| » Araştırma Reaktörler                                         |
| » Hızlandırıcı Sürümlü Sistem- ADS (Accelerated Driven System) |
| » Radyoizotop Termo Reaktörler (RTG)                           |

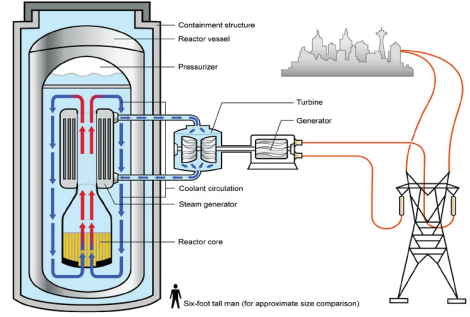
Yapılan bu sınıflandırma doğrultusunda SMR teknolojisi aşağıda daha detaylı olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Bu ayrımda, nükleer reaktörler hızlı gelişen ve istenen uygulamalara göre tasarımı yapılabilir olduğu göz önünde bulundurularak bahsi geçen bir tasarımın farklı bir şekilde uygulaması süreç içinde görülebileceği dikkate alınmalıdır.

### 3.1. Su Soğutmalı (Water cooled) SMR

Hafif su reaktörü – LWR (Light Water Reactor) nötronları yavaşlatmak veya bir soğutucu olarak normal suyun ( $H_2O$ ) kullanıldığı bir nükleer reaktördür. LWR ifadesindeki light kelimesi, yavaşlatıcı döteryumun ( $D_2O$ ) kullanıldığı “ağır su” reaktöründen ayırt etmek amacıyla hafif su kullanılmaktadır. Hafif suya dayalı SMR

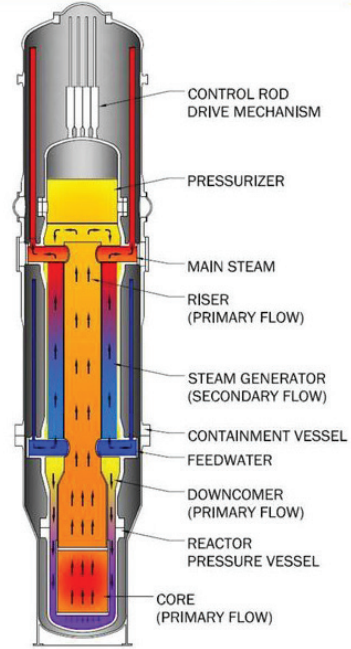


tasarım reaktör (LWR) teknolojisi, büyük ölçekli PWR ve BWR tipi reaktörlere benzer işletme prensibine sahiptir [3.4]. Bu SMR'ler, genellikle artık çok iyi bir şekilde anlaşılmış ve işletilmekte olan büyük ölçekli LWR santrallerine nazaran daha küçük ekipman ile birbirine entegre olmuş sistemleri benimseyen gelişmiş pasif güvenlik özellikleri öne çıkan yapılardır. Ortalama bir insan boyuna göre karşılaştırılmalı verilen temsili su soğutmalı reaktör bileşen yapısı Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2: Hafif su soğutmalı SMR görünümü [3.5]

Su soğutmalı SMR'larda, yavaşlatıcı ve soğutucu olarak su ve %5 oranına kadar zenginleştirilmiş uranyum yakıtı kullanılır. Reaktivite kontrolü, kontrol çubukları ile sağlanır. PWR benzeri sistemlerde olduğu gibi bir basınçlandırıcı, buhar üretici ve sistem suyu sirkülasyon pompası bulunur. Bu ekipmanın sayısı, boyutu veya olup olmaması tasarıma göre değişmektedir. Su soğutmalı bir SMR basınç kabının iç yapısı Şekil 3.3'te temsili olarak görülmektedir.



Şekil 3.3: Reaktör basınç kabı temsili kesit görünümü [3.6]

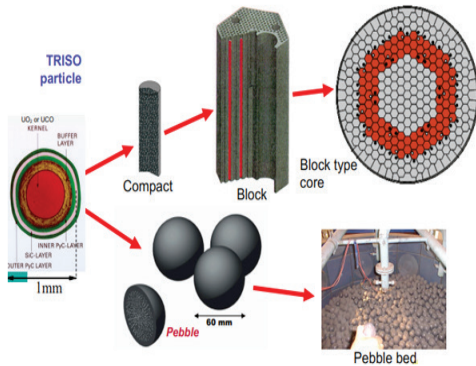
Su soğutmalı SMR türleri, doğal sirkülasyon ve yerçekimine dayalı akış kullanan pasif soğutma sistemleri, daha küçük tesis ve bileşen boyutları ve değişikliklere kolay izin veren modüler özellikler, alternatif üretim, montaj ve test gereksinimleri gibi farklı tasarım özelliklerine sahiptir. Bu özellikler ulusal lisanslama şartlarını, özellikle pasif güvenlik sistemleri ve işletme koşullarını sağladığından hem ön lisans hem de inşaat lisansını almanın önemli bir aşama olduğu başta ABD'de olmak üzere birkaç ülkede lisanslama noktasında ilerleme sağlanmıştır. Bu nedenle, LWR tabanlı SMR'lara güvenilir teknoloji ve lisanslama açısından yakın gelecekte uygulanabilir gözüyle bakılmaktadır. Ticari olarak en erken işletmeye alınabilecek reaktör türü olarak görülmektedir. Bu teknolojiye bağlı olarak birçok ülke bu tür SMR tasarımına odaklanmıştır. Ülkeler ve geliştirdikleri SMR'lar detaylı olarak Bölüm-4'te açıklanmıştır.

## 3.2. Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör (High Temperature Gas Cooled) SMR

Yüksek Sıcaklık Reaktörü (HTR), zaman içinde geliştirilerek çok yüksek sıcaklık reaktörleri adını almaya başlamıştır. En öne çıkan özelliği reaktör çıkış sıcaklığının 900-1000°C arasında olmasıdır. Soğutucu olarak helyum gazı; yavaşlatıcı olarak grafit kullanılan termal nötron spektrumlu bir reaktördür.

“Gen-IV” kapsamında olan geleceğin reaktörleri arasında yer alan HTR, diğer konvansiyonel nükleer reaktörlere göre daha yüksek sıcaklıklara (1000 °C’ye kadar) ulaştığından dolayı elektrik üretim amacı dışında özellikle hidrojen üretimi gibi yüksek sıcaklık gerektiren bölgesel ısıtma, arıtma işlemleri ve kojenerasyon uygulamaları için ideal reaktörler olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji ile düşük CO2 gazı emisyonu ile termokimyasal, elektrokimyasal veya hibrit işlemler ile sudan hidrojen üretilmektedir. İlk başta, bir kez düşük zenginleştirilmiş uranyum (LEU) (<%20 U235) yakıt döngüsü benimsenmiş sonrasında kapalı bir yakıt döngüsü ve atık azaltma amacıyla diğer reaktör türleriyle (özellikle hafif su reaktörleri) potansiyel ortak yakıt döngüleri değerlendirilmeye alınmıştır [3.7].

HTR tasarımının teknik temeli tri-izotropik (TRISO) <sup>1</sup>[1]-kaplı kürecik yakıt kullanıma dayanmaktadır. TRISO kaplamalı yakıtlarda fisyon ürünü gazların salınımı çok düşük seviyelerdedir. 1800°C’lere kadar bütünlüğünde herhangi bozulma ile karşılaşmadığından güvenlik problemi olmadan kullanılabilir. Bu tür reaktörlerde yakıtların tamamı seramik olduğu ve kendiliğinden güvenli olduğu için önemli avantajlar sağlamaktadırlar [3.8].



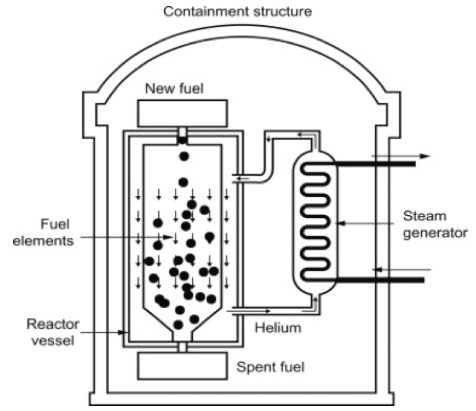
**Şekil 3.4:** Triso kaplamalı yakıt kullanan HTGR reaktörü yakıt tipleri [3.9]

Genel olarak, HTR’nin reaktör çekirdeği, prizmatik bir blok çekirdek veya çakıl yataklı bir çekirdek olabilir. Her iki çekirdek yapısı Şekil 3.4’de görülmektedir.

HTR, doğal güvenlik, yüksek ısı verim, proses-ısı uygulama kabiliyeti, düşük işletme ve bakım maliyetleri ve modüler inşaat yapım potansiyeline sahiptir. Elektrik üretimi için, bir helyum gazlı türbini sistemi, doğrudan çevrim (direct cycle) olarak

1 [1] TRISO: Tristructural ISotropic- Üç katmanlı izotropik parçacık yakıtı anlamına gelir. TRISO kürecikleri reaktörde erimez.

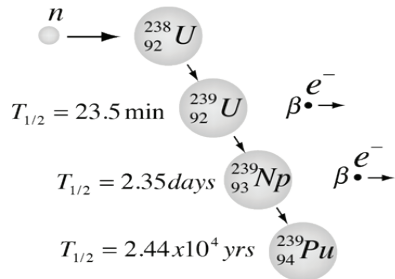
adlandırılan birincil soğutma döngüsüne doğrudan bağlanabilir veya çıkış sıcaklığı aralığının alt ucunda, geleneksel bir Rankine döngüsü ile bir buhar üretici kullanılabilir [3.7]. Bu reaktör teknolojisi için temsili görünümü Şekil 3.5'te verilmektedir. Her biri 750°C reaktör çıkış sıcaklığında 250 MW'lık iki reaktör ünitesinden oluşan dünyanın ilk modüler prototip (öntür) tesisi HTR-PM Çin'de inşa edilmektedir. Özellikle yakıt teknolojisini ve kojenerasyon uygulamalarını da kapsayacak şekilde yüksek sıcaklık reaktörlerine yönelik geliştirme çalışmaları da devam etmektedir [3.9]. 1 No'lu reaktörün yakıt yüklemeden 23 gün sonra 12 Eylül, 2021 tarihinde ilk kritiğe ulaştığı bildirilmiştir. Çinli yetkililer tarafından HTR-PM'in geliştirilmiş versiyonu olan HTR-PM600 için de fizibilite çalışmalarına başlandığı bildirilmiştir [3.11].



Şekil 3.5: Yüksek sıcaklık gaz reaktörü [3.10]

### 3.3. Hızlı Nötron (Fast Neutron Spectrum) SMR

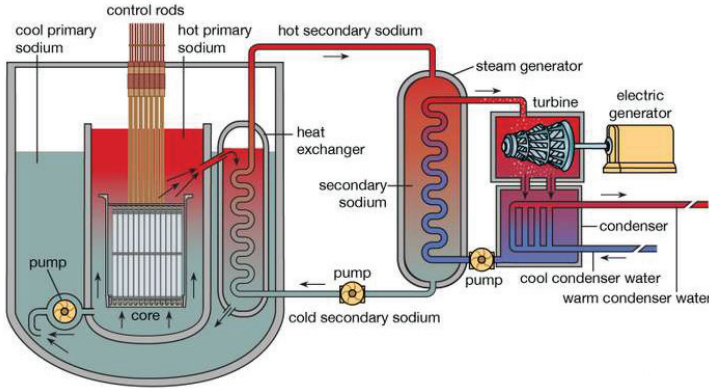
Hızlı nötron reaktörleri, nötronların yavaşlatılmadan zincirleme tepkimesinin devam ettiği reaktörler olarak tanımlanabilir. Fisyon zincir reaksiyonun devam edebilmesi için ya yavaşlatıcı kullanmak ya da U-235 oranının daha fazla artırılması gerekir. Yavaşlatıcı ve soğutucu olarak kullanılan su, genellikle ortamdaki nötronları yutabilmektedir. Bu nedenle zincir tepkime için diğer bir yöntem olan uranyum oranının artırılması düşünülmüştür. Daha fazla zenginleştirilmiş U-235 kullanmak yerine karışım yakıt yöntemi denenmiştir. Doğada yaklaşık %99 oranında bulunan U-238, bölünüp enerji açığa çıkarmaz ancak bir nötron yuttuğunda, U-235 gibi bölünerek enerji açığa çıkaran Plütonyum-239'a dönüşmektedir. Bu nedenle hızlı nötron reaktör tipinde U-238 ve P-239 gibi karışım yakıt kullanılır ve yavaşlatıcı kullanılmaz. Bu durumda, yakıt bitmez artarak devam eder. Bu nedenle bu tür reaktörler üretken reaktörler olarak da tanımlanmaktadır. Doğal uranyumda yaklaşık %99,3 U-238 ve %0,7 U-235 olduğundan, uranyum kaynaklarını çok daha verimli kullanan hızlı nötron reaktörleri, yakıt açısından daha avantajlı olduğu görülür. U-238'in, fisil Pu-239'a dönüşümü Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6: Fisil olmayan U-238'in nötron yakalayarak fisil Pu-239'a dönüşümü [3.13].

Hızlı nötronlar, ortalama olarak 0.5MeV'in üzerinde veya daha büyük enerjiler taşıyan nötronlardır. Hızlı nötron reaktörleri verimli, güvenli ve sürdürülebilir bir enerji sağladıkları için 1960 yılından itibaren dünyada ilgi gören bir teknolojidir [3.12].

Termal reaktörlerde genellikle soğutucu olarak kullanılan su, nötronları yavaşlatma etkisinden dolayı hızlı nötron reaktörleri için uygun değildir. Bu sebeple hızlı nötron reaktörlerinde ergimiş metal soğutucular (Sodyum veya Sodyum Potasyum) kullanılmaktadır. Bu alanda geliştirilmiş sodyum soğutmalı hızlı reaktör yapısı Şekil 3.7'de görülmektedir.



**Şekil 3.7:** Sodyum Soğutmalı Hızlı Nötron Reaktör [3.14]

Sodyum soğutmalı hızlı reaktörler, kurşun soğutmalı ve kurşun-bizmut soğutmalı hızlı reaktörler ve gaz soğutmalı hızlı reaktörler, yüksek standartlı güvenlik, sürdürülebilirlik, ekonomiklik, fiziksel koruma ve silahsızlandırma kavramlarına uygun olarak geliştirilmektedir. En gelişmiş hızlı nötron reaktörleri sodyum soğutmalı hızlı reaktörlerdir [3.12].

İleri seviye hızlı reaktör teknolojilerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar kapsamında inşa halinde olan hızlı reaktör projelerine ek olarak birçok ülke tarafından yenilikçi (inovatif) (Gen- IV) hızlı reaktör teknolojilerinin geliştirilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetleri yoğun bir şekilde yürütülmektedir [3.12].

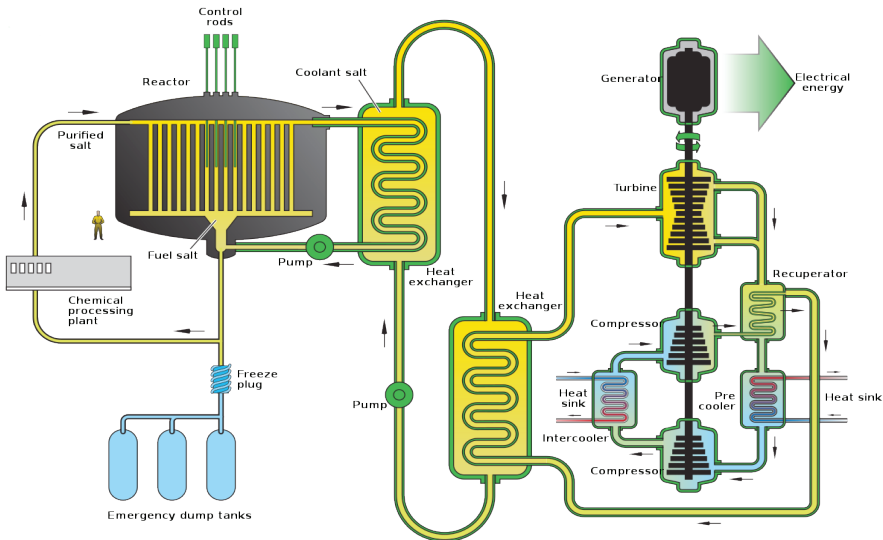
### 3.4. Ergimiş Tuz Reaktörü (Molten Salt) SMR

Ergimiş Tuz Reaktörü (ETR), “Gen IV International Forum” tarafından geleceğin reaktörü olarak seçilen ve U233-Th çevriminde çalışan bir reaktördür [3.15]. ETR, bazen Toryum yakıtlı ETR, bazen de Sıvı Florit Toryum Reaktörü (LFTR – Liquid Fluoride Thorium Reactor) olarak da adlandırılır [3.16]. Bu reaktör teknolojisiyle ilgili ilk çalışmalar yaklaşık 60 yıl öncesine dayanmaktadır. Oak Ridge Ulusal Labo-

ratuvarlarında (ORNL) “Ergimiş Tuz Reaktörü Deneyi” (MSRE) olarak başlatılmış bir projedir [3.17]. 1960'larda ORNL'da 7,4MWt gücünde tasarlanıp inşa edilen reaktörün diğer reaktörlerden en temel farkı, kullanılan nükleer yakıt, fertil malzeme ve soğutucunun homojen ve akışkan bir karışım şeklinde reaktör sisteminde dolmasıdır [3.18 ve 3.19]. Sıvı toryum florür tuzu bulunan reaktör kuşak bölgesinde (blanket region) dönüşüme uğramış (breed etmiş) olan U- 233, fisil yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu reaktörler, yüksek nötron zenginliği dolayısıyla MW yük başına ancak 1kg kadar fisil element tüketirken diğer reaktör çeşitleri daha fazla yakıt tüketir [3.20].

Bu reaktörde değişik florür tuzlarından oluşan florür-yakıt karışımı, reaktör içerisinden geçerken kritikliğe ulaşmakta ve akışkan ısınmaktadır. Isınan ve sıcaklığı artan akışkan, ısısını orta çevrim akışkanının yer aldığı ısı değiştiricisindeki diğer akışkana aktarır. Burada ısınmış olan akışkan, yine bir diğer ısı değiştiricisi ile türbinde kullanılacak çevrim akışkanına aktarır. Böylece türbin-jeneratör sistemi ile elektrik enerjisi üretilmiş olur. Orta çevrimdeki ilk ısı değiştiricisinde iş görmüş florür-yakıt reaktöre geri dönerken bir kısmı da kimyasal işlem için ayrılır [3.21]. Reaktörde U233-Th dönüşümünde ara element olarak oluşan ve 27,4 gün gibi uzunca bir yarılanma ömrüne sahip olan Pa-233 (protaktinyum) elementinin reaktörden uzaklaştırılması gerekir. Kimyasal işlemden ayrıştırılan U-233 ise tekrar reaktörlerde fisil element olarak kullanılabilir [3.22].

Ergimiş tuz reaktörü (MSR) basit şeması Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8: Ergimiş tuz reaktörü (MSR) şeması [3.15].



### Ergimiş tuz reaktör teknolojisinin öne çıkan özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

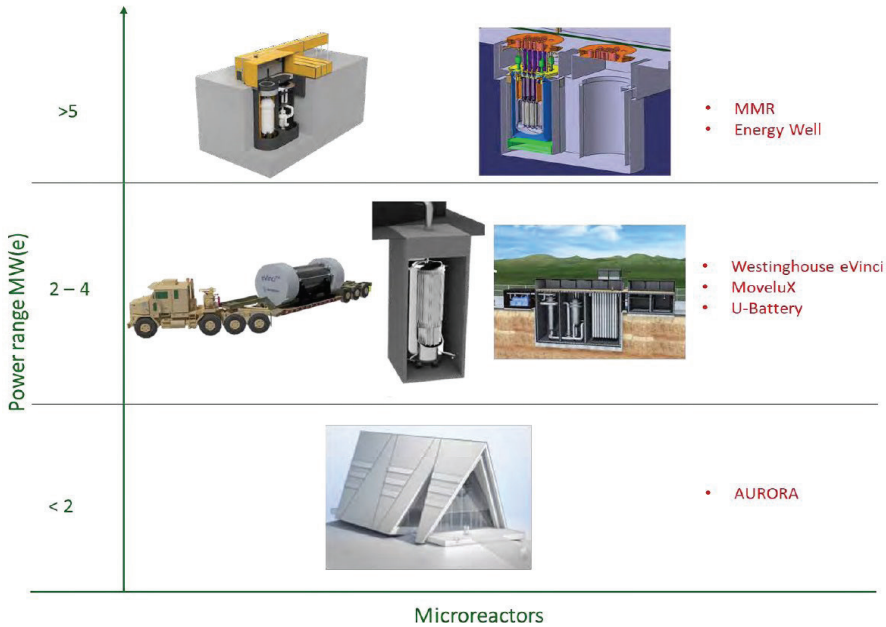
- » Florür tuzları uranyum ve toryumla kararlı bir yapı oluşturduğundan, yüksek sıcaklıklarda düşük buharlaşma ve iyi ısı transfer özelliklerine sahiptir. Ayrıca bu tuzlar yüksek radyasyon direncine sahiptir ve hava/su ile herhangi bir şiddetli reaksiyon oluşturmaz. Birçok yapısal malzemeye ve grafitle de etkileşime girmemektedir. Ergimiş florür tuzlarının düşük buhar basınçları dolayısıyla reaktör içi florür-yakıt akışkanında neredeyse atmosfer basıncına yakın veya üzerinde bir basınç olduğundan reaktörlerin PWR'larda olduğu gibi çok kalın ve mukavim olmasına gerek olmaz ve bu nedenle maliyet biraz daha düşüktür [3.22].
- » Yakıtın ve fisyon ürünlerinin işletme esnasında değiştirilebilmesi, ETR reaktörlerinin bir diğer önemli özelliğidir. Yakıt değiştirmek için zaman kaybedilmediğinden yüksek emre-amadelik faktörüne sahiptir [3.22].
- » ETR'de, oldukça yüksek sıcaklıkta kızgın buhar elde edildiğinden bu reaktörler yüksek verime sahip olabilmektedirler [3.22].
- » Diğer reaktörlerde kullanılan yakıt çubuklarına gerek yoktur [3.22].
- » ETR reaktörü tüm varyasyonlarda reaktör reaktivitesi üzerinde 'negatif sıcaklık faktörü' (negative temperature coefficient) özelliğine sahip güvenlik özelliği ile tasarlanmaktadır. Bu özellik, kendiliğinden güvenli kabul edilen reaktörlerin tasarımında özellikle geleceğin bütün IV. Nesil reaktörleri içerisinde olması gereken bir özellik olarak kabul görmektedir. Negatif sıcaklık faktörünün anlamı, sistemin sıcaklığı işletme sıcaklığının üzerinde bir seviyeye arttığında reaktör gücünün doğal olarak kendiliğinden azalmasıdır [3.15].
- » Acil durumda devreye giren ve Şekil 3.9'te görülen 'ergime tıpası' (freeze plug) bir diğer güvenlik özelliğidir. Çekirdek erimesine karşı tasarlanan çekirdek tutucu (core catcher) bu tasarımda zaten çekirdeği Ergimiş durumda olan reaktör için gerek yoktur [3.15].
- » Kullanılmış yakıt içindeki yüksek seviyeli radyoaktif elementler tüketilebildiğinden bu reaktördeki nükleer yakıtlar daha uzun ömürlü kullanılabilir [3.22].
- » Katı yakıtlı reaktörlerde, reaktör kapatıldıktan sonra oldukça yüksek nötron tutucu malzeme olan ve nötron zehri olarak bilinen "birikim (buildup)" sonucu reaktörler ancak saatler sonra tekrar başlatılabilmektedir [3.22]. ETR tip reaktörlerde ise, atmosferik basınç mertebesinde bir akışkan yakıtının olması ve işletme süresince de daimi bir kimyasal ayrıştırmanın olması nedeniyle Xe (zenon) gaz bertarafı çok daha kolay yapılabilmektedir [3.20].
- » Reaktörden ilk ısı değiştiricisine geçen florür-yakıtta salınımı devam eden gecikmeli nötronlar (delayed neutrons) dolayısıyla sistemde malzeme aktivasyonu olabilmektedir [3.22]. Bu nedenle ergimiş tuzlarla temas eden bütün metal parçaların, düşük içerikli krom ve nikel-molibden alaşımı olan Hastelloy-N gibi nispeten kararlı metal ve alaşımlardan yapılması gerekmektedir [3.20].
- » ETR reaktörde ağırlıklı olarak toryum ve fisil malzeme olarak U-233 kullanılması, nükleer silahların yayılmasının önlenmesi konusunda bu reaktörü en güvenli nükleer reaktörlerden biri yapmaktadır [3.23].

Toryum yakıtlı ETR geliştirilmesi konusunda dünya genelinde artan bir ilgi söz konusudur. Çin, Japonya, Rusya, Fransa ve ABD başta olmak üzere Hindistan, Çek Cumhuriyeti ve 'Gen IV International Forum' üyesi diğer bazı ülkelerde Ar-Ge çalışmaları yürütülmektedir. ETR konusunda yoğun çalışan Çin, özellikle bazı prototipler (öntür) yapmak üzere kapsamlı bir Ar-Ge projesi başlatmış ve 2030 yılında yaklaşık 100 MW'lık bir yüksek sıcaklık ETR reaktörünü işletmeye almayı planlamaktadır [3.24].

### 3.5. Mikro-Reaktörler

Mikro-reaktörler, 10 MWe kapasitesine kadar olan reaktörler olarak tanımlanmaktadır. Mikro-reaktörler nispeten devamlı ve az enerji ihtiyacı olan uzak veya erişim kısıtlaması olan durumlar için kullanılmaktadır. Küçük adalarda veya madenlerde dizel jeneratörlerin yerine kullanılması örnek olarak verilebilir [3.25].

Mikro-reaktörler normal reaktörler gibi değişik soğutucu seçeneklerinde olabilmektedir. Bu reaktörler de elektrik üretimi yanında, deniz suyundan tatlı su üretilmesi ve ısı ihtiyacı olan değişik uygulamalar için tasarlanabilmektedir. Kanada ve ABD'de bu reaktörlerin yakın dönemde uygulamaya geçirilmeleriyle ilgili lisanslama çalışmaları devam etmektedir. ARIS 2020 verilerine göre, konsept tasarımı, saha uygulaması ve lisans çalışmaları yürütülen bazı mikro-reaktörler kapasitelerine göre Şekil 3.9'da sıralanmaktadır.



Şekil 3.9: Bazı mikro-reaktörler [3.18]

Mikro-reaktörler normal reaktörler gibi değişik teknolojiye sahip olabilmektedir. Isıtıcı-borulu sistemler, yüksek sıcaklık gaz reaktörleri (HTGR), ergimiş tuz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörleri (HTR) ve ergimiş-metal soğutmalı hızlı reaktörler gibi teknolojiler bulunmaktadır. Kapasite çıktıları genelde 1,5-5 MWe arası ve %4 - 19,75 arası zenginlikte 36 aydan 20 yıla kadar oldukça uzun yakıt çevrimi süresinde tasarlanabilmektedirler. Yakıt çevrimlerinin bu denli uzun olabilmesi kurulum amaçlarıyla doğrudan alakalıdır. Mikro-reaktörlerde yakıt tasarımı teknolojisine bağlı olarak değişmekle birlikte 30 yıllık tasarım ömrü boyunca yalnız bir kere yakıt yüklemesinin yapılacağı şekilde tasarım da yapılabilmektedir. Bazı tasarımlar kolay taşınabilme özelliği ile öne çıkmaktadır.

### 3.6. Diğer Teknolojiler

Bu bölümde SMR olarak adlandırılmayan ancak kısmen enerji ihtiyacı veya kısmen araştırma çalışmalarında kullanılan sistemlerden kısaca bahsedilmektedir. Araştırma, deniz altı uygulamaları, askeri ve uzay amaçlı olarak kullanılan reaktörlere kısaca yer verilmiştir. Bu tür reaktörler aşağıdaki gibi üç grupta toplanmıştır:

#### *Araştırma Reaktörü (Research Reactors)*

Araştırma reaktörleri Ar-Ge ve eğitim amaçlı kullanılan ve buna göre tasarlanmış reaktörlerdir. Endüstri, tıp, tarım gibi birçok sektörde çalışmalarda kullanmak üzere nötron sağladıklarından genel olarak nötron kaynağı şeklinde görev yapmaktadırlar. Bunlar, güç reaktörlerinden veya gemileri hareket ettirenlerden çok daha küçüktür ve çoğu üniversite kampüslerindedir. Araştırma reaktörlerinde üretilen nötronlar, nötron saçılım deneylerinde, tahribatsız test analizlerinde, malzeme analizlerinde, radyoizotop üretiminde ve daha birçok eğitim ve araştırma faaliyetlerinde kullanılmaktadırlar. 1960'lerde ve 1970'lerde yoğun bir şekilde yürütülen birçok bilimsel çalışmalara da katkı sağlamışlardır. Araştırma reaktörlerinin çoğu 100 MW'a kadardır. Dünyadaki 250 araştırma reaktörünün toplam gücü 3000 MW'ın biraz üzerindedir. Bu reaktörler, farklı amaçlara yönelik nötron akısı oluşturmayı hedeflediğinden birçoğu %20 gibi daha yüksek zenginlikte yakıt kullanmaktadır. Güç üretmeyen bu reaktörlerde de normal reaktörlerde olduğu gibi çekirdeğin devamlı soğutulmaya ihtiyacı vardır. Araştırma reaktörleri daha basit tasarıma sahip olup daha düşük sıcaklıklarda çalıştırıldığından daha az yakıt tüketirler.

Dünyada birçok araştırma reaktörü tasarımı mevcuttur. En yaygın kullanılan reaktörlerden biri olan TRIGA, General Atomics tarafından geliştirilmiştir ve dünyada 50 civarı inşa edilmiştir. Haziran 2021 WNA verilerine göre Dünya çapında 307'si ABD'de, 121'i Rusya'da olmak üzere yaklaşık 820 araştırma ve test reaktörü inşa

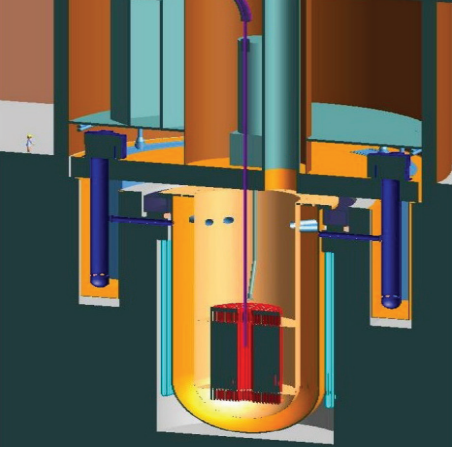
edilmiştir. Zamanla kapatılan veya tamamen işletmeden çıkarılanlar da olduğundan bugün WNA verilerine göre 53 ülkede yaklaşık 223 reaktör faaliyet göstermektedir [3.26]. TRIGA araştırma reaktöründen ülkemizde de bulunmaktadır. En çok araştırma reaktörü olan ülkeler Tablo 3.1’de sıralanmıştır.

**Tablo 3.1:** Ülkelere göre en çok araştırma reaktörü işleten ülkeler[3.26]

| ÜLKE          | İşletmede olan Araştırma Reaktör Sayısı |
|---------------|-----------------------------------------|
| Rusya         | 52                                      |
| ABD           | 50                                      |
| Çin           | 16                                      |
| Hindistan     | 7                                       |
| Arjantin      | 5                                       |
| Kanada        | 5                                       |
| Almanya       | 5                                       |
| İtalya        | 5                                       |
| Brezilya      | 4                                       |
| İran          | 4                                       |
| Kazakistan    | 4                                       |
| Belarus       | 3                                       |
| Belçika       | 3                                       |
| Çekya         | 3                                       |
| Fransa        | 3                                       |
| Endonezya     | 3                                       |
| Japonya       | 3                                       |
| Ukrayna       | 3                                       |
| Diğer         | 45                                      |
| <b>Toplam</b> | <b>223</b>                              |

### **Hızlandırıcı Sürümlü Sistem- ADS (Accelerated Driven System)**

Hızlandırıcı Sürümlü Sistem (ADS) reaktör tipi temel olarak bir kritik altı reaktör ve yüksek-enerjili proton/elektron hızlandırıcıdan oluşmaktadır. Hızlandırıcıdan elde edilen yüksek enerjili parçacıklar hedefe yönlendirilir ve burada gerçekleştirilen çarpışmalardan salınan çok sayıda nötron ile reaktör içerisinde nükleer reaksiyonlar oluşturulmaktadır. Hızlandırıcının devreden çıkarılması durumunda tüm reaksiyonlar kendiliğinden sonlanmaktadır. Bu nedenle dünyanın en güvenli reaktörü olarak değerlendirilmektedir. Bu reaktör için en ideal yakıt toryum olarak değerlendirilmektedir [3.27 ve 3.28].

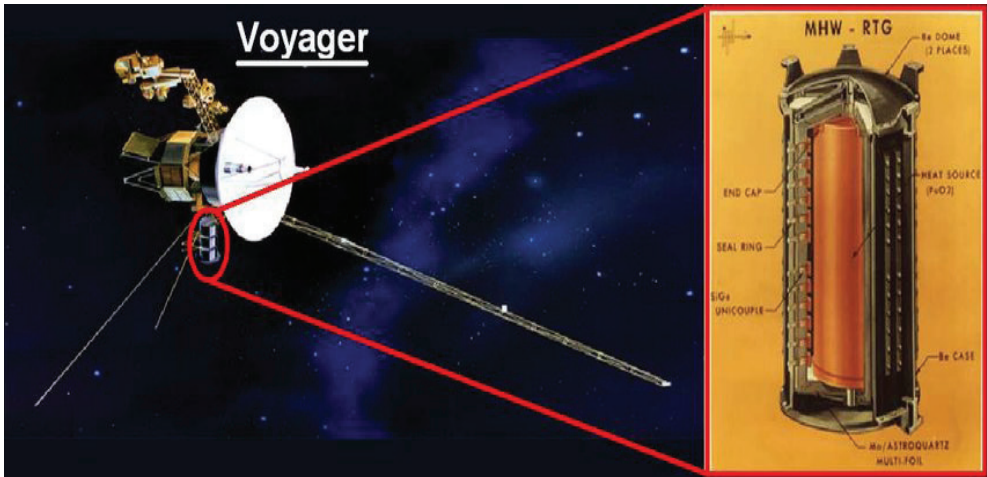


**Şekil 3.10:** Hızlandırıcı Sürümlü Reaktör Sistemi [3.29]

Günümüz LWR reaktörlerinde oluşmuş olan nükleer atıkların radyotoksitesinin azaltılması, yani atıkların daha kısa ömürlü ve daha az radyoaktif hale getirilmesi amacıyla bu reaktörlerin çok daha uygun olabileceği düşünülmektedir. Nobel Ödüllü fizikçi Carlo Rubbia tarafından tasarlanan bir ADS reaktörü temsili olarak Şekil 3.10'de görülmektedir [3.29]. Halihazırda bir AB projesi olan MYRRHA gibi endüstriye uygulanabilir kapasitelerdeki ADS sistemlerinin geliştirilmesiyle ilgili bazı çalışmalar devam etmektedir.

### **Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler (RTGs)**

Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler, nükleer maddede radyoaktivite sonucu oluşan ısıнын thermocouple denilen ısı-çiftlerce elektrik enerjisine dönüştürüldüğü bir çeşit büyük boy nükleer bataryalardır. Bu jeneratörler oldukça basit tasarıma sahip ve herhangi bir hareketli parçaları bulunmamaktadır. Uydularda, uzay sondalarında ve dünyada ulaşılması zor bölgelerin uzun süreli ve ufak ölçekteki enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadırlar [3.30]. Şekil 3.11'de görüleceği üzere Uzayın derinliklerinde Voyager 1 ve Voyager 2 sondalarında RTG nükleer üreteçleri 1977 yılından bu yana 40 yılı aşkın süredir dünyayla olan iletişim için enerji üretmeye devam etmektedir.



**Şekil 3.11:** RTG, Voyager uzay sondasına hala enerji sağlamaya devam etmektedir [3.31].



RTG nükleer üreteçler Şekil 3.12’de görüleceği üzere Mars Curiosity ve Perseverance araçlarına uzun yıllar Mars’ta enerji üretecek şekilde görev yapmaktadır. Sovyetler Birliği sonrası ömürlerini tamamlayan farklı amaçlar için kullanılmış olan birçok RTG Şekil 3.13’te görüleceği üzere bir dönem atıl durumda kalmıştır.



**Şekil 3.12:** RTG, Mars Curiosity ve Perseverance araçlarına uzun yıllar enerji sağlıyor [3.30].



**Şekil 3.13:** Sovyetler döneminde ücra noktalardaki bir deniz feneri için kullanılmış ve atıl duruma gelmiş RTG [3.32]

# BÖLÜM

# 4

DÜNYADA SMR  
TEKNOLOJİSİ  
GELİŞTİREN ÜLKELER  
VE UYGULAMALARI



## 4. DÜNYADA SMR TEKNOLOJİSİ GELİŞTİREN ÜLKELER VE UYGULAMALARI

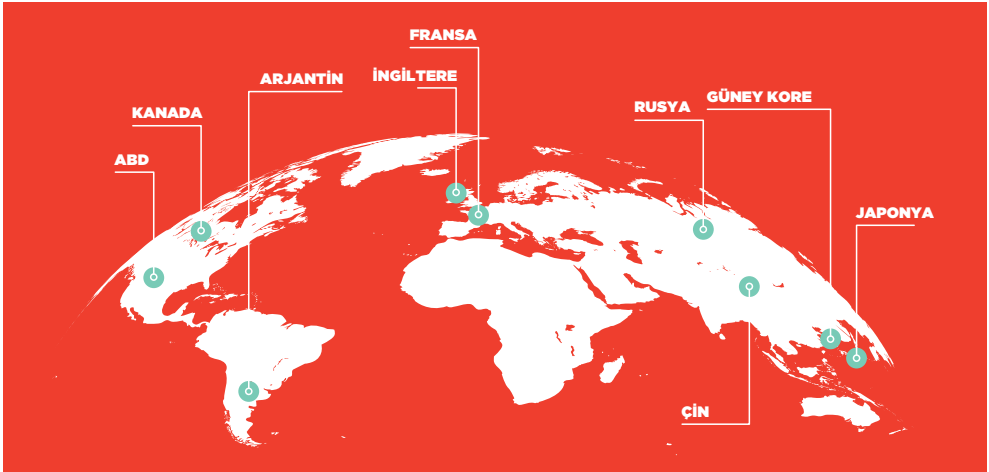
### 4.1. AMERİKA BİRLEŞİK DEVLETLERİ (ABD)

Dünyanın en büyük nükleer güç üreticisi ABD, Eylül 2021 itibariyle net kapasitesi 95,5 GW olmak üzere 62 adedi PWR ve 31 adedi de BWR olan işletme halinde toplam 93 adet büyük ölçekli nükleer reaktör ünitesine sahiptir. Halen iki yeni büyük ölçekli nükleer reaktör ünitesinin inşaatı devam etmektedir [4.1]. Bunun yanında, farklı kapasite ve teknoloji seçeneklerinde SMR'lar geliştirilmektedir. Gelişmiş küçük modüler reaktörler; enerji üretimi, proses ısısı, tuzsuzlaştırma (desalinasyon), arındırma veya diğer endüstriyel alanlarda kullanmak üzere tasarlanmaktadır.

ABD Enerji Bakanlığı (DOE), ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) tarafından lisans incelemesine tabi tutulan ve 2030'ların başlarına kadar kurulması öngörülen hafif su soğutmalı SMR'ların geliştirilmesine destek sağlamaktadır [4.2]. Gelişmiş SMR'ların ekonomi, enerji güvenliği ve çevresel hususlara sağlayabileceği katkı dikkate alınmaktadır. SMR'ların güvenlik, işletme ve ekonomik konularda sağladıkları olası faydalardan dolayı sıvı metal, tuz ve gaz gibi geleneksel olmayan soğutucular kullanan SMR'ların geliştirilmesine önem verilmektedir.

ABD hükümeti, yasal yapılanma ile SMR'ları desteklemektedir. 2018 Nükleer Enerji İnovasyon ve Modernizasyon Yasası (NEIMA), Ulusal Ar-Ge altyapısına erişim

*ABD, su soğutmalı reaktör türünde ilk lisansı alma aşamasındadır.*



mi teşvik etmekte ve tasarım sertifikasyon sürecini SMR tasarımlarının özelliklerine uyarlamak için NRC'nin mevzuat düzenlemeleri de desteklenmektedir.

ABD Dışişleri Bakanlığı, Nisan 2021 İklim Liderleri zirvesinde; ortak ülkelere kapasite geliştirme desteği sağlayacak olan **SMR Teknolojisinin Sorumlu Kullanımı için Temel Altyapı** (Foundational Infrastructure for Responsible Use of Small Modular Reactor Technology) (FIRST)) programını başlattığını açıklamıştır. Bakanlığın FIRST projelerini desteklemek için 5,3 milyon ABD doları taahhüt ettiği belirtilmiştir [4.3].

### ABD'de Nükleer Düzenleme

ABD'de, nükleer enerjinin düzenlenmesindeki en büyük sorumluluğu, federal hükümet üstlenmiştir. Nükleer tesisler, federal yasalar ve idari düzenlemeler ile işletilmektedir. ABD'deki nükleer mevzuatın en önemli parçası, radyoaktif malzemelerin bulundurulmasını, kullanılmasını ve bu tür malzemeleri üreten veya kullanan tesisleri düzenleyen federal 1954 Atom Enerjisi Kanunu'dur. Nükleer enerjinin askeri kullanımı federal hükümetin alanındadır. Atom enerjisinin barışçıl kullanımlarını denetlemek için bağımsız bir kurum olarak kurulan Atom Enerjisi Komisyonu (AEC), 1974'te kaldırılarak, nükleer endüstrinin, özellikle reaktörlerin, yakıt çevrimi tesislerinin, nükleer malzemelerin ve atıkların düzenlenmesinden sorumlu ve bağımsız bir komisyon olan Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC) kurulmuştur.

Nükleer silahların geliştirilmesinden ve gözetiminden sorumlu olarak 1975'te kurulan Enerji Araştırma ve Geliştirme İdaresi (ERDA), 1977'de Enerji Bakanlığı (DOE) adını alarak nükleer tahribatsız muayene, nükleer tıp gibi radyoaktif malzemelerin sivil kullanımlarının araştırılması ve tanıtımı sorumluluğunu üstlenmiştir [4.4].

### ABD SMR Lisanslama

NRC, NuScale SMR tasarımı için Son Güvenlik Değerlendirme Raporunu (FSER) yayınlayarak SMR için bir ilki gerçekleştirmiştir. **NuScale SMR NRC'den 2020 Ağustos ayında Tasarım Sertifikasyon Onayı (Design Certification Approval) almıştır. Bu onay herhangi bir SMR tasarımı için bir ilktir.** NuScale, NRC'den tam bir tasarım sertifikası alma yolunda ilerlemektedir. NRC NuScale SMR tasarımını onaylamak için mevzuat hazırlıklarına ve çalışmalarına devam etmektedir. Tasarım sertifikası onaylandığında NuScale SMR, NRC tarafından tasarım sertifikası onaylanan ilk SMR tasarımı olacaktır [4.3].

Bunun yanında Karbonsuz Enerji Projesi aracılığıyla DOE, SMR teknolojisini desteklemek için Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) ve üyeleri ile birlikte çalışmaktadır. UAMPS ve üyeleri SMR için tercih edilecek sahayı karakterize etmeye devam edecek ve NRC tarafından incelenmek üzere bir Birleşik Lisans Uygulaması geliştirmeye başlayacaktır. DOE, 2015 yılında UAMPS ile ortaklaşa

bir İnşaat ve İşletme Lisans Başvurusu (COLA) hazırlanması için NuScale'ye 16,6 milyon ABD Doları hükümet desteği sağlamıştır. DOE, aynı zamanda Idaho Ulusal Laboratuvarı'ndaki (INL) federal bir sahaya yerleştirilebilecek ilk NuScale tanıtım biriminin inşasına da imkan sağlamıştır. NuScale SMR, Kanada, Romanya, Çekya ve Ürdün'de gelecekte tesisler kurmak için çalışmalar yapmak üzere anlaşmalar imzalamıştır [4.5, 4.6].

NRC, hafif su kullanmayan gelişmiş reaktör teknolojileri için lisans uygulamalarını gözden geçirme stratejisine ilişkin 2019 yılında bir taslak "White Paper" yayınlamıştır. Altı reaktör tasarımcısı, tasarım onayı alma niyeti ile NRC'ye bilgi vermiştir. Bunlar arasında üç Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR'ler), bir Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı (HTR), bir Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör (SFR) ve Westinghouse eVinci Isı Borulu Reaktörü bulunmaktadır. NRC ve Kanada Nükleer Güvenlik Komisyonu (CNSC), Aralık 2019'da hafif su içermeyen gelişmiş bir nükleer reaktörün ilk ortak teknik incelemesi için Terrestrial Energy şirketinin Tümlşik (entegre) Ergimiş Tuz Reaktörünü (IMSR) seçmiştir [4.6].

ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC), 300 MWe veya daha az güçteki hafif su reaktörü (LWR) tasarımlarını SMR olarak tanımlamaktadır. Tablo 4.1'de ABD'de NRC'ye ön-başvurularda bulunmuş SMR tasarımcıları ve potansiyel lisans başvuru durumları listelenmektedir. SMR tasarımlarında soğutucu olarak hafif su veya gaz, sıvı metal veya ergimiş tuz gibi diğer hafif su olmayan soğutucuları kullanılsa da Tablo 4.1'de bulunan SMR tasarımları hafif sulu (LWR) tip reaktörlerdir [4.7].

**Tablo 4.1:** ABD'de NRC'ye ön-başvurularda bulunmuş LWR tipi SMR tasarımcıları ve lisans başvuru durumları

| Tasarım                          | Başvuru Tipi                                                                                 | Başvuran Şirket Adı                            |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>NuScale</b>                   | Tasarım Sertifikası<br>(Design Certification )                                               | NuScale Power, LLC                             |
| <b>NuScale720</b>                | Standart Tasarım Onayı<br>Ön-Başvuru<br>(Standard Design Approval (SDA),<br>Pre-Application) | NuScale Power, LLC                             |
| <b>BWXT mPower™</b>              | Ön Başvuru<br>(Pre-Application)                                                              | BWXT mPower, Inc.                              |
| <b>SMR-160</b>                   | Ön Başvuru<br>(Pre-Application)                                                              | SMR, LLC, a subsidiary of Holtec International |
| <b>Clinch River Nuclear Site</b> | Erken Saha İzni<br>(Early Site Permit)                                                       | Tennessee Valley Authority (TVA)               |
| <b>BWRX-300</b>                  | Ön Başvuru<br>(Pre-Application)                                                              | GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH)                |



ABD’de şu anda geliştirme ve lisanslama aşamasında olan soğutmalı SMR tasarımı ve teknolojisi, 60 MW(e) NuScale, SMR-160 (Holtech) ve BWRX-300 ile 195 MW(e) mPower ve 225 MW(e) Westinghouse SMR tasarımları öne çıkmaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA)’nın yayınladığı dokümana göre; ABD tarafından geliştirilmiş SMR tasarımları, tasarımcı firmaları ile tasarım-lisanslama güncel durumları Tablo 4.2’de verilmektedir [4.8].

**Tablo 4.2:** ABD tarafından geliştirilen SMR tasarımları lisanslama durumları

| TASARIM                        | TEKNOLOJİ                              | ŞİRKET                                                              | LİSANSLAMA DURUM                                                                                                                                                                |
|--------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NuScale                        | Su Soğutmalı SMR ler (Karada yerleşik) | NuScale Power, LLC                                                  | NRC’den tasarım onayı aldı, tam tasarım sertifikası almak için başvurdu.                                                                                                        |
| SMR-160                        |                                        | Holtec International                                                | Ticari proje ve ön lisanslama görevlerini destekleyen bir Ön Güvenlik Analizi raporu geliştirilmekte. Kanada’da CNSC ile tasarımcı tasarım incelemesinin 1. Aşaması tamamlandı. |
| BWRX-300                       |                                        | GE-Hitachi Nuclear Energy, USA and Hitachi-GE Nuclear Energy, Japan | Ön lisanslama İngiltere, Kanada ve ABD’de başlatıldı                                                                                                                            |
| Westinghouse SMR               |                                        | Westinghouse Electric Company LLC                                   | Konsept tasarımı tamamlandı                                                                                                                                                     |
| mPower                         |                                        | BWX Technologies, Inc.                                              | Konsept tasarım aşamasında                                                                                                                                                      |
| Xe-100                         | Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı          | X Energy, LLC                                                       | Temel tasarım geliştiriliyor                                                                                                                                                    |
| SC-HTGR                        |                                        | Framatome Inc.                                                      | Konsept tasarım aşamasında                                                                                                                                                      |
| EM2                            | Hızlı Nötron Spektrumlu                | General Atomics                                                     | Konsept tasarım aşamasında                                                                                                                                                      |
| Westinghouse Lead Fast Reactor |                                        | Westinghouse Electric Company                                       | Konsept tasarım aşamasında                                                                                                                                                      |
| SUPERSTAR                      |                                        | Argonne National Laboratory                                         | Konsept tasarım aşamasında                                                                                                                                                      |

| TASARIM                                       | TEKNOLOJİ     | ŞİRKET                                                              | LİSANSLAMA DURUM                                                        |
|-----------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ThorCon                                       | Ergimiş Tuz   | ThorCon International,<br>United States of<br>America and Indonesia | Temel tasarım tamamlandı                                                |
| Liquid Fluoride<br>Thorium Reactor            |               | Flibe Energy                                                        | Konsept tasarım aşamasında                                              |
| KP-FHR                                        |               | Kairos Power                                                        | Konsept tasarım aşamasında                                              |
| Mk1 PB-FHR                                    |               | University of California,<br>Berkeley                               | Ön-konsept tasarım aşamasında                                           |
| Molten Chloride<br>Salt Fast Reactor<br>MCSFR |               | Elysium Industries                                                  | Konsept tasarım aşamasında                                              |
| AURORA                                        | Mikro boyutlu | OKLO Inc.                                                           | ABD NRC tarafından kabul edilen<br>birleşik lisans başvurusu bulunuyor. |
| Westinghouse<br>eVinci™ Micro<br>Reactor      |               | Westinghouse Electric<br>Company LLC                                | Konsept tasarım aşamasında                                              |
| MMR                                           |               | Ultra Safe Nuclear<br>Corporation                                   | Temel / Ön Tasarım aşamasında                                           |

## ABD Nükleer Atık Yönetimi

IAEA verilerine göre, en fazla reaktör işleten ülke konumundaki ABD, atık yönetiminde, nükleer santral gelişimine bağlı olarak ilerleme kaydetmiştir. İlk defa 1957 yılında Ulusal Bilimler Akademisi kullanılmış yakıt ve nükleer atıklar için jeolojik bertaraf yöntemini önermiş ve depolama ortamını tuz kayası olarak tanımlanmasıyla çalışmalar başlatılmıştır. 1972 yılında 100 yıllık geçici depolama çözümü olarak “Geri Dönüşebilir Yüzey Depolama Tesisi” desteklenmesine rağmen 1975 yılında Jeolojik Depolama (Geologic Disposal) kabul edilmiştir. 1977 yılında Kullanılmış Yakıtın Yeniden İşlenmesi seçeneğinden tamamen vazgeçilmiş ve direk depolama kabul edilmiştir.

Süreç içinde farklı öneriler doğrultusunda mevzuat düzenlemesi yapılmış ve bu doğrultuda çalışmalar yürütülmüştür. 1987 yılında Nevada Yucca Dağı direk depolama yapılacak alan olarak seçilmiştir. 1999 yılında DOE atıkların geçici olarak sahada beklemesi yerine Yucca Dağında depolanmasının daha güvenli olacağını ifade etmiştir. 2002 yılında ABD Başkanlığının Yucca Dağı projesini ABD’nin ilk depolama sahası olarak kabul etmesi ve tesisin 2010 yılında açılmasının planlanmasına karşın belirsizliklerden ötürü tesisin açılması ertelenmiştir.

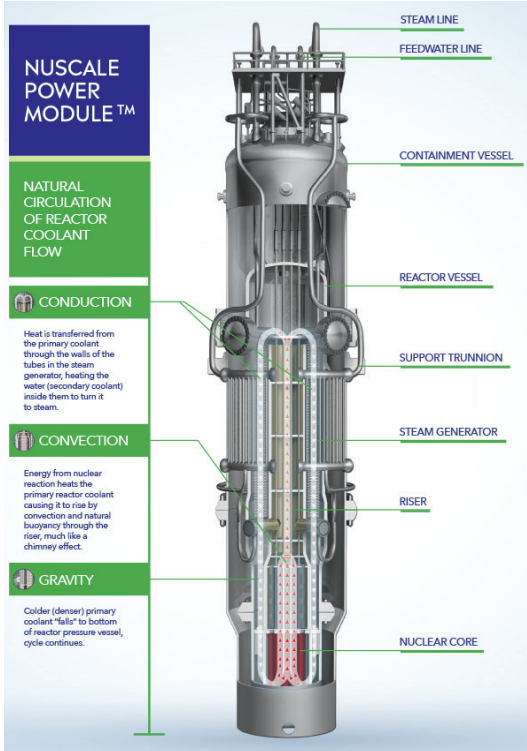
Proje kapsamında 2036 yılında depoya atık kabulünün başlayabileceği tahmin edilmekte olsa da Yucca Dağı Projesi ile ilgili yer belirleme, düzenleyici faaliyetler (NRC) vb. sorunlar nedeniyle federal, eyalet ve yerel yargı alanları arasında devam eden anlaşmazlıklar mevcuttur. İnşaat, işletme, kapatma ve kapatma sonrası izleme dahil olmak üzere tamamlanması durumunda projenin maliyetinin 45-50 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmektedir. Tesisin yönetiminden DOE sorumlu olacaktır [4.9].

## NUSCALE

NUSCALE Power LLC tarafından geliştirilen ve bütünleşik basınçlı su reaktörü olan NUSCALE; ABD'nin SMR teknolojileri arasında öne çıkan bir tasarımıdır. Her modülü 60 MW(e) nominal güce ve 12 modül ile toplam 720 MW(e) kapasiteli bir reaktör binasına sahip olan NUSCALE'in tasarımının geliştirilmesinde önemli bir dönüm noktası geçilmiştir. NUSCALE, Eylül 2020'de standart tasarım onayının yayınlanması ile NRC ile dört yıllık tasarım sertifikasyon inceleme sürecini tamamlamış bulunmaktadır. Bu onayın verilmesi, NRC'nin NUSCALE SMR tasarımının teknik incelemesini tamamlandığını göstermektedir. İlk ticari NUSCALE santralının 2029 yılında ticari işletmeye alınması hedeflenmektedir.



Şekil 4.1: NUSCALE santral yerleşim planı [4.10]



Şekil 4.2: NUSCALE tasarımı genel görünüm[4.10]

NUSCALE santral yerleşim planı Şekil 4.1'de görüldüğü gibi temel olarak bir reaktör binası, bir kontrol odası binası, iki türbin-jeneratör binası, bir radyoaktif atık binası, salt sahası ve kullanılmış yakıt için bir depolama alanından oluşmaktadır.

NUSCALE tasarımı, elektrik üretimi ve proses ısı uygulamaları için kullanılabilen modüler bir reaktördür. Önemli tesis tasarımı özellikleri arasında; fabrikada üretilen kompakt modül, tüm çalışma durumları için





**Şekil 4.4:** NUSCALE kesit görünüşü [4.8]

Şekil 4.4'te NUSCALE kesit görünüşünde gösterilen reaktör binası 12 adede kadar güç modülü, modül montaj/sökme ekipmanı, yakıt değiş-tirme ekipmanı ve kullanılmış yakıt havuzunu barındırır. Her NUSCALE modülü, biyolojik bir kalkan görevi gören beton ile ayrı bir bölmede ortak bir

reaktör havuzuna daldırılmış olarak çalışır. Reaktör havuzu ve reaktör binası, sismik kategori-1 standartlarına göre tasarlanmıştır. Bir NUSCALE tesisinde, her biri altı adede kadar türbin ve hava soğutmalı jeneratörler barındıran iki ayrı türbin binası bulunur. Türbin binaları, yardımcıları, yoğuşturucuları, yoğuşma sistemleri ve besleme suyu sistemleriyle birlikte türbin jeneratörlerini barındıran yapılardır. Her türbin-jeneratör, tek bir modül ile ilişkilidir ve özel kondensat ve besleme suyu pompalarına sahiptir. NuScale'e ait tasarım parametreleri Tablo 4.3'de verilmektedir.

**Tablo 4.3:** NuScale tasarım özellikleri [4.8]

| Parametre                                                               | Değer                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Teknoloji Geliştirici                                                   | NuScale Power LLC, ABD                                                                                                   |
| Reaktör tipi                                                            | Birleşik PWR                                                                                                             |
| Soğutucu/Yavaşlatıcı                                                    | Hafif Su                                                                                                                 |
| Termal/Elektrik kapasitesi MW(t)/MW(e)                                  | 200/60 (brüt)                                                                                                            |
| Birincil Döngü                                                          | Doğal Sirkülasyon                                                                                                        |
| Nükleer Buhar Tedarik Sistemi İşletme Basıncı (birincil / ikincil), MPa | 13.8/4.3                                                                                                                 |
| Çekirdek Giriş / Çıkış Soğutucu Sıcaklığı (°C)                          | 265/321                                                                                                                  |
| Yakıt tipi / Demet dizilişi                                             | UO <sub>2</sub> pelet/ 17x17                                                                                             |
| Kordaki yakıt demetlerinin sayısı                                       | 37                                                                                                                       |
| Yakıt zenginliği (%)                                                    | < 4.95                                                                                                                   |
| Çekirdek tahliye Burnup (GWd/ton)                                       | > 30                                                                                                                     |
| Yeniden yakıt yükleme döngüsü (ay)                                      | 24                                                                                                                       |
| Reaktivite kontrol mekanizması                                          | Kontrol çubukları, boron                                                                                                 |
| Güvenlik sistemi yaklaşımı                                              | Pasif                                                                                                                    |
| Tasarım Ömrü (yıl)                                                      | 60 yıl                                                                                                                   |
| Santral kaplama alanı (m <sup>2</sup> )                                 | 140000                                                                                                                   |
| Reaktör basınç kabı yüksekliği/çapı (m)                                 | 17.7/2.7                                                                                                                 |
| Sismik tasarım (SSE)                                                    | 0.5 g yatay ve 0.4 g düşey max yer ivmesi                                                                                |
| Yakıt döngü gereksinimleri /Yaklaşım                                    | Üç aşamalı yeniden yükleme                                                                                               |
| Ayrırt edici özellikler                                                 | Çekirdek soğutması için AC veya DC olmadan güç, su ilavesi veya operatör eylemi gerektirmeyen sınırsız başa çıkma süresi |
| Tasarım durumu                                                          | NRC'den tasarım onayı aldı, tam tasarım sertifikası almak için başvurdu                                                  |



## 4.2. ARJANTİN

Nükleer faaliyetler, Ulusal Atom Enerjisi Komisyonun (Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA) 1950’de kurulmasıyla başlamıştır. Nükleer alanda Ar-Ge’ye odaklanan, çeşitli araştırma reaktörlerinin inşası da dahil olmak üzere bir dizi faaliyetler ile devam etmiştir. 1964 yılında Buenos Aires bölgesi için 300-500 MWe’lik bir üniteli bir nükleer santral için yapılan fizibilite çalışmasının ardından çalışmalar hız kazanmıştır. Arjantin’in ilk ticari santrali Atucha-1 yapımına 1968’te başlanmıştır. Embalse reaktör yapımına ise 1974 yılında başlanmıştır. Ancak ilerleyen süreçte ilk işletmeye alınan Embalse’dir. Atucha-2 reaktör yapımına ise 1981 yılında başlanmıştır. Atucha 2 santrali, 745MWh’lık kapasitesi ile 3 Haziran 2014’te enerji üretmeye başlamıştır. Tüm reaktörler PHWR reaktör tipidir. Atucha 1 tesisi 2001 yılında, tesis az zenginleştirilmiş uranyum kullanmak üzere yenilenmiş ve bu da onu dünya çapında bu yakıtı kullanan ilk PHWR reaktörü haline getirmiştir. Yine aynı sahada üçüncü bir reaktör yapılması planlanmaktadır [4.8]. Arjantin’de elektriğin yaklaşık %10’u, üç nükleer reaktörden sağlanmaktadır. Arjantinde işletilen ticari reaktörler Tablo 4.4’te görülmektedir.

**Tablo 4.4:** Arjantin’de faaliyette olan reaktörler [4.12]

| Reaktör ismi    | Model    | Reaktör tipi | Net kapasite | Yapım Başlangıç | İlk şebeke bağlantısı |
|-----------------|----------|--------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| <b>Atucha 1</b> | PHWR KWU | PHWR         | 340          | 1968-06         | 1974-03               |
| <b>Embalse</b>  | CANDU 6  | PHWR         | 608          | 1974-04         | 1983-04               |
| <b>Atucha 2</b> | PHWR KWU | PHWR         | 693          | 1981-07         | 2014-06               |

Arjantin ayrıca çeşitli araştırma reaktörlerine sahiptir ve nükleer teknoloji ihraç etmektedir. Bugün, beş araştırma reaktörü, CNEA ve diğerleri tarafından işletilmekte ve iki araştırma reaktörü daha yapım aşamasındadır. Aralık 2015’te Arjantin’in Pílacaniyeu’da bulunan nükleer santralleri için yakıt üretecek yeni bir uranyum zenginleştirme tesisi açılmıştır. Arjantin nükleer alanda Kanada, Çin gibi ülkelerle imzalanan anlaşmaları ile tasarım geliştirme ve bunu ticari olarak ihraç etme çalışmalarına ağırlık vermiştir. Bu kapsamda son zamanlarda tasarım geliştirme çalışmalarına ağırlık verilen SMR için ilerleme kaydetmiştir.

CAREM Arjantin’in, CNEA (İng. - National Atomic Energy Commission) tarafından, elektrik üretim amacı ile geliştirilen modüler nükleer reaktör projesidir. İlk olarak, 1984’te Peru’daki Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IEAA) konferansında tanıtılan CAREM’in, 25 MWe prototip (öntür) inşaat aşamasında olup, 100-200 MWe kapasiteli ikinci versiyonu da CNEA programında yer almaktadır [4.13]. CAREM, tasarımı basitleştiren ve güvenlik performansını artıran özelliklere sahip, doğal sirkülasyon tabanlı bir dolaylı çevrim reaktörüdür. Birincil devresi tamamen reaktör kabında bulunur. Kendinden basınçlandırma, ayrı bir basınçlandırma kabı olmaksızın kaptaki buhar üretimi ve yoğuşmanın dengelenmesiyle sağlanır.

#### Önemli tasarım özelliklerinden bazıları şunlardır [4.8]:

- » Entegre birincil soğutma sistemi
- » Kendinden basınçlı
- » Doğal sirkülasyon ile çekirdek soğutma
- » Reaktör kabı kontrol çubuğu tahrik mekanizmaları
- » Pasif özelliklere dayanan güvenlik sistemleri

CAREM reaktörün çalışma prensibi temel olarak basitleştirilmiş bir basınçlı su reaktörüne (PWR) dayanır. Yakıt olarak %3,1 zenginleştirilmiş  $U^{235}$  (uranyum dioksit) kullanılmıştır. Ana soğutma sistemi doğal konveksiyon prensibine dayalıdır. Bu prensibin avantajı, soğutucunun sistemde sirkülasyonunu herhangi bir pompaya ihtiyaç duymadan gerçekleşmesi ve kaza durumunda, çekirdeğin erimesine karşı doğal bir güvenlik oluşturmaktır.

CAREM, birleşik yapısı ile entegre bir reaktördür. Yüksek enerjili birincil sistemi (çekirdek, buhar jeneratörleri, birincil soğutucu, vb.) tek bir basınç kabı içinde bulunur. Birincil soğutma akışı, çekirdeğin üzerine yerleşik olan buhar üreticileri vasıtasıyla doğal sirkülasyon ile gerçekleşir. Su, çekirdek tarafına alt bölümden girer. Isınan bu su/akışkan çekirdekten çıkar ve yukarı hareket ederek buhar üreticisine geçer. Modüler buhar üreticilerinden geçerek entalpisini düşürür. Buhar üreticiden geçen diğer akışkan türbin sistemine gitmektedir [4.8].

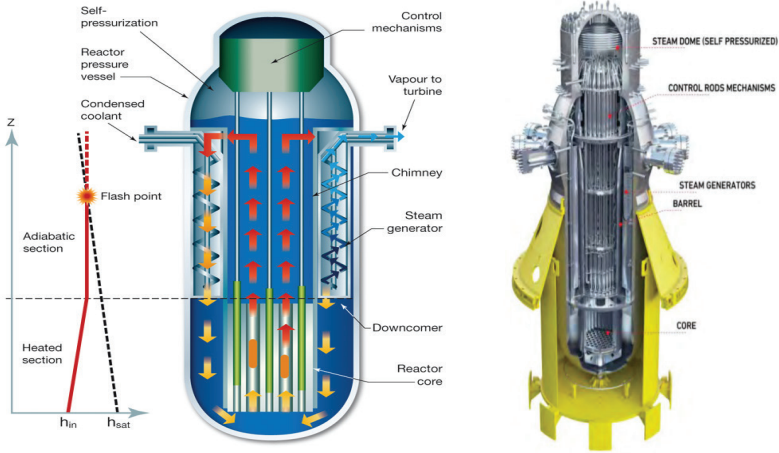
CAREM-25'in reaktör çekirdeği, altıgen kesitli yakıt düzeneklerine sahiptir. Yaklaşık 1,4 metre aktif uzunluğa sahip 61 adet yakıt grubu bulunmaktadır. Her yakıt düzeneği, 9 mm dış çapa sahip 108 yakıt çubuğu, 18 kılavuz yüksük ve bir enstrümantasyon yüksüğü içerir. Yakıt olarak %1,8-3,1 oranında zenginleştirilmiş  $UO_2$ 'dir. Yakıt döngüsü, 390 gün prototipi ve çekirdek değişiminin %50'si için bir referans tasarımıyla müşteri gereksinimlerine göre uyarlanabilir.

Çekirdek reaktivitesi, özel yakıt çubuklarında ve kontrol sistemine ait hareketli emici elemanlarda, yanabilir nötron zehri olarak bilinen  $Gd_2O_3$  kullanılarak kontrol edilir. Soğutucudaki nötron zehiri, normal çalışma sırasında ve reaktörün kapatılması sırasında reaktivite kontrolü için kullanılmaz. Her emici eleman, yapısal bir elemana ('spider') bağlı bir çubuk kümesinden oluşur, böylece tüm küme tek bir birim olarak hareket eder. Nötron soğurucu çubuklar kılavuz borulara oturur. Emici malzeme, yaygın olarak kullanılan Ag-In-Cd alaşımıdır. Soğurucu elemanlar, normal çalışma sırasında reaktivite kontrolü için ve gerektiğinde nükleer zincir reaksiyonunun ani bir şekilde kesilmesi için kapatmada kullanılır [4.8]. CAREM-25 Reaktör Basınç Kabı (RPV), 13 cm ile 20 cm arasında değişen kalınlıklardadır. RPV, iç paslanmaz çelik astarlı dövme çelikten yapılmıştır. CAREM reaktör tasarımı, Şekil 4.5'de gösterilmektedir.

CAREM reaktör tasarımının temel teknik özellikleri, Tablo 4.5’de verilmektedir.

**Tablo 4.5:** CAREM reaktör tasarımının temel teknik özellikleri [4.8]

| CAREM teknik özellikleri                               |                                                   |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke                    | CNEA, Arjantin                                    |
| Reaktör tipi                                           | Tümleşik PWR                                      |
| Soğutucu/moderatör                                     | Hafif su / Hafif su                               |
| Termal/elektrik kapasitesi, (MW(t)/MW(e))              | 100 / ~30                                         |
| Soğutma sistemi tipi                                   | Doğal sirkülasyon                                 |
| Çalışma basıncı (birincil/ikincil), (MPa)              | 12.25 / 4.7                                       |
| Çekirdek giriş/çıkış soğutucu sıcaklığı, (°C)          | 284 / 326                                         |
| Yakıt tipi/montaj dizisi                               | UO <sub>2</sub> pelet/altıgen                     |
| Çekirdekteki yakıt grubu sayısı                        | 61                                                |
| Yakıt zenginleştirme, (%)                              | %3,1 (öntür-prototip)                             |
| Ortalama yakıt değişimi gerektiren yanma oranı (GWd/t) | 24 (öntür)                                        |
| Yakıt doldurma döngüsü, (ay)                           | 14 (öntür)                                        |
| Reaktivite kontrol mekanizması                         | Yalnızca kontrol çubuğu tahrik mekanizması (CRDM) |
| Güvenlik sistemleri                                    | Pasif                                             |
| Tasarım süresi, (yıl)                                  | 40                                                |
| Yüksekliği/çapı, (m)                                   | 11 / 3,2                                          |
| Ağırlık, (ton)                                         | 267                                               |



**Şekil 4.5:** CAREM Tasarımı [4.14, 4.15]

CAREM-25’te, tek geçişli tipte on iki özdeş mini sarmal dikey buhar jeneratörü, RPV’nin iç yüzeyi boyunca birbirinden eşit uzaklıkta yerleştirilmiştir. Her biri 6 sarmal boru katmanından, 26 m aktif uzunlukta 52 paralel borudan oluşan bir sis-

temden oluşur. Isıyı birincil devreden ikincil devreye aktarmak için kullanılırlar ve 4,7 MPa'da aşırı ısıtılmış kuru buhar üretirler. İkincil sistem, boruların içinde yukarı doğru dolaşır, birincil soğutucu ise karşı akım akışında hareket eder. İkincil tarafta neredeyse eş oranlı bir basınç kaybı ve aşırı ısınma elde etmek için tüm boruların uzunluğu eşitlenir. Buhar jeneratörleri, ikincil tarafta basınç olmadan birincil basınca dayanacak şekilde tasarlanmıştır ve ikincil tarafın tamamı, buhar jeneratörü borusunun kırılması durumunda izolasyon vanalarına (buhar çıkış/su giriş başlıkları dahil) kadar birincil basınca dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Buhar kubbesindeki birincil sistemin kendi kendine basınçlandırılması, sıvı-buhar dengesinin sonucudur. RPV'deki entegre bir basınçlandırıcı olarak hareket eden büyük buhar hacmi, aynı zamanda herhangi bir basınç bozulmasının sönümlenmesine de katkıda bulunur. Kendinden basınçlandırma nedeniyle, çekirdek çıkışındaki yığın sıcaklığı, birincil basıncıdaki doyma sıcaklığına karşılık gelir. Bu şekilde, geleneksel PWR basınçlandırıcılarda bulunan tipik ısıtıcılar ortadan kalkar [4.8].

CAREM'in güvenlik sistemi, iki reaktör koruma sisteminden (RPS), otomatik hareket eden iki kapatma sisteminden, pasif artık ısı tahliye sisteminden (PRHRS), güvenlik ve basınçsızlaştırma valflerinden, düşük basınçlı enjeksiyon sisteminden ve basınç bastırma tipi bir muhafazadan oluşur. 9 adet hızlı kapatma çubuğu ve çekirdeğin üzerine yerleştirilmiş 16 adet reaktivite kontrol çubuğu ile tüm kapatma durumlarında çekirdek alt kritik değeri korunmaktadır. Çekirdek bozunma ısısının uzaklaştırılması, soğutucu kaybı veya santral kararma (blackout) durumunda 36 saatlik süreyle güvenlik sağlanır. Buhar üreteçleri paralel yatay U-tüplerden oluşur. Bir boru hattı buhar tankına, bir diğeri yoğunlaşma dönüş hattına bağlı olarak birincil sistem tarafı reaktör çekirdeği ile birleşmiştir. Tasarım, doğal sirkülasyon yoluyla, çekirdek bozunma ısısının uzaklaştırılmasını sağlayarak, muhafaza içindeki özel havuzlara ve ardından bastırma havuzuna aktarır. İki yedekli dizel, uzun vadede aktif soğutma sistemleri için acil durum kaynağı sağlar. Basınç bastırma havuzlu silindirik muhafaza kabı, paslanmaz çelik astar iç yüzeye sahip 1,2 m kalınlığında betonarme bir dış duvardır ve 0,5 MPa basınç ile 0,25 g'lık depremlere dayanır.



**Şekil 4.6:** CAREM SMR Binası [4.16]

İnşaat lisansını müteakip prototipin yapımına başlanmıştır. Nükleer ile ilgili olmayan binaların ilk betonu Şubat 2014'te dökülmüştür. Bileşenlerin üretimi için farklı Arjantinli paydaşlar ve tedarikçilerle sözleşmeler imzalanmıştır. 12 çevresel etki çalışması yerel yönetim tarafından onaylanmıştır. CAREM SMR binasının temsili görünümü Şekil 4.6'da verilmiştir.

### 4.3. ÇİN

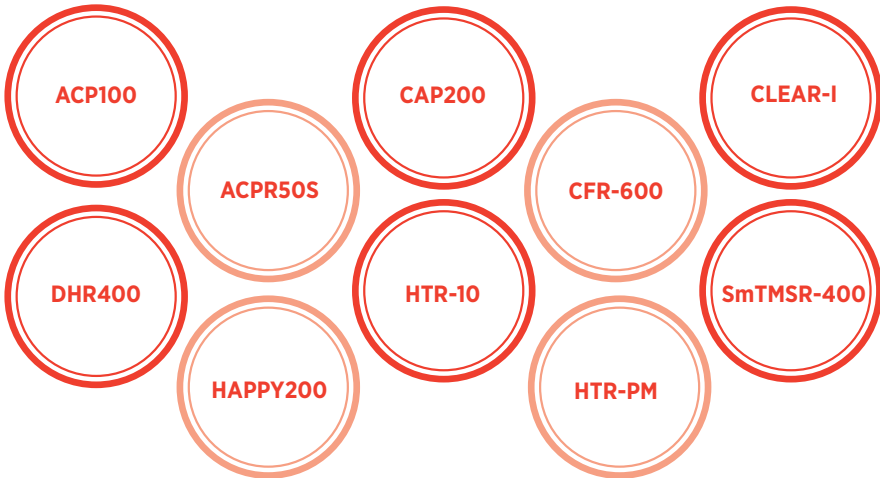
Son yıllarda nükleer alanda önemli ilerlemeler kaydeden Çin, 4 Ekim 2021 itibariyle, 51 tane işletmede olan nükleer ünitesi (şebekeye bağlı ancak henüz ticari olarak çalışmayan iki ünite dahil) ve yapım aşamasında olan 14 nükleer ünite olmak üzere toplamda 65 adet nükleer üniteye sahiptir [4.17].

Çin, enerjinin “ekonomik, temiz ve güvenli” geliştirilmesi politikasına bağlı olarak kömür tüketimini kademeli olarak düşürmeyi ve yenilenebilir ile nükleer enerji tüketim oranlarını önemli ölçüde arttırmayı hedeflemektedir. Bu çerçevede, nükleer çalışmalarına ağırlık vererek SMR teknolojisinde de önemli ilerleme kaydetmiştir.

Çin’de SMR araştırma ve geliştirme çalışmaları oldukça yoğun devam etmektedir. Şirketler arasındaki rekabetten dolayı araştırmalarda önemli ilerleme kaydedilmiş ve farklı teknolojilerde SMR geliştirme çalışmalarına ağırlık verilmiştir [4.18] Çin nükleer şirketlerinden China National Nuclear Corporation (CNNC) (%51) ve China Guodian Corp’un ortak girişimi olan CNNC New Energy Corporation, ACP100 reaktörünün yapımını yürütmektedir. Changjiang’daki tek üniteli bir tesis için Nisan 2020’de ön güvenlik analizi raporu onaylanmıştır. Diğer taraftan, Çin’de özellikle kuzey bölgesinde ısınmada yoğunlukla kömür kullanıldığından yaklaşık 400 ünite şeklinde güçlü bir potansiyele sahip olabilecek 100 ila 200 MWt kapasiteli küçük bölgesel ısıtma reaktörleri (Small District Heating) geliştirmektedir.

Çin’in en gelişmiş küçük modüler reaktör projelerinden biri olan HTR-PM, Chiner-gy’nin 210 MW elektrik üreten santral projesidir. Bu santralde iki adet yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör (HTR) inşa edilmiştir.

Çin’de yürütülen SMR tasarımları ve özellikleri Tablo 4.6’da listelenmiş ve detaylı olarak açıklanmıştır.



**Tablo 4.6:** Çin'de yürütülen küçük modüler reaktör tasarımları [4.8, 4.19]

| TASARIM İSMİ    | TAM İSMİ                                                                                                                            | ŞİRKET                                                                                            | SOĞUTUCU TÜRÜ                | YAVAŞLATICI | DİZAYN DURUMU     | REAKTÖR TİPİ |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------|--------------|
| <b>CFR-600</b>  | Çin Hız Reaktörü 600 (China Fast Reactor)                                                                                           | China Institute of Atomic Energy                                                                  | Sodyum                       | Yok         | Kavramsal Tasarım | SFR          |
| <b>CLEAR-I</b>  | Çin Kurşun Bazlı Araştırma Reaktörü (China LEAD-Based Research Reactor)                                                             | Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences                        | Kurşun Bizmut Ötektik Alaşım | Yok         | Kavramsal Tasarım | LFR          |
| <b>HAPPY200</b> | Gelişmiş Düşük Basıncılı ve Pasif Güvenlik Sistemli Isıtma Reaktörü (200 MWth) (Advanced Low-Pressurized and Passive Safety System) | <u>SPIC</u> (State Power Investment Corporation, Ltd.)                                            | Hafif Su                     | Hafif Su    | Detaylı Tasarım   | PWR          |
| <b>HTR-10</b>   | Yüksek Sıcaklıklı Gaz soğutmalı Test Reaktörü (Pebble Bed High Temperature Gas-Cooled Test Reactor) (Pebble-Bed Module)             | Tsinghua University (INET) (Tsinghua University's Institute of Nuclear and New Energy Technology) | Helyum                       | Grafit      | İşletmede         | GCR          |
| <b>ACP100</b>   | Entegre edilmiş PWR (125 MWe)                                                                                                       | CNNC (NPIC/ CNPE)                                                                                 | Hafif Su                     | Hafif Su    | Detaylı Tasarım   | PWR          |

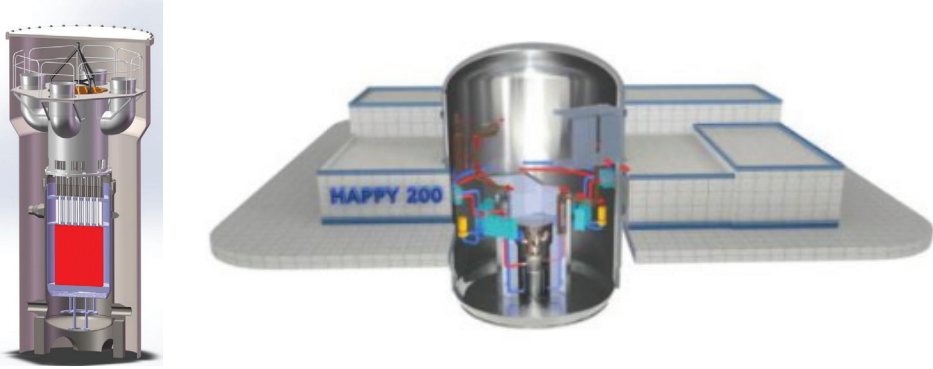


| TASARIM İSMİ      | TAM İSMİ                                                                                                              | ŞİRKET                                                                            | SOĞUTUCU TÜRÜ                                                                        | YAVAŞLATICI | DİZAYN DURUMU                                                                | REAKTÖR TİPİ |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>HTR-PM</b>     | Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör (Pebble-Bed Module) (210 MWe)                                                 | Tsinghua University/ (INET)                                                       | Helyum                                                                               | Grafit      | İnşaatın tamamlanması, 2020'de birincil döngünün devreye alınması için test  | GCR          |
| <b>CAP200</b>     | Çin Gelişmiş-Pasif, Basıncılı Su Reaktörü (The China Advanced Passive Pressurized Water Reactor) (200 MWe)            | SNERDI / SPIC<br><br>(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute) | Hafif Su                                                                             | Hafif Su    | Tamamlanmış Detaylı Tasarım (2020)                                           | PWR          |
| <b>DHR400</b>     | Havuz Tipi Bölgesel Isıtma Reaktörü (400 MWth)                                                                        | CNNC                                                                              | Hafif Su                                                                             | Hafif Su    | Temel Tasarım                                                                | PWR          |
| <b>ACPR50S</b>    | Açık Deniz Yüzen SMR, Döngü Tipi PWR (50 MWe) (Small Modular Offshore Floating- Loop Type PWR)                        | CGNPC (China General Nuclear Power Group)                                         | Hafif Su                                                                             | Hafif Su    | Kavramsal / Program Tasarımının Tamamlanması, Proje Tasarımının Hazırlanması | PWR          |
| <b>SmTMSR-400</b> | Küçük modüler Toryum Ergimiş Tuz Tanıtım Reaktörü (Small Modular Thorium Molten Salt Demonstration Reactor) (168 MWe) | SINAP, CAS (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Science)    | LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> yakıt tuzu | Grafit      | Ön Kavramsal Tasarım                                                         | MSR          |

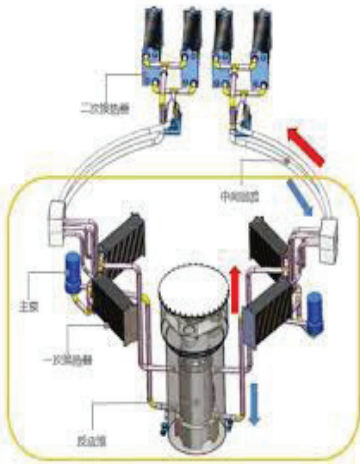
## HAPPY-200

Gelişmiş düşük basınçlı ve pasif güvenlik sistemli 200 MWth kapasiteli HAPPY-200 ısıtma reaktörü, hem havuz tipi reaktörünün hem de bir dereceye kadar PWR'ün özelliklerine sahip olduğundan Şekil 4.7'de görüleceği üzere havuz devreli kombine tip reaktör de denir.

İç bölgelerde ısıtma amaçlı tasarlanan HAPPY-200 için kavramsal tasarımı tamamlanış ve ön tasarım yapılmaktadır. Yer seçimi ve ön fizibilite çalışmaları tamamlanmıştır. HAPPY-200 tasarımı, çoğu ülkede tasarım ve lisanslama ile ilgili düzenleyici makamların şartlarını karşılamaktadır. Çin nükleer düzenleme makamlarına, bir saha güvenlik değerlendirme raporu ve saha aşaması çevresel etki değerlendirme raporu sunulması beklenmektedir [4.8].



Şekil 4.7: HAPPY-200 tasarım görselleri [4.8]



Şekil 4.8: HAPPY-200 şematik gösterimi [4.8]

HAPPY200 tasarımında, havuz tipi reaktörler ve pasif nükleer güvenlik teknolojisinin işletim deneyiminden yararlanılmaktadır. Bu tasarımda kısaltılmış yakıt demeti, plakalı ısı değiştiricisi vb. yüksek güvenilirliği ve bakım yapılabilirliği kabul görmüş ekipman kullanılmıştır. Tasarımının birincil güvenlik hedefi, çekirdek erimesi ihtimalinin ortadan kaldırılması ve saha dışı acil durumların teknik olarak iptali koşullarını sağlamaktır.

Normal çalışma sırasında, 80 °C olan giriş suyu kora alttan girer ve daha sonra su 120 °C sıcaklığa kadar ısıtılır. Akış şeması

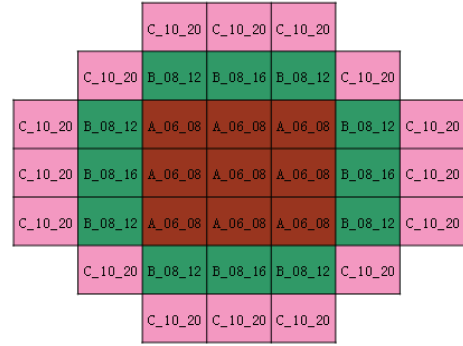
Şekil 4.8’de görülmektedir. Çıkış suyu iki sıcak hat ile dört ayrı birincil ısı değıştiriciye girer. Burada birincil su, ikincil devredeki suya ısınıı aktarır ve ayrı ayrı iki soğuk hat ile tekrar kora giriş yapar. Normal işlemler sırasında kaynama olmaz.

İkincil soğutucu sistem, izole edilmiş sızdırmaz bir çevrimdir. Birincil çevrimden üçüncüye ısı aktarılmasında radyoaktif birincil suyun üçüncü döngüyü kirletme şansı yoktur. Tasarıma ait görsel yakıt demeti Şekil 4.9’da gösterilmektedir.

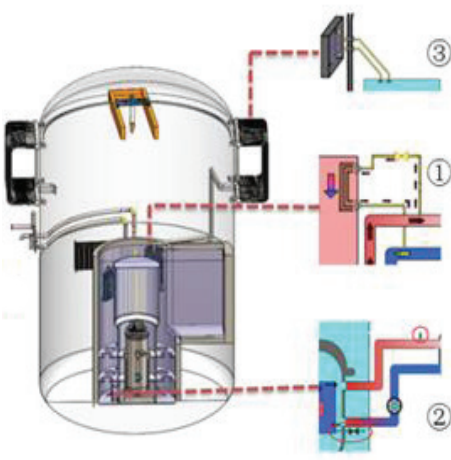
| TEKNİK ÖZELLİKLER             |                                                                                        |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Yakıt malzemesi               | UO <sub>2</sub> ile yanabilir bir nötron yutucu (Burnable Absorber) olan Gadolonyumdur |
| Çekirdek yakıt tasarımı       | 17×17 (264)                                                                            |
| Maksimum zenginleştirme (wt%) | %5 U-235                                                                               |
| Yakıt demeti (adet)           | 37                                                                                     |
| Aktif çekirdek uzunluğu (m)   | 2,1                                                                                    |
| Yakıt değıştirme süresi (ay)  | 18                                                                                     |
| Çekirdek çıkış sıcaklığı (°C) | 120                                                                                    |
| Çekirdek giriş sıcaklığı (°C) | 80                                                                                     |

Çin’in kuzeyinde ısıtma sisteminin yılda yaklaşık altı ay çalışması gerektiğinden, reaktör yılda 180 gün çalışabilir. HAPPY-200 yakıt gruplarının değışimini gerektiren ortalama yanma oranı (The Average Discharge Burnup) yaklaşık 40 GWd/tU’dur [4.8]. Kullanılmış yakıt reaktörden boşaltıldıktan sonra tesis sahasında depolanır ve radyoaktivitesinin azaltılması sağlanır. Güvenli radyoaktif seviyeye ulaştığında özel bertaraf sahasına aktarılır. Reaktör basınç kabı büyük su havuzunun içine daldırılmıştır, normal çalışma ve diğer koşullar sırasında havuzdan izole edilir [4.8]. HAPPY-200, manyetik kuvvet tipi ve hidrolik kuvvet tipi kontrol çubuğu tahrik mekanizmasında (CRDM), 21 kontrol çubuğu kümesi kullanır. Reaktivite kontrolü için boron vb. gibi hiçbir kimyasal ekleme (Chemical Shim) kullanılmaz.

HAPPY-200’ün güvenlik konsepti, doğal güvenlik özelliklerine, derinlemesine savunma ilkesine, kazaları önlemek ve sonuçlarını hafifletmek için pasif sistemlerin kullanılmasına ve radyoaktif malzemelerin çevreye salınımının önündeki çoklu engellere dayanmaktadır [4.8].



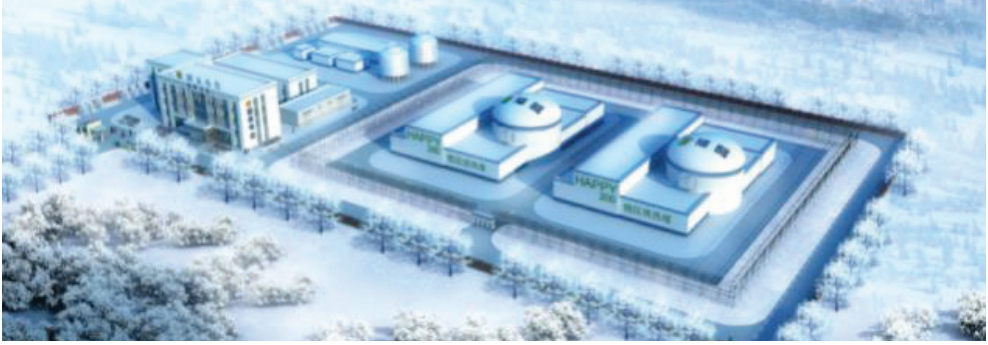
Şekil 4.9: HAPPY-200 Yakıt Demeti [4.8]



**Şekil 4.10:** HAPPY-200 tasarlanmış güvenlik özellikleri: (1) pasif buharlaşma ısı giderme sistemi, (2) pasif güvenlik enjeksiyon sistemi, (3) pasif hava soğutma sistemi [4.8]

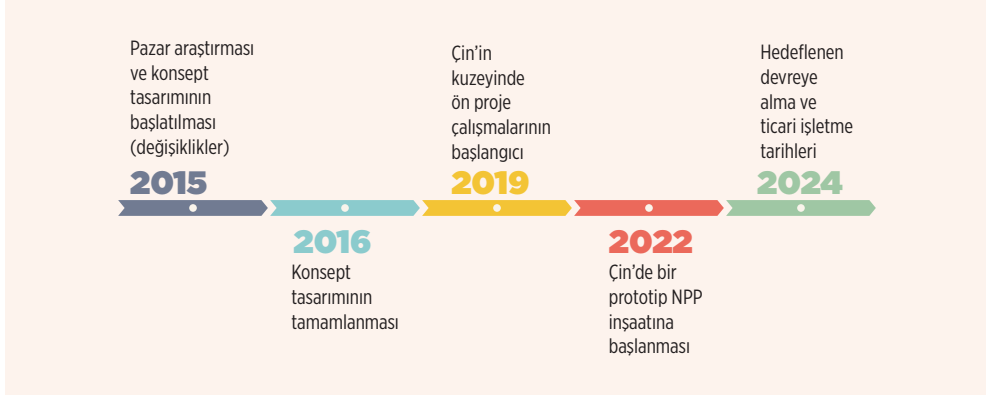
Şekil 4.10'da tasarlanmış güvenlik özellikleri gösterilmiştir. Bu tasarım toplamda 5 güvenlik bariyerine sahiptir. Bunlar sırasıyla yakıt peleti, yakıt zarfı, birincil devre sistemi, büyük hacimli koruma havuzu ve çelik muhafaza.

Tasarımın güvenlik sistemleri şunlardan oluşur: yedekli kapatma sistemi, pasif besleme-boşaltma sistemi (PFB), pasif buharlaşma ısı giderme sistemi (PHR), pasif hava soğutma sistemi (PAC) vb. Bu sistemler, tesisin ömrü boyunca çekirdek bütünlüğünü koruyabilir. Tesis binaları ve yerleşim düzeni, temsili olarak Şekil 4.11'de verilmiştir.



**Şekil 4.11:** Tesis yerleşim düzeni [4.8]

Bu tasarımın dönüm noktaları aşağıda özetlenmektedir.



## HTR-10 & HTR-PM

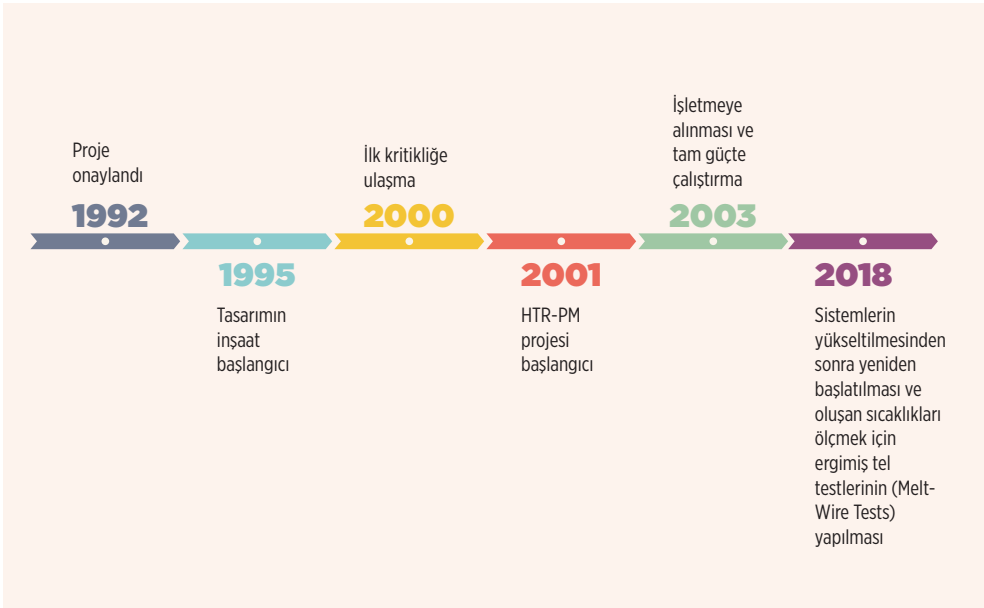
1992'de Çin Merkezi Hükümeti, Pekin'in kuzeyindeki Tsinghua Üniversitesi Nükleer ve Yeni Enerji Teknolojileri Enstitüsü'nde (INET) 10 MWth çakıl yataklı, yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı test reaktörünün (HTR-10) yapımını onaylamıştır. HTR-10 için tasarım ve lisanslama aşaması tamamlanmış ve 2003 yılında tam kapasite ile çalışmaya başlamıştır.

HTR-10 tasarımı, Çin Ulusal Yüksek Teknoloji Programı kapsamındaki enerji sektörü üzerine büyük bir projedir ve modüler HTGR'lerin geliştirilmesi adına öncü bir reaktördür. HTR-10, yeni nesil gelişmiş reaktörlerde ortak olan doğal güvenlik özelliklerine sahip olduğundan yeni nesil reaktörler olarak kabul edilmektedir [4.8].

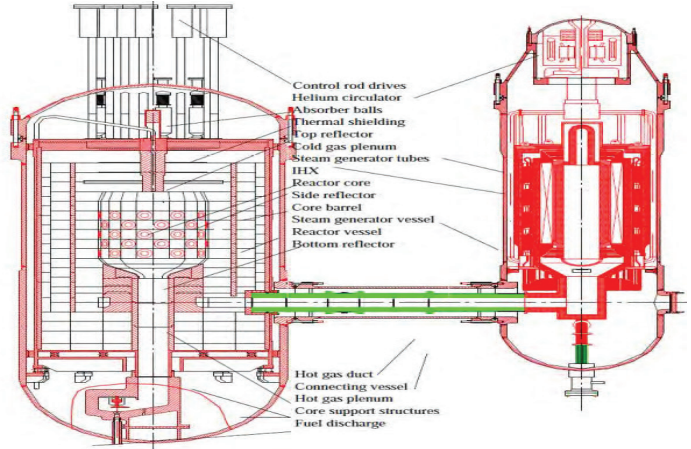
### Bu reaktör tasarımında;

- » HTGR'lerin tasarımı, yapımı ve işletilmesinde gerekli teknolojiyi keşfetmek,
- » İşinlama ve deney tesisleri kurmak,
- » Modüler HTGR sistemlerinin doğal güvenlik özelliklerini göstermek,
- » Elektrik, ısı ortak üretimi ve kapalı çevrim gaz türbini teknolojisini test etmek,
- » Nükleer süreç ısı uygulaması konusunda Ar-Ge çalışmaları amaçlanmıştır [4.8].

Bu tasarımın dönüm noktaları aşağıda özetlenmektedir.



| TEKNİK ÖZELLİKLER                |      |
|----------------------------------|------|
| Çekirdek hacmi (m <sup>3</sup> ) | 5    |
| Çekirdek yüksekliği (m)          | 1,97 |
| Çekirdek çapı (m)                | 1,8  |
| Besleme suyu sıcaklığı (°C)      | 104  |
| Türbin giriş sıcaklığı (°C)      | 435  |



Şekil 4.12: HTR-10 tasarımı [4.8]

Birincil basınç sınırı, reaktör basınç kabı, buhar üretici basınç kabı ve bu iki kabı birbirine bağlayan sıcak gaz kanalı basınç kabından oluşur. Bu tasarım bakımında kolaylık sağlar ve buhar üretici tüplerinin arızalanması durumunda reaktör çekirdeğine su girmesinden kaynaklanan kaza sonucunu azaltabilmektedir. Şekil 4.12’de HTR-10 tasarım görseli bulunmaktadır.

Küresel yakıt elemanlarını kullanmak üzere tasarlanan HTR-10 reaktör çekirdeği, bir çakıl-yatağı oluşturan yaklaşık 27,000 yakıt elemanı içerir. 6 cm çapında TRISO kaplı kürecikler, çok geçişli bir modelde reaktör çekirdeği boyunca hareket ederler. Yakıt zenginleştirilmesi %17 ve yakıt değişimi yanma oranı ortalama 80.000 MWd/tU olacak şekilde tasarlanmıştır. Reaktör çekirdeği tamamen grafit malzemelerden yapılmıştır, çekirdek bölgesinde hiçbir metal bileşen kullanılmamıştır.

Reaktör 700°C’de (potansiyel olarak 900°C) çalışır. Reaktör çekirdeğinin tepesinde helyum akışı tersine dönerek aşağıya doğru akışla çakıl-yatağına girer. Çakıl-yatağında ısınan helyum, bir sıcak gaz karıştırma odasına girer ve sıcak gaz kanalından geçerek ısı değiştiricisine gider.

Buhar üretici, tek geçişli, modüler sarmal boru tipindedir. Sıcak gaz kanalından gelen sıcak helyum, ısı aktarım tüplerinin etrafından akarak 700°C’den 250°C’ye soğur ve ısısını diğer çevrime aktarmış olur. Soğuk helyum reaktöre geri döner.

Helyum sirkülör, Tsinghua Üniversitesi ve Shanghai Blower Works Co., Ltd. tarafından tasarlanmış ve üretilmiştir ve yüksek sıcaklıkta helyum soğutmalı reaktörler için önemli bir bileşendir. Helyum sirkülörü, buhar üreticinin üzerine monteli olarak 3 MPa ve 250°C çalışma şartlarında, reaktör çekirdeğinden buhar üreticine termal enerji transferini sağlar.



Fisyon ürünlerinin çevreye salınmasının önünde üç engel vardır. Bunlar; TRISO kaplı yakıt küreciklerinin katmanlı yapısı, birincil çevrimin basınç sınırı ve muhafazalama (Confinement) katmanıdır. Herhangi bir kazada, yakıt elemanlarının maksimum sıcaklığı, sıcaklık limitini aşamaz ve önemli bir radyoaktivite salınımı böylece engellenebilir.

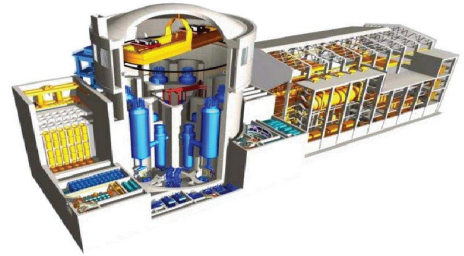
HTR-10 için iki işletme aşaması vardır. İlk aşamada, tesis 700°C çekirdek çıkış sıcaklığında ve 250°C çekirdek giriş sıcaklığında çalıştırılır. İkincil devre, bölgesel ısıtma özelliğine sahip elektrik üretimi için bir buhar türbini döngüsü içerir. Buhar üretici, standart bir türbin-jeneratör ünitesini beslemek için 440 °C sıcaklıkta ve 4 MPa basınçta buhar üretir.

İkinci aşamada (henüz uygulanmadı), HTR-10, 900°C'lik bir çekirdek çıkış sıcaklığı ve 300°C'lik bir giriş ile çalıştırılacaktır. Elektrik üretimi için bir kombine çevrim gaz ve buhar türbini ön tasarım aşamasındadır. 5 MWth güce sahip ara-ısı değiştiricisi (IHx), gaz türbini çevrimi için 850°C'lik yüksek sıcaklıkta nitrojen gazı sağlar. HTR-10 tesisi; reaktör binası, bir türbin/jeneratör binası, iki soğutma kulesi ve bir havalandırma merkezi ve bacadan oluşmaktadır ve görseli Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Bu binalar 100x130 m<sup>2</sup>'lik bir alan üzerine düzenlenmiş ve inşa edilmiştir.



Şekil 4.13: HTR-10 binası [4.8]

Reaktör ve buhar üreticini barındıran beton bölmeler ve birincil basınç sınırının diğer kısımları muhafaza gibi kullanıldığından HTR-10 tesisinde basınç sızdırmaz bir muhafaza sistemi yoktur. Atık yönetimi için ulusal yasalar uygulanmaktadır [4.8].



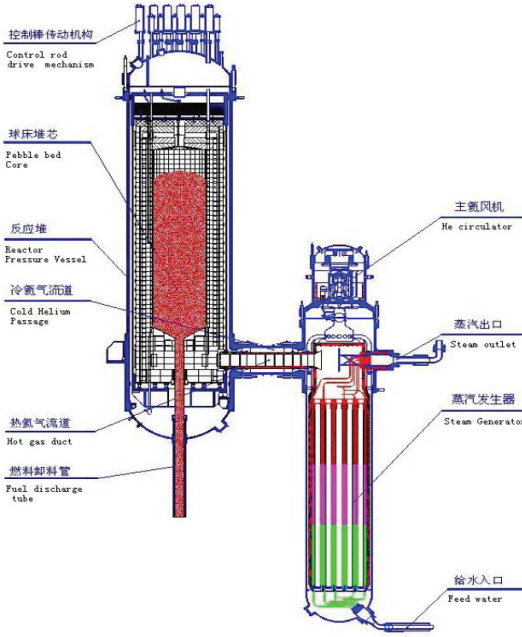
Şekil 4.14: HTR-PM 600 Tasarımı [4.8]

Çin, HTR teknolojisini bir adım öne götürerek 2001 yılında HTR-PM tasarımını geliştirmiştir [4.8]. HTR-10 tasarımından esinlenilerek tasarlanan HTR-PM, elektrik üretimi için kullanılacak ticari bir tanıtım santralidir.

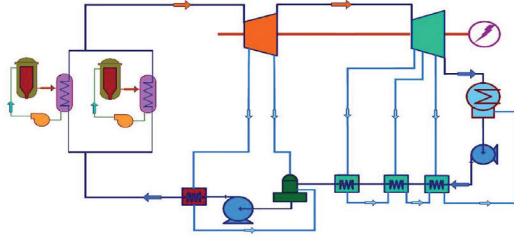
200, 600 veya 1000 MWe gibi tek bir buhar türbinine bağlanan çoklu standartlaşmış reaktör modüllerine sahip üniteler öngörülmektedir.



Şekil 4.15: HTR-PM nükleer santrali inşaatı [4.20]



**Şekil 4.16:** HTR-PM birincil çevrimi [4.21]



**Şekil 4.17:** HTR-PM santralının basit akış şeması [4.21]

kanalı basınç kabını (HDPV) bulundurmaktadır. Reaktör çekirdek girişi ve çıkışındaki helyum sıcaklıkları sırasıyla 250, 750°C ve buhar türbini girişinde buhar parametreleri 13,25 MPa/567°C şeklindeki tasarımın akış şeması Şekil 4.17’de görülmektedir. Birincil helyum soğutucusu, 96 kg/s nominal kütle akış hızıyla 7,0 MPa’da çalışır. Genel çalışma prensibi HTR-10 ile benzerlik gösterir.

Yakıt elemanları küreseldir ve zenginleştirme U-235’in %8.5’i kadardır. Yaklaşık 0,5 mm çapındaki uranyum çekirdekleri (Kernel), üç kat piro-karbon (Pyro-carbon) ve bir kat silikon-karbon ile kaplanmıştır. TRISO yakıt elemanı görseli Şekil 4.18’de verilmiştir.

Reaktörün iki bağımsız kapatma sistemi vardır. Bunların her ikisi de grafitten yapılmış yan reflektörün deliklerine yerleştirilmiş bir kontrol çubuğu sistemi ve küçük bir soğurucu küre (SAS) sistemidir.

Bir buhar türbinine bağlanan altı reaktör modülünden oluşan 600MWe çok modüllü bir santral için tamamlanan tasarım Şekil 4.14’de görülmektedir [4.8].

HTR-PM tanıtım amaçlı santralının ilk betonu, Şekil 4.15’de görüleceği üzere, 9 Aralık 2012’de Shandong Eyaleti, Rongcheng’de atılmıştır. Nükleer ada binalarının inşaat işleri 2016’da tamamlanmıştır [4.8]. Çin, Shandong eyaletindeki Shidao-owan’daki tanıtım amaçlı HTR-PM tesisindeki bir numaralı reaktörün ilk kritikliğe 12 Eylül 2021 tarihinde ulaştığı duyurulmuştur.

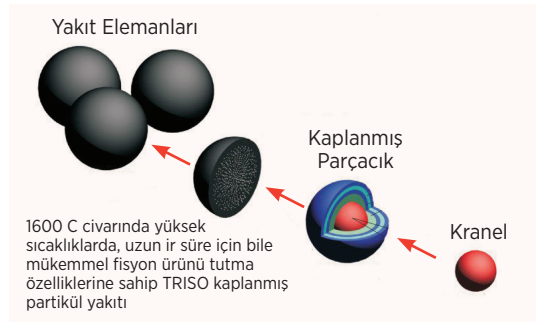
HTR-PM, 210 MWe’lik bir buhar türbini ile birleştirilmiş termal gücü 250 MWth olan iki çakıl yataklı reaktör modülünden oluşur. Her bir reaktör modülü, Şekil 4.16’da görüldüğü üzere, reaktör iç kısımlarında grafit, karbon ve metal malzemeler kullanılmış bir reaktör basınç kabı (RPV), bir buhar üretici ve ana helyum üfleyici sıcak gaz

HTR-PM'nin çalışma modu, sürekli yakıt yükleme ve boşaltmayı gerektirir. Yakıt elemanları, merkezi yakıt yükleme borusundan reaktör çekirdeğine düşer ve çekirdeğin tabanındaki bir yakıt çıkarma borusundan da boşaltılır.

Bozunma ısısı, tasarlanmış herhangi bir kaza koşulunda, ısı iletimi veya ısı radyasyonu gibi doğal mekanizmalar tarafından çekirdekten pasif olarak uzaklaştırılır ve bu mekanizmalar sayesinde TRISO kaplanmış yakıt küreciklerinin silisyum karbür (SiC) tabakası içindeki fisyon ürünlerinin neredeyse tamamını içerecek şekilde maksimum yakıt sıcaklığını 1620°C'nin altında tutar. Buhar üreticinin ısı transfer borularında büyük bir sızıntı veya çatlak olduğunda, birincil devreye su giriş miktarını en aza indirmek için bir boşaltma sistemi tasarlanmıştır. Tasarım, oluşan kazaların etkisini azaltmak için ALARA prensibine uygun olarak tasarlanmıştır [4.8].

Nükleer ada; bir reaktör binası, nükleer yardımcı bina, kullanılmış yakıt depolama binası ve I&C binalarını içermektedir.

HTR-PM şu anda açık bir yakıt döngüsünü benimsemektedir. Kullanılmış yakıt elemanlarının ara depolanmasından sonra, jeolojik nihai depolama açık çevrimde gerçekleştirilebilir. Kapalı çevrimde, kullanılmış yakıt elemanları sökülebilecek ve nükleer yakıt yeniden işleme tesislerinde işlenebilecektir [4.8]. Ön güvenlik analizi raporu (PSAR), 2008-2009 yılları arasında lisans yetkilileri tarafından gözden geçirilmiştir. Aralık 2012'de Yapı Ruhsatı alınmıştır. Son güvenlik analizi raporunun (FSAR) nihai onayının yakında alınması beklenmektedir. 2021 yılı içerisinde de ticari işletmeye alınması beklenmektedir.



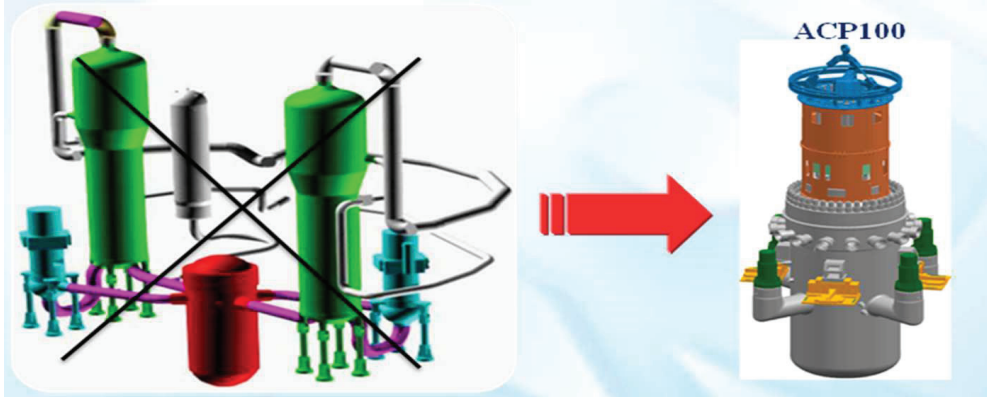
Şekil 4.18: TRISO yakıt [4.8]

## ACP100

Çin Ulusal Nükleer Şirketi (CNNC) tarafından 125 MWe elektrik üretmek üzere kaza olaylarına karşı çalışması doğrulanmış pasif güvenlik sistemlerini benimseyen mevcut PWR teknolojisine göre geliştirilen entegre bir PWR tasarımıdır. ACP100, elektrik üretimi, ısıtma, buhar üretimi veya deniz suyunun tuzdan arındırılması gibi amaçlar için tasarlanmış bir reaktördür [4.8]. ACP100, tasarımın basitleştirilmesini ve pasif güvenlik sistemleri aracılığıyla güvenliğin artırılmasını gerçekleştiren bir tasarımıdır. Çin'in Hainan Eyaletinde 385 MWth güce sahip, tek üniteli bir endüstriyel tanıtım tesisi planlanmaktadır [4.8]. Doğal taşınım ile soğutulan ACP100 entegre tasarımında ana birincil devre bileşenleri, Şekil 4.19'de görüldüğü üzere reaktör basınç kabı (RPV) içine kurulmuştur [4.8]. Entegre nükleer buhar besleme sistem (NSSS) tasarımı, reaktör çekirdeğinden ve 16 adet buhar üreticiden (OTSGs) oluşur.

Dört ana pompa, nozuldan (ağızlık) nozula ve RPV'ye monte edilmiştir. Toplam uzunluğu 2,15m olan ACP100 çekirdeğinin 57 yakıt grubu (FA), kare 17x17 konfigürasyonuna sahiptir. Yakıtta U-235 zenginleştirilmesi yaklaşık %1,9-4,95'tir. Normal şartlarda reaktör, 24 aylık bir yakıt döngüsüne sahiptir.

Reaktivite, kontrol çubukları, yanabilir nötron zehri ve birincil soğutucuda çözünen çözünür boron aracılığıyla kontrol edilir. Manyetik kuvvet tipi kontrol çubuğu tahrik mekanizmasına (CRDM) sahip 20 kontrol çubuğu vardır.



Şekil 4.19: ACP100 Tasarımı [4.8]

ACP100 birincil soğutma mekanizması, normal çalışma koşulları ve kapatma koşulları altında cebri dolaşım ile yapılır. RCS, varsayılan tüm normal olmayan koşullar sırasında ve sonrasında ve tüm işletme durumlar altında reaktör çekirdeğinin yeterli soğumasını sağlamak için tasarlanmıştır. RCS'nin bu entegre tasarımı, varsayılan küçük çaplı LOCA akış alanını önemli ölçüde azaltır.

ACP100'ün basınçlandırıcısı, yarım küre üst ve alt başlıklı dikey, silindirik bir kap şeklindedir ve reaktör kabının dışında yer alır [4.8].

**NSSS'nin I&C sistemlerinin içeriğinde aşağıdaki sistemler vardır;**

- » **Reaktör nükleer enstrümantasyon sistemi,**
- » **RPS**
- » **Çeşitlendirilmiş devreye girme sistemi,**
- » **Reaktör kontrol sistemi,**
- » **Çubuk kontrolü ve çubuk konumu izleme sistemi,**
- » **Reaktör çekirdek içi enstrümantasyon sistemi,**
- » **Gevşek parçaları ve titreşimi izleme sistemi**
- » **Diğer süreç kontrol sistemleri.**

Acil durum soğutucusu, muhafaza içindeki yakıt ikmal suyu depolama tankında (In-containment Refueling Water Storage Tank (IRWST)) konumlandırılmıştır. Bozunma ısısı, doğal sirkülasyon ile çekirdekten uzaklaştırmaktadır. Şekil 4.20'de ACP100 proje görseli paylaşılmaktadır.



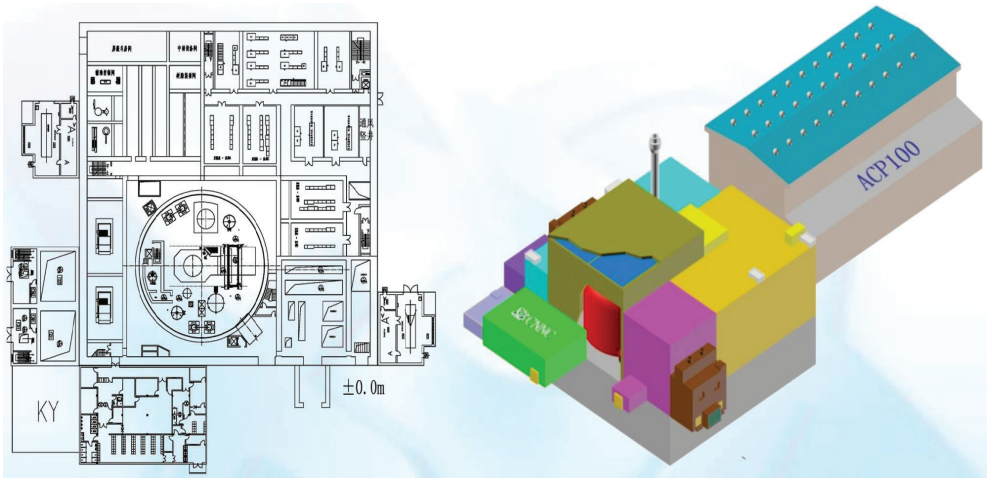
Şekil 4.20: ACP100 Projesi [4.22]

ACP100 muhafazası; RCS'i, pasif güvenlik sistemlerini ve yardımcı sistemleri içerisinde barındırır. ACP100, sürücü sinyaline ihtiyaç duymadan hava ile soğutulan küçük bir çelik muhafaza kullanır.

ACP100 için tasarlanan ölçü ve kontrol sistemi, derinlemesine savunma kavramı, tek arıza kriterine (Single Failure Criterion) uygunluk ve çeşitlilik üzerine kuruludur.

Kullanılmış yakıt havuzlarında geçici olarak depolanırlar. Atık yönetimi yaklaşımı ve bertaraf planı diğer nükleer santraller ile benzer yöntemleri içerir [4.8].

ACP100 mühendislik temel tasarımı tamamlanmak üzeredir ve bir ön güvenlik değerlendirme raporu (PSAR) tamamlanmıştır. Pasif acil durum çekirdek soğutma sistemi, kontrol çubuğu tahrik sistemi ve kritik ısı akışı test edilmiştir. Changjiang nükleer enerji tesisi (Hainan, Çin), Şekil 4.21'de gösterildiği gibi, türünün ilk örneği (FOAK) ACP100 tanıtım projesini inşa etmek için seçilmiştir [4.22].

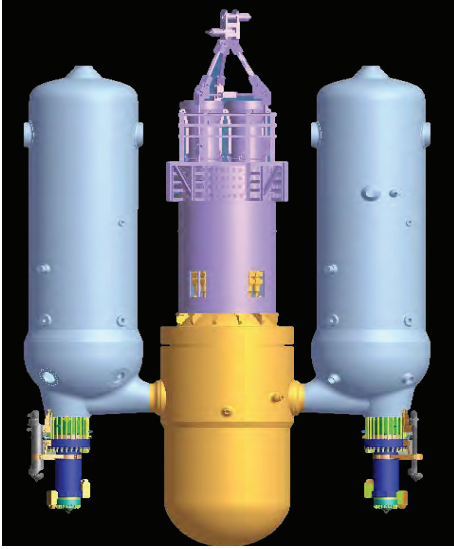


Şekil 4.21: Changjiang'da bulunan ACP100 projesinden görseller [4.23]



## CAP200

Çin Gelişmiş-Pasif, basınçlı su reaktörü 200MWe (CAP200), Şanghay Nükleer Mühendislik Araştırma ve Tasarım Enstitüsü (SNERDI) tarafından başlatılan pasif güvenlik özelliklerini benimseyen PWR'lerin seri araştırma ve geliştirme ürünlerinden birisidir. CAP200'ün tasarımı, PWR Ar-Ge'sinde 45 yıldan fazla deneyime ve halen Çin'de devam eden PWR inşaatı ve güvenli operasyonda 20 yılı aşkın deneyimlere dayanmaktadır. Dünyanın ilk AP1000 ünitesi ve CAP1400'ün Ar-Ge'sinin birikmiş deneyiminin bir sonucu olarak bu tasarım geliştirilmiştir. Ayrıca, Fukushima nükleer kazasından alınan derslere dayalı olarak güvenlik geliştirme tedbirlerini benimsemiştir.



Şekil 4.22: CAP200'ün reaktör yapısı [4.8]

Büyük PWR'lerle karşılaştırıldığında, CAP200'ün daha yüksek oranda doğal güvenlik önlemleri, daha düşük radyoaktivite salınımı sıklığı, kaza sonrası daha uzun süre operatör müdahalesi gerektirmemesi, daha küçük çevresel etki, daha düşük saha kısıtlamaları, daha kısa inşaat süresi ve daha küçük finansman ölçeği ve finansal risk içerir.

CAP200, nükleer kojenerasyon ve kentsel alanlardaki eski fosil yakıtlı enerji santrallerinin değiştirilmesi gibi çoklu uygulamalar için tasarlanmıştır [4.8].

2014 yılında başlatılan konsept tasarımı, 2015 yılında tamamlanmıştır. 2018 yılından itibaren Şekil 4.22'de görüldüğü üzere CAP200'ün reaktör sistemi konfigürasyonu konusunda kavramsal tasarımı daha detaylı olarak devam etmektedir [4.8].

CAP200, geliştirilmiş güvenlik önlemleri içeren, esnek ve çevre dostu olarak tasarlanmış ve aynı zamanda ekonomik açıdan diğer SMR'lerle karşılaştırılabilir nitelikte olan küçük bir PWR tasarımıdır.

### Bu reaktörün ana özellikleri aşağıda listelenmiştir;

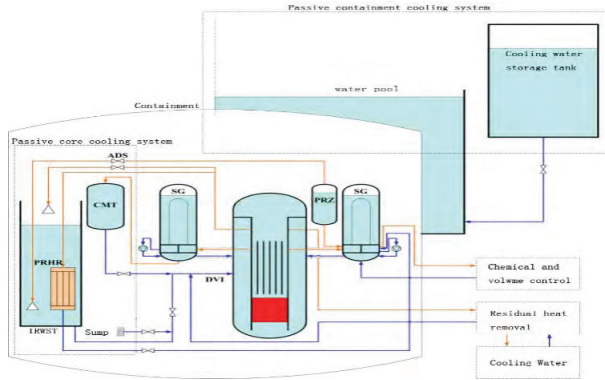
- » **Kompakt birincil sistem:** Buhar üreticileri doğrudan CAP200 reaktör basınç kabına bağlanır ve ana borular ortadan kalkar. Sistemin ve bileşenlerin kompakt yerleşimi sayesinde, daha düşük olasılıklı soğutma sıvısı kaybı kazaları ve daha küçük birincil sistem ayak izi ile sonuçlanır.
- » **Modüler tasarım ve imalat:** Ana modüller fabrikada üretilebilir ve kurulum için sahaya taşınabilir. Yüksek modüler yapı nedeniyle inşaat süresi kısaltılabilir.
- » **Yedekli ve çeşitli güvenlik özellikleri:** Reaktör çekirdeğinin güvenliğini ve büyük radyoaktivite salınımı riskinin son derece düşük olmasını sağlayan yedekli ve çeşitli, aktif ve pasif güvenlik özellikleri devreye alınacaktır.



CAP200, sistemlerin çalışması için doğal sirkülasyon, yerçekimi ve basınçlı hava gibi doğal kuvvetlerden yararlanan pasif güvenlik sistemlerini kullanır. Bunlar tasarım için basitlik, güvenlik, işletme ve bakım, kullanılabilirlik ve yatırımda iyileştirmeler sunar.

**Başlıca üç güvenlik sistemi Şekil 4.23’de temsili olarak görüldüğü üzere;**

- » Hidrojen kontrol sistemi
- » Pasif çekirdek soğutma sistemi
- » Pasif muhafaza soğutma sistemidir.



**Şekil 4.23:** CAP200'ün güvenlik sistemleri [4.8]

CAP200'ün reaktör basınç kabı, CAP1400'ünki referans alınarak tasarlanmıştır. Aradaki fark, RPV'nin giriş ve çıkışındadır. Çekirdek, bir kaza durumunda yeniden su ile doldurulma süresini (Re-flood Time) hızlandırmak için kapta mümkün olduğunca alçak konumlandırılmıştır. CAP200'ün buhar üretici, 3861 tane tüp içeren dikey bir U-tipi üreticidir ve nikel-krom demir alaşımından yapılmıştır.

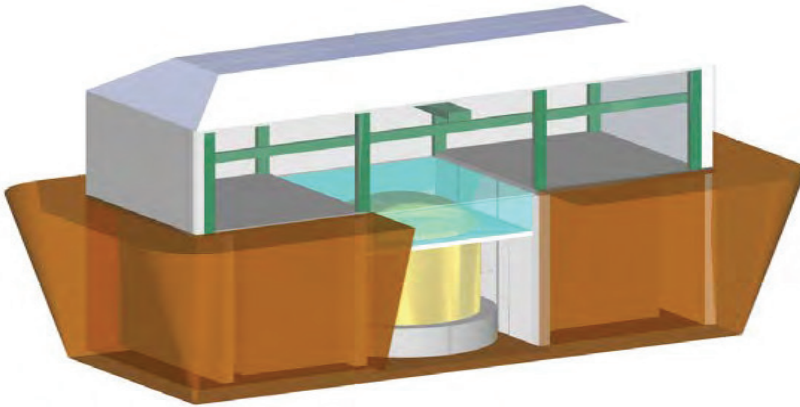
Buhar üretici buhar çıkış tasarım değeri 6,06 MPa ve boru tıkalı olmadan termal tasarım akış hızı için 183,6 kg/s'dir. CAP200'ün basınçlandırıcısı, yarı küresel üst ve alt başlıklı, dikey olarak monte edilmiş silindirik olmak üzere altta elektrikli ısıtıcı ve üstte spreyci bulunan tipik bir buhar tipi basınçlandırıcıdır. Reaktör soğutucu pompası, 289°C soğuk ayak sıcaklığında, 12000 m<sup>3</sup>/saat tasarım akış hızında ve 65 m yüksekliğe pompalama yapacak şekilde tasarlanmıştır. Reaktör soğutucu pompa mil contası olmadığından conta arızası kaynaklı LOCA ihtimali bulunmaz [4.8].

I&C sistemi, tesis sistemlerini izleme, kontrol etme ve çalıştırma yeteneği sunar.

**Elektrik güç sistemi, derinlemesine savunma gereksinimini karşılamak için üç seviyeye sahiptir.**

- 1 **Ana jeneratör ve saha dışı güç kaynakları tarafından sağlanan tesis işletim yükü için AC güç kaynağıdır.**
- 2 **Kalıcı güvenlik dışı yükler için AC dağıtım sistemi ve Sınıf 1E olmayan DC ve UPS sistemidir.**
- 3 **Tasarım esaslı kaza sırasında acil durumda reaktör kapatılması, muhafazanın izolasyonu ve diğer temel işlevler için gerekli güvenlikle ilgili yükleri sağlamak için kullanılan Sınıf 1E DC ve UPS sistemidir.**

CAP200'ün genel düzeni, Şekil 4.24'de görülmektedir. Reaktör binası, çeşitli jeolojik koşullara uygun olan yeraltına yerleştirilmiştir. Çoğu potansiyel alan ve adanın site koşullarına uyum sağlayabilir. Nükleer adanın boyutu hem sistemin basitleştirilmesi hem de pasif tasarımın benimsenmesiyle küçültülmüştür. Kompakt RCS tasarımı, özellikle ana boruları ortadan kaldırır ve reaktör binasının daha küçük olmasını sağlar. Büyük kapasiteli ekipmanların kullanılması, farklı sistemler için tek ekipmanın ortak kullanımı gibi yöntemlerle sistem bileşenlerinin sayısı azaltılmıştır. Örneğin, reaktör hizmet vincini (Polar Crane) hem reaktör binası hem de yardımcı bina vb. için kullanmak üzere gezer bir vinçle değiştirilmesidir.



**Şekil 4.24:** CAP200'ün yapısal yerleşimi [4.8]

#### 4.4. FRANSA

Nükleer santraller alanında Fransa, nükleer santrallardan elektrik üretim kapasitesiyle örnek verilen ülkeler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Fransa elektriğinin yaklaşık %70'ini nükleer enerjiden elde etmektedir. Ayrıca Fransa'nın elektriğinin yaklaşık %17'si geri dönüştürülmüş nükleer yakıttan gelmektedir. Fransa'nın elektrik tedarik sistemindeki nükleer gücü, 61370 MWe ile 56 adet reaktör işletme halindedir. 1630 MWe kapasiteli bir adet reaktör ise halen inşaatı devam etmektedir. 5549 MWe kapasiteli olmak üzere 14 adet reaktörü ise kapatılmış durumdadır [4.24].

Fransa, Kasım 2018'de enerji politikasını revize etmiştir ve 2050'de karbon kullanımını sıfıra indirme stratejisini kamuoyuna açıklamıştır. Bu stratejiler arasında, kalan fosil yakıtlı santrallerinin kapatılması, bazı mevcut reaktörlerin ömürlerinin uzatılması ve yenilenebilir enerji çözümleri geliştirilmesi yer almaktadır. Nükleer, 2035 enerji karışımı politikasında %50 pay ile Fransız enerji stratejisinin bel kemiği olmaya devam etmesi ve kalan yarısının yenilenebilir enerji kaynaklarından gelmesi öngörülmektedir. 2035'ten sonra nükleere güvenebilmek ve uygulanabilir bir seçenek olarak tutabilmek için, Fransız hükümeti, nükleer endüstri ile olası bir yeni nükleer santral inşaa programı için 2021 yılı ortasına kadar bir plan hazırlamak üzere çalışma yapılacağını duyurmuştur.

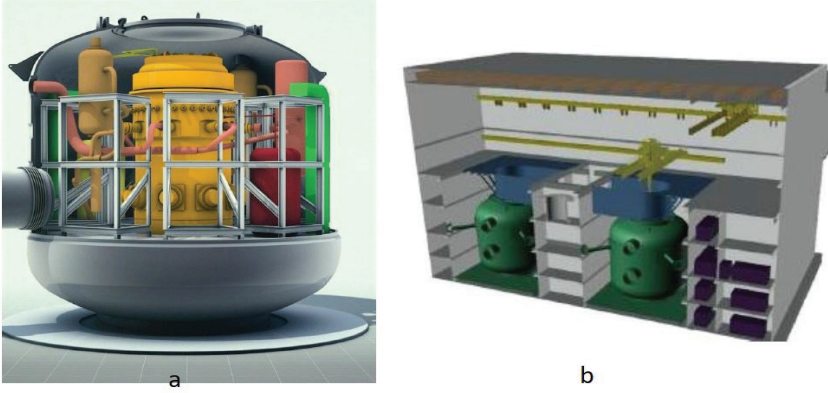
Küçük Modüler Reaktörler (SMR) birçok ülkede olduğu gibi Fransa'da da geliştirilme aşamasındadır ve lisans alma evresinden uzaktadır. Hali hazırda iki tasarım ön plana çıkmaktadır ve Tablo 4.7'de genel tasarım özellikleri gösterilmektedir. Bu iki tasarım aşağıda açıklanmıştır.

**Tablo 4.7:** Fransa'da yürütülen küçük modüler reaktör tasarımları [4.19]

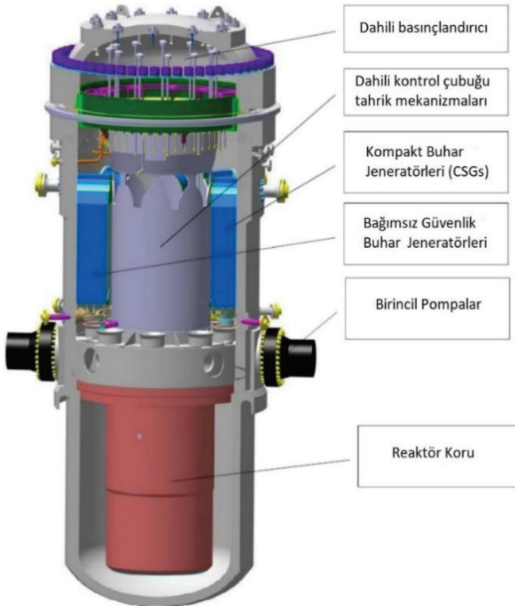
| TASARIM İSMİ | TAM İSMİ                                                     | DİZAYN SAHİBİ                                                 | SOĞUTUCU TÜRÜ | YAVAŞLATICI | DİZAYN DURUMU                          | REAKTÖR TİPİ |
|--------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------|-------------|----------------------------------------|--------------|
| NUWARD       | NUWARD                                                       | CEA-EDF-Naval Group-Technicatome                              | Hafif Su      | Hafif Su    | Kavramsal Tasarım                      | PWR          |
| ASTRID       | Endüstriyel Tanıtım için Gelişmiş Sodyum Teknolojili Reaktör | CEA (Fransız Alternatif Enerjiler ve Atom Enerjisi Komisyonu) | Sodyum        | Yok         | Tasarım aşamındaki proje iptal edilmiş | SFR          |

## NUWARD

NUWARD, hafif sulu basınçlı su reaktörü tipinde, iki bağımsız reaktör modülünden modül başına 170 MWe olacak şekilde toplam 340MWe net elektrik gücü üretmek üzere III + Nesil SMR olarak tasarlanmıştır. Her bir modül, Şekil 4.25'de görüldüğü üzere bir reaktörden ve çelik bir muhafaza kabının içine yerleştirilmiş özel nükleer buhar besleme sisteminden (NSSS) oluşmaktadır. NUWARD kavramsal tasarım aşamasında olup lisanslama faaliyetleri için iç değerlendirme yapılmaktadır [4.8].



**Şekil 4.25: (a) Çelik muhafaza kabı içindeki NUWARD reaktörü, (b) 340 MWe üretmek için NUWARD tasarımının ikiz modül konfigürasyonu [4.25]**



**Şekil 4.26: Basitleştirilmiş reaktör kesiti [4.25].**

Bu tasarımın geliştirilmesi dört şirketten oluşan bir konsorsiyum (CEA, EDF, Naval Group ve TechnicAtome) tarafından özel bir şirket olarak yönetilmektedir. CEA, Fransız hükümeti tarafından finanse edilen bir teknolojik araştırma kuruluşudur. EDF, büyük oranda Fransız devletine ait olan çok uluslu elektrik dağıtım şirkettir. Naval Group, deniz temelli savunma platformları ve denizcilikle ilgili yenilenebilir enerji konusunda uzmanlaşmış bir Fransız savunma yüklenicisi ve küresel endüstriyel bir şirkettir. TechnicAtome hissedarları Fransız Devlet Katılım Ajansı'na ait olan yan kuruluşu Areva

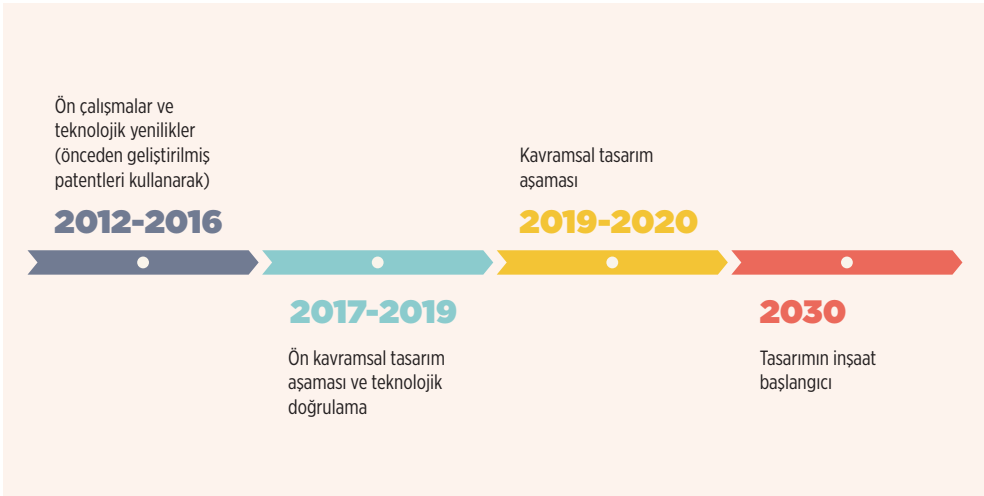
TA, CEA, Naval Group ve EDF olan ilk basınçlı su reaktörünün tasarımı, yapımı ve işletilmesiyle ünlü Fransız yan kuruluşudur.

NUWARD, tek bir reaktör basınç kabı (RPV) içerisinde kontrol çubuğu tahrik mekanizması, buhar üretici ve basınçlandırıcı bulundurmasıyla tam entegre bir PWR reaktörüdür ve kesiti Şekil 4.26'da gösterilmektedir.

NUWARD reaktör basınç kap boyutu, ortalama 900 MWe olan PWR tankına benzer şekilde seçilmiştir.

NUWARD reaktör soğutma sisteminin tasarımında altı adet kompakt buhar üretici bulunmaktadır. Basınçlandırıcısı da RPV ile birleştirilmiştir.

Tasarımın 2030 yılında inşası öngörülmektedir ve dönüm noktaları aşağıda sıralanmıştır:



Reaktör korunun referans tasarımı, daha önce PWR'da kullanılmış 17x17 yakıt demeti, kısaltılmış çekirdek yüksekliği ve  $UO_2$  çubuklarına (zenginleştirme <5 wt% U-235) dayanmaktadır. Boron içermeyen tasarımı sayesinde çeşitli U-235 zenginleştirmeleri ve yanabilir zehirler (Burnable Poisons) kullanılmaktadır. Referans yakıt değişim aralığı 24 aydır. Reaktivite, kontrol çubukları ve yanabilir katı zehir (Solid Burnable Poison) ile kontrol edilir.

Altı adet sızdırmaz pompa (Canned Pumps), RPV'na yatay olarak monte edilmiştir. RPV'nın alt kısmına bağlı olan hidrolik bileşenler, kora girmeden önce reaktör soğutma sıvısı akışının ve sıcaklığını ideal olarak karışması için tasarlanmıştır [4.8].

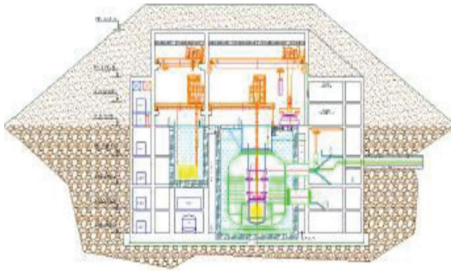
NUWARD, baz yük ve yük takibi sistemi mevcuttur. En az bir reaktörü çalışır durumda ve şebekeyi beslerken, diğeri duruşta olabilir [4.8].

**NUWARD reaktörü ve ilgili güvenlik sistemleri aşağıda belirtilen hedefler için tasarlanmıştır:**

- » Tüm Tasarım Temelleri Koşullarının (DBC) DBC senaryolarının 3 günden fazla süreyle herhangi bir operatör müdahalesi, herhangi bir harici nihai ısı emici kaynağı, herhangi bir boron enjeksiyonu veya herhangi bir harici elektrik güç kaynağı (normal ve acil durum) gerektirmeksizin pasif yönetimi.
- » Basit teşhisin ve çeşitlendirilmiş sistemlerin uygulanmasıyla DEC-A kazalarının aktif yönetimi.
- » Koryumun (Corium) basınç kabında tutulmasıyla DEC-B kazalarının pasif yönetimi (IVR konsepti).

**NUWARD tasarımının kendisinde doğal olarak varolan aşağıdaki özelliklerinden yararlanır:**

- » Güç geçişlerine karşı atalet sağlayan kg/MW(t) cinsinden büyük reaktör soğutma suyu
- » Boronsuz çalışma, büyük ve sabit yavaşlatıcı karşı reaksiyonu (Moderator Counter-Reaction) sağlar ve boronun seyrelmesini önler.
- » Entegre RCS mimarisi, maksimum LOCA kırılma boyutunu azaltır ve böylece tasarım temelli LOCA ile başa çıkmak için daha fazla zaman sağlar.
- » Çubuk fırlatma kazalarını önleyen dahili CRDM'nın kullanılması.
- » Birkaç gün boyunca pasif soğutma sağlayan metalik su altı muhafaza kullanımı.
- » Tasarım kazaları için basınç kabı içinde çekirdek tutma özelliği.



**Şekil 4.27:** Nuward tipik nükleer ada kesiti [4.25].



**Şekil 4.28:** NUWARD Tesis düzeni [4.8].

Yarı yeraltına uyarlanmış hem modül hem de depolama havuzları için büyük su ataletinin mevcudiyetini gösteren tipik nükleer ada kesiti Şekil 4.27'de görülmektedir.

NUWARD, 6 normal buhar üreticiden (CSG) bağımsız iki adet pasif ısı giderme sistemine sahiptir. Kritiklik risklerini önlemek için güvenlik özellikleri içerir. En verimli soğurucu/yutucu (Absorber) üst konumda sıkışmış olsa bile, çekirdek 20°C'de saf su ile kritik altı olması kaza sonrası koşullarda bile kritiklik kazalarının meydana gelmesini önlemektedir. LOCA durumunda, 2 yedekli düşük basınçlı güvenlik enjeksiyon akümülatörü seti, reaktör soğutma suyuna destek sağlamaktadır.



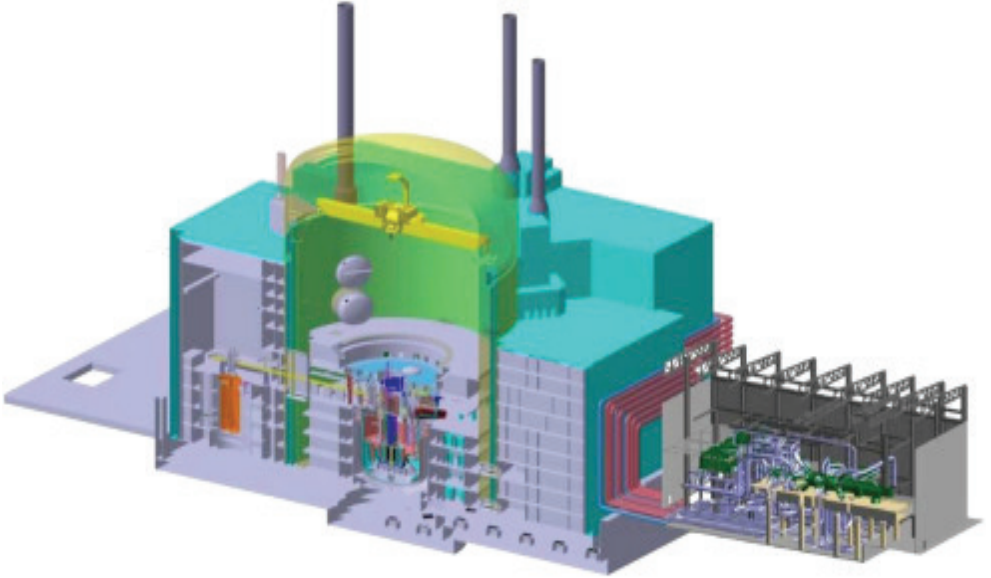
NUWARD, bir su duvarına batırılmış 3. bariyer olarak çelik bir muhafaza kullanır.

Ömür boyu kapasite faktörü, 24 ayda bir 15 gün büyük planlı yakıt değişimi çerçevesinde %90'dır. Tesis, 10 yıllık çalışma için (20 yıllık işletme de seçenekler arasında) kullanılmış yakıt depolama kapasitesine sahiptir [4.8]. Enstrümantasyon ve kontrol (I&C) sistemi, derinlemesine savunma konseptine, tek hata kriterine uygunluğa ve çeşitliliğe dayanmaktadır [4.8]. NUWARD tesisleri açık çevrim geleneksel kondenser soğutması ile nehir/deniz kıyısı sahalara uygunluğunun yanı sıra kuru hava soğutmalı bir iç sahada da konuşlandırılabilir. Nuward için geliştirilen tesis düzeni Şekil 4.28'da gösterilmektedir.

NUWARD'ın çekirdeği, PWR'larda kullanımda olan kabul görmüş 17x17  $UO_2$  yakıt demetinden esinlenilerek tasarlanmıştır. Referans yakıt ikmali, her 2 yılda bir şeklindedir [4.8]. Atık yönetimi ise, en iyi endüstri uygulamalara dayanılarak değerlendirilmektedir [4.25].

### **ASTRID**

CEA, 2010 yılında endüstriyel ortaklarla birlikte sodyum soğutmalı hızlı reaktörün (Sodium-Cooled Fast Reactor) kavramsal tasarımını başlatmıştır. Bu proje, "Endüstriyel Tanıtım için Gelişmiş Sodyum Teknolojik Reaktör" anlamına gelen ASTRID olarak adlandırılmıştır ve temsili tasarımı Şekil 4.29'da gösterilmektedir [4.26]. ASTRID'in genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır:



**Şekil 4.29:** ASTRID'in şematik görünümü [4.26]

Birincil ve ikincil devreler için ön-kavramsal tasarım aşamasında bazı seçimler yapılmıştır. Örneğin, havuz tipi, konik “redan” (iç hazne) reaktör seçimi ile uzatılmış ISIR erişimine izin verilmesi.

Reaktör bloğu açısından, dört ara ısı eşanjörü (Intermediate Heat Exchangers) ile birlikte üç ana pompa kullanılmıştır. Bu sodyum döngüsü, modüler buhar üreteçleri veya sodyum gaz sistemi ve kimyasal hacim kontrol sistemi (Chemical Volume Control System) içerir [4.8]. Çekirdeğin erimesi durumuna karşı derinlemesine savunma amacıyla bir çekirdek tutucu (Core catcher) eklenmiştir. Muhafaza, bir kaza durumunda bir çekirdek kazası veya büyük sodyum yangınlarının neden olabileceği mekanik enerjinin salınımına direnecek şekilde tasarlanmaktadır [4.8].

Ön kavramsal tasarım aşaması Ekim 2010’da başlatılmıştır. Ön kavramsal tasarım aşaması, referans tasarımı seçmek için açık seçenekleri analiz etmeyi amaçlamaktadır. Daha sonra kavramsal tasarım ve temel tasarım aşamaları mevcuttur. 6 yıllık kavramsal tasarım aşamasının ardından, 4 yıllık temel tasarım aşaması olan Fransız ASTRID projesi 2016 yılının başında başlamıştır. 2018 yılında özel bir çalışma grubu, maliyet yönetimi, çalıştırılma, güvenlik ve ticari bir güç reaktöründe mevcut verilerle olasılıkları tahmin etme amacına ulaşıldığından emin olmak için bir değerlendirme gerçekleştirmiştir [4.27]. Ağustos 2019’da Fransa, ASTRID projesini ve genel olarak sodyum üretken reaktör (Sodium- Breeder Reactor) çalışmalarını iptal etmiştir [4.28]. ASTRID küçük modüler reaktör temel özellikleri Tablo 4.8’de verilmektedir.

**Tablo 4.8:** Fransa’da yürütülen ASTRID küçük modüler reaktör temel özellikleri [4.8].

| ASTRID’in anlamı                 | Endüstriyel Tanıtım için Gelişmiş Sodyum Teknolojik Reaktörü                                                                                                  |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tasarımcı                        | CEA endüstriyel ortaklarıyla: EDF, AREVA NP (Günümüzde Framatome), ALSTOM, BOUYGUES, COMEX NUCLEAIRE, TOSHIBA, JACOBS, ROLLS-ROYCE ve ASTRIUM                 |
| Reaktör Tipi                     | Havuz türü                                                                                                                                                    |
| Elektrik kapasitesi              | 600 MWe                                                                                                                                                       |
| Termal kapasitesi                | 1500 MWth                                                                                                                                                     |
| Soğutucu                         | Sodyum                                                                                                                                                        |
| Birincil Dolaşım                 | Cebri                                                                                                                                                         |
| Sistem Sıcaklığı                 | 475 ° C                                                                                                                                                       |
| Yakıt Malzemesi                  | MOX                                                                                                                                                           |
| Yakıt Döngüsü                    | 4 x 360 EFPD                                                                                                                                                  |
| Emniyet kademelerinin sayısı     | 3 dizi (Trains)                                                                                                                                               |
| Acil durum güvenlik sistemleri   | Hibrit                                                                                                                                                        |
| Bozunma ısısı giderme sistemleri | Hibrit                                                                                                                                                        |
| Tasarım ömrü                     | 60 yıl                                                                                                                                                        |
| Tasarım son durumu               | Proje iptal edilmiştir.                                                                                                                                       |
| Yeni / Ayırt Edici Özellikler    | ASTRID, sodyum-hızlı reaktörler üzerinde AR&GE çalışmaları yapmak ve küçük aktinidlerin dönüşümünün fizibilitesini göstermek için tasarlanması planlanmıştır. |

## 4.5. GÜNEY KORE

Güney Kore’de nükleer ile ilgili faaliyetler, ülkenin 1957 yılında Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı’na üye olmasıyla başlamıştır. 1970’lerden itibaren sanayileşme politikalarına paralel olarak yoğun bir nükleer enerji politikası yürüterek, kısa zamanda tasarım, üretim, inşaat, işletme, bakım, yakıt üretimi ve güvenlik gibi konularda kendini geliştirmiştir.

Nükleer enerjiyi ulusal enerji politikasının bir parçası haline getirerek yerileştirme sürecinde başarı sağlamıştır. Geline nokta da %95 oranında nükleer santral tasarımı ve ekipmanı yapar hale gelmiştir. Halen işletmede olan 24 adet reaktörü bulunmaktadır. Nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı yaklaşık 23,23 GW(e) kapasite ile %26 oranındadır.

### Ülkedeki nükleer ile ilgili devlet kurumları ve sorumlulukları aşağıdaki gibidir;

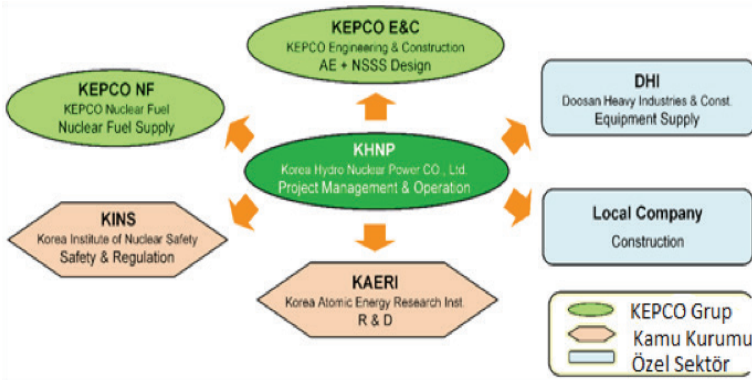
- » MSIP (Bilim, Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Stratejik Planlama Bakanlığı); nükleer araştırma-geliştirme ve nükleer alanda işbirliği faaliyetlerinden sorumludur.
- » MOTIE (Ticaret, Sanayi ve Enerji Bakanlığı) nükleer santrallarının inşası ve işletmesinden, nükleer yakıt ve atık yönetiminden sorumludur.
- » MOFA (Dışişleri Bakanlığı) ikili ve çok taraflı anlaşma ve anlaşmaların akdedilmesi de dâhil olmak üzere nükleer diplomatik faaliyetlerden sorumludur.
- » NSSC (Nükleer Düzenleme Kurumu) düzenleyici bir kurum olarak nükleer güvenlik, emniyet ve nükleer silahların yayılmasının önlenmesinden sorumludur.

### Ülkedeki nükleer sanayinin yapısı ise aşağıdaki gibidir;

- » KHNP, Güney Kore’deki nükleer santrallarının inşası ve işletilmesi de dâhil olmak üzere genel proje yönetiminden sorumludur.
- » KEPCO Mühendislik ve İnşaat Şirketi (KEPCO E&C), 1975 yılında özellikle PWR’lar için mühendislik çalışmalarını sürdürmek amacıyla kurulmuştur ve ilgili kuruluşlar ilişkisi Şekil 4.30’da gösterilmektedir [4.29]

KEPCO Nükleer Yakıt (KEPCO NF), PWR’lar ve PHWR’lar için nükleer yakıt üretimini yerileştirmek amacıyla KEPCO ve Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü’nün (KAERI) ortak yatırımıyla Kasım 1982’de kurulmuştur.

NSSC (Nükleer Düzenleme Kurumu) ve Kore Nükleer Güvenlik Enstitüsü (KINS), inşa halindeki veya işletmede olan tüm nükleer veya radyasyon tesisleri için, kurulumdan sökümüne kadar tüm aşamalarda düzenleme faaliyetlerinin yürütülmesinden sorumludur. Doosan Heavy Industries & Construction, ağır sanayi iş makinaları tedarikinde ve fabrika imalatında yer almaktadır [4.29, 4.30].



Şekil 4.30: G. Kore nükleer sanayinin yapısı [4.29]

### Güney Kore’de SMR Çalışmaları

Nükleer Ar-Ge, insan kaynakları geliştirme ve radyasyon teknolojisi geliştirme dahil olmak üzere uluslararası iş birliğine ilişkin politikaların oluşturulmasından ve uygulanmasından sorumlu olan Bilim, Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Stratejik Planlama Bakanlığı (MSIP) kapsamındaki Ar-Ge kurumları; KAERI ve Kore Radyoloji ve Tıp Bilimleri Enstitüsü’dür (KIRAMS). KAERI nükleer reaktörler, nükleer yakıt çevrimi, radyoaktif atık yönetimi, nükleer güvenlik, radyasyon ve radyoizotop uygulamaları ile temel ve uygulamalı araştırmalar gibi çok çeşitli alanlarda nükleer araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütmektedir.

#### SMART

KAERI’nin yürüttüğü çalışmalar doğrultusunda 1997 yılında SMR geliştirmek için bir proje başlatılmıştır. Yaklaşık 15 yıllık bir araştırma neticesinde 2012 yılında SMART adı verilen PWR teknolojisi doğrultusunda küçük modüler reaktör tasarımını geliştirilmiştir.

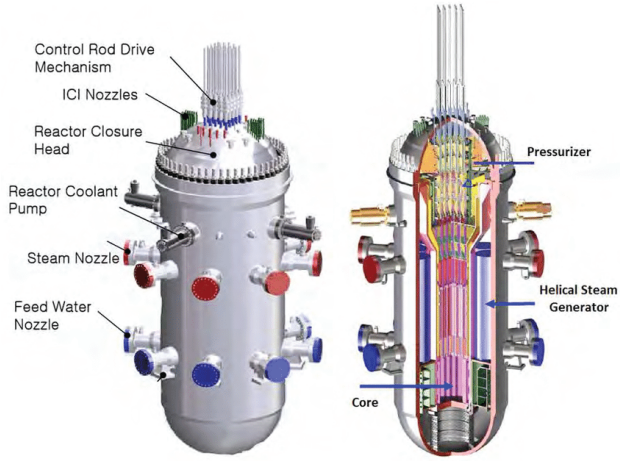
SMART tasarımı, büyük ölçekli bir nükleer santralin yalnızca 1/10’u kadar elektrik üretebilmektedir. Tümlşik tipte bir reaktör olduğu için tek bir reaktör basınç kabında basınçlandırıcı, buhar üretici ve reaktör soğutucu pompaları gibi ana bileşenleri içerecek doğal güvenlik özelliklerini barındırmaktadır. Özellikle ihracat için tasarlanmış olup 100.000 nüfuslu bir şehre aynı anda 90 MW gücünde elektrik ve günde 40.000 ton tatlı su sağlayabilmektedir. SMART tasarımı temsili olarak Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Tasarımın işletim ömrü, üç yıllık yakıt döngüsüyle birlikte 60 yıldır [4.31].

2010 yılının ortalarında, KEPCO liderliğindeki 13 Güney Koreli şirketten oluşan bir konsorsiyum, tasarım çalışmasını tamamlamak için 100 milyar KRW (yaklaşık 90 milyon \$) taahhüt etmiştir. ABD merkezli mühendislik şirketi URS, KAERI’ye teknik destek sağlamıştır.

SMART reaktörünün tasarım lisansı (standart tasarım onayı) 2012 yılında NSSC tarafından verilmiştir. 2016 yılında KAERI, Fukushima kazası sonrasındaki iyileştirmeleri tasarıma dahil ederek soğutma sistemini tamamen pasif hale getirmeye karar vermiştir.

Güney Kore Bilim, Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Stratejik Planlama Bakanlığı (MSIP) ile Suudi Arabistan

Krallığı'nın Kral Abdullah Atom ve Yenilenebilir Enerji Şehri (KA-CARE) arasında 3 Mart 2015 tarihinde bir Mutabakat Zaptı imzalanmıştır.



Şekil 4.31: SMART reaktör tasarımı [4.32]

#### Anlaşmanın ana başlıkları şunlardır;

- » **Proje öncesi mühendislik (PPE) çalışmalarının ortak yürütülmesi**
- » **Smart Power Company (SPC) şirketinin kuruluşu**
- » **Suudi Arabistan'da SPC tarafından 2 adet SMART inşası**
- » **Suudi uzmanlar için insan kaynakları kapasitesinin geliştirilmesi**

### SMART'ın 3. ülkelere ortak pazarlanması

Suudi Arabistan ile imzalanan mutabakat zaptı çerçevesinde; KAERI, 2 Eylül 2015 tarihinde SMART reaktörlerin inşası ve işletilmesi için insan kaynakları kapasitesinin geliştirilmesi kapsamında KA-CARE ile "SMART Proje Öncesi Mühendislik (PPE) Anlaşması" adı verilen bir iş birliği anlaşması imzalamıştır.

2015 yılında, aralarında POSCO E&C, PONU Tech ve DAEWOO E&C'nin de bulunduğu 6 şirketin sermaye ve insan gücü yatırımı ile kurulan SMART Power Company Ltd (SPC) Şirketi, potansiyel ithalatçıların taleplerine uygun olarak özelleştirilmiştir. Ayrıca, ihracat stratejileri geliştirilerek SMART ihracatını sağlamak üzere proaktif faaliyetleri sürdürülmektedir [4.31]

Bilim, Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Stratejik Planlama Bakanlığı (MSIP), SMART ihracat iş birliği faaliyetlerini ve özel işletmeleri desteklemek için Hükümet Politikası Koordinasyon Ofisi; Ticaret Sanayi ve Enerji Bakanlığı (MOTIE) ve Dışişleri Bakanlığı (MOFA) ile hükümet destekli bir danışma organı kurmuştur.

KAERI, 2017'den itibaren işletmek üzere 90 MWe'lik bir pilot tesisi kurmayı planlamış ancak ekonomik ve uygulanabilir olmadığı için tamamlamamıştır.

Şubat 2019 yılında SMART Proje Öncesi Mühendislik (PPE) anlaşması kapsamında yapılacak faaliyetleri başarıyla tamamlanmıştır.

Nisan 2021'de Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) ve KAERI, SMART tasarımının ihracatı için 2028 yılına kadar lisans alınması amacıyla ekonomik olarak geliştirme çalışmalarını birlikte yürütmektedirler. Suudi Arabistan'daki ilk SMART ünitesinin inşa edilmesinin maliyetinin 1 milyar dolar olması beklenmektedir [4.31].

### **SMART tasarımının öne çıkan diğer özellikleri;**

Yakıt çevrimi normal PWR'lara çok benzeyen ancak daha kısa olan 57 yakıt demetine sahiptir. SMART'ın yakıt çevrim süresi 30 aydır. KEPCO-NF, yakıt üretim tesisi artış programı ile SMART'a yakıt sağlayacaktır. SMART'ın kullanılmış yakıtları, depolama bölmeleri kullanılarak bir kullanılmış yakıt havuzunda depolanır. Kullanılmış yakıt depolama bölmelerin mevcut depolama kapasitesi talebe göre değişmekle birlikte 30 yıldır [4.8].

| TEKNİK ÖZELLİKLER             |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| Çekirdek yakıt tasarım        | 17×17           |
| Yakıt malzemesi               | UO <sub>2</sub> |
| Maksimum zenginleştirme (wt%) | %5              |
| Aktif çekirdek uzunluğu (m)   | 2               |
| Yakıt değiştirme süresi (ay)  | 36              |
| Tasarım basıncı (MPa)         | 17              |
| Çalışma basıncı (MPa)         | 15              |
| Tasarım sıcaklığı (°C)        | 360             |
| Çekirdek çıkış sıcaklığı (°C) | 323             |
| Çekirdek giriş sıcaklığı (°C) | 296             |
| Minimum akış hızı (kg/s)      | 2090            |

Atık yönetimi ve bertaraf planı, radyoaktif atık oluşumunu en aza indirmek için çeşitli tasarım çözümlerine sahiptir. Tüm sıvı radyoaktif atıklar, sistem tasarımını basitleştirebilecek ve katı atık sevkiyatını en aza indirebilecek demineralizer paketi ile işlenecektir. Gaz atık sistemi, radyoaktif atık gazların yeterli miktarda tutulmasını ve kontrollü bir şekilde gazların salınmasını sağlar. Katı radyoaktif atık sisteminde polimer katılaştırma teknolojisi kullanılır [4.8].

Güney Kore'nin bir diğer SMR tasarımı ise BANDI-60S'tir.

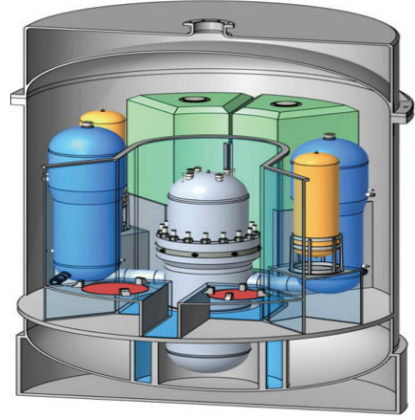


## BANDI-60S

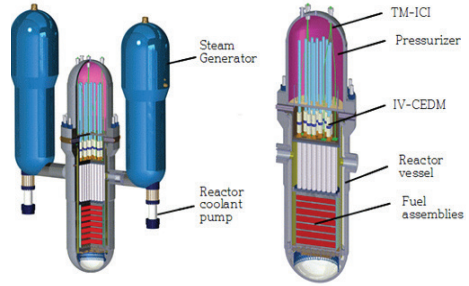
2016'dan beri Güney Kore'nin KEPCO Mühendislik ve İnşaat şirketi tarafından geliştirilen tasarım iki döngülü bir PWR'dir. Piyasa talebine göre özellikle yüzen nükleer santraller için tasarlanmış 200 MWt/60 MWe'lik bir reaktördür. Pompalar vasıtasıyla cebri akış tasarımıdır. Doğrudan nozülünden nozüle bağlanan harici buhar üreteçleri ile 'blok tipi' olarak tanımlanır. Başlangıçta buhar üreteçleri geleneksel U boruludur, ancak KEPCO, tasarımın boyutlarını küçültme yönünde çalışmaktadır. BANDI-60S tasarımının temsili kesiti Şekil 4.32'de ve 4.33'te gösterilmektedir.

Buhar üreteçleri dışında, kontrol çubuğu sürücüler de dahil olmak üzere çoğu ana bileşen basınç kabı içindedir. 48-60 aylık yakıt döngüsü ile 35 GWd/t yanma sağlayan 52 adet yakıt demeti bulunmaktadır. Çözünür bor yerine yanabilir nötron emiciler kullanılır. Tasarım işletim ömrü 60 yıldır.

BANDI-60S'in kavramsal tasarımı şu anda devam etmektedir. Bir sonraki aşamada, kavramsal tasarımın fizibilitesini görmek için güvenlik ve performans analizleri yapılarak ve pasif güvenlik özellikleri de dahil olmak üzere ana bileşenlerin ve sistemlerin boyutlandırılması gerçekleştirilecektir. Eylül 2020'de KEPCO, Daewoo Shipbuilding & Engineering ile söz konusu tasarım ile açık deniz nükleer santralleri geliştirmek için bir anlaşma imzalamıştır [4.31].



Şekil 4.32: BANDI-60S reaktör tasarımı [4.33]



Şekil 4.33: BANDI-60S tasarımının temsili görünümü [4.34]

### TEKNİK ÖZELLİKLER

|                                       |                                              |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| Yakıt malzemesi                       | UO <sub>2</sub>                              |
| Reaktivite kontrol                    | Kontrol çubukları ve ikincil kapatma sistemi |
| Buhar üretici:                        | U tüpler veya plakalı ısı değiştiricisi      |
| RPV yükseklik/çap (m)                 | 11,2/2,8                                     |
| Çekirdek katma suyu tankı (m3)        | 10                                           |
| Acil çekirdek soğutma suyu tankı (m3) | 50                                           |
| Yakıt değiştirme süresi (ay)          | 36                                           |
| Sistem (MPa)                          | 15                                           |
| Buhar basıncı (MPa)                   | 6                                            |
| Çekirdek çıkış sıcaklığı (°C)         | 325                                          |
| Çekirdek giriş sıcaklığı (°C)         | 290                                          |

## 4.6. İNGİLTERE (BİRLEŞİK KRALLIK)

Birleşik Krallık, nükleer enerji çalışmalarında önde gelen ülkelerden biridir. 1956 yılından itibaren nükleer santrallardan enerji üretmektedir. 26 Magnox reaktörüne ilaveten 14 gelişmiş gaz soğutmalı reaktör ile nükleer enerji alanında ilerleme sağlamıştır. Magnox reaktörlerini zaman içinde kapatmış ve Sizewell santrali ile PWR reaktör türüne geçiş yapmıştır. Ekim 2021 itibarıyla 12 gaz soğutmalı bir adet PWR olmak üzere toplam 13 adet işletmede olan reaktör sayısı ile toplamda 7833MW kapasite ile elektriğinin %20'sini nükleer santrallardan karşılamaktadır. Halen 2 adet PWR tip reaktör yapımı devam etmektedir [4.35].

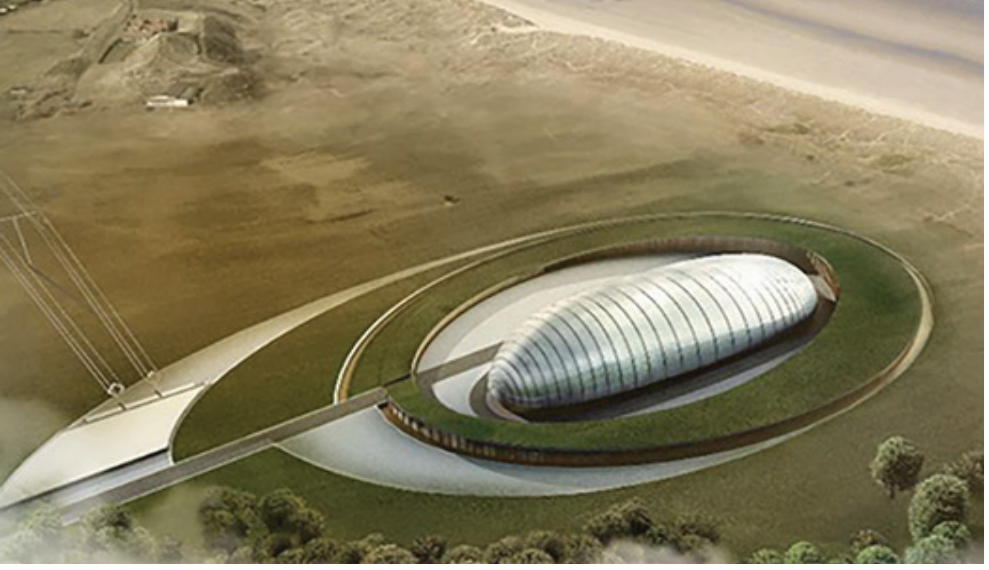
Birleşik Krallık, iklim değişikliğine politikalarına bağlı olarak 2014 yılından beri SMR teknolojisini gündemine alarak yakından ilgilenmektedir [4.36]. Birleşik Krallık'ın büyük reaktör programından, özellikle Hinkley Point C projesi için yapılan anlaşmadan yüksek enerji maliyetleri ortaya çıkmıştır.

2015 yılında Hükümet, İngiltere için "en iyi" SMR tasarım konseptini belirlemek üzere 2020 yılına kadar 250 milyon £ gibi büyük miktardaki bütçenin kullanılabileceğini duyurmuştur [4.37]. O zamandan beri, büyük reaktörlerin maliyetleri artmaya devam etmiş ve finansman gittikçe zorlaşmıştır. Bu durum, 2030'a kadar faaliyet göstermeye başlayacağı öngörülen beş yeni Birleşik Krallık nükleer projesinin üçünün 2018'de çökmesine yol açmıştır.

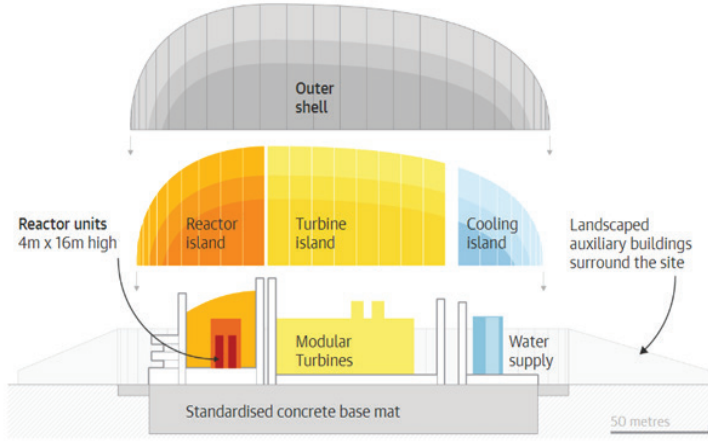
Küçük Modüler Reaktör programı ile birlikte, Birleşik Krallık nükleer şirketlerinin, İngiltere'nin enerji ihtiyaçlarını karşılayacak yeni nesil reaktörler tasarlaması, üretmesi ve inşa etmesi fırsatı doğmuştur. Böylece seçenekleri çeşitlendirme, fikri mülkiyet, yüksek teknoloji, yüksek vasıflı istihdam, yeniden canlandırılmış bir Birleşik Krallık tedarik zinciri oluşturma ve ülkeyi, uluslararası ihracat pazarlarında muazzam fırsatlar sunan yenilikçi nükleer teknolojilerde küresel bir lider olarak konumlandırma şansına sahip olmuştur.

SMR çalışmalarına öncülük eden Rolls-Royce firması, Birleşik Krallık tedarik zincirini küresel olarak tanınan bir konuma yeniden oturtan yeni bir nükleer SMR tesis tasarımını yapmak ve neredeyse tüm yönlerini tedarik etmek üzere güçlü bir konuma gelmiştir. Rolls-Royce, özellikle fabrika üretimi ve devreye alma, kurulum hızı ve sahada azaltılmış inşaat işleri açısından tasarlanmış patentli bir modüler konsept geliştirmektedir. UK SMR olarak adlandırılan bu tasarım, öncelikle hem kıyı hem de iç kesimler için talep edilen elektriği sağlamayı amaçlamaktadır.

Tasarımın genel görünümü Şekil 4.34'de ve yapısal görünümü Şekil 4.35'te görülmektedir.



**Şekil 4.34:** UK SMR projesinin havadan temsili görünümü [4.8]



**Şekil 4.35:** UK SMR projesinin havadan görünümü [4.8]

Tasarım, diğer ısı gerektiren veya kojenerasyon uygulamalarını destekleyecek şekilde ve ayrıca e-yakıt üretimi için birincil karbonsuz bir güç kaynağı sağlayacak şekilde yapılandırılmaya uygundur [4.8].<sup>1</sup> UK SMR'ının tasarım felsefesi, düşük sermaye maliyetine karşı seviyelendirilmiş elektrik maliyetini optimize etmektir. Nükleer santral; yatırımı için sağlam ekonomiyle birlikte, modülerleştirme ve standardizasyona olanak tanıyan bir tesis alanı sağlarken güç çıkışı en yüksek seviyededir.

<sup>1</sup> UK-SMR tasarım ve teknik bilgileri için genel olarak [4.8] nolu Referanstan faydalanılmıştır.

UK SMR tasarımı, birleşik bir sistem mühendisliği ve güvenlik değerlendirme yaklaşımıyla geliştirilmiştir. Güvenlik bilgisine dayalı tasarım, risklerin kabul edilebilir ve ALARP<sup>2</sup> olduğu gösterilen süreci desteklemektedir. Derinlemesine savunma, çeşitli aktif ve pasif sistemler aracılığıyla çok sayıda hata önleme ve koruma katmanı sağlanmasıyla gerçekleştirilir. Pasif güvenlik sistemleri, güvenlik işlevlerini 72 saat boyunca hizmet verecek şekilde tasarlanmış ve insan eylemleri ve AC elektriğe olan talep en aza indirilmiştir.

Kapalı çevrim buhar üretici, buharı ve besleme çevrimiyle çalışma ısısını gidermeye ek olarak; Pasif Bozunma Isı Giderme (PDHR) ve Acil Durum Çekirdek Soğutma Sistemleri (ECCS); pasif, yedekli, çeşitli ve ayrılmış koruyucu güvenlik önlemleri olup arızalara yanıt olarak çok sayıda bozunma ısısı giderme yöntemi sağlamaktadır.

Büyük sızıntılar ECCS tarafından korunabileceği gibi, daha küçük sızıntılar için Küçük Sızıntı Enjeksiyon Sistemi (SLIS) tarafından koruma mevcuttur. Kontrol Çubukları ve Acil Durum Bor Enjeksiyonu, iki farklı ve oldukça güvenilir reaktör kapatma yöntemi sağlamaktadır.

Tasarım, üretim, maliyet ve işletme açısından türünün en iyisi olduğu ileri sürülen UK SMR konseptine ilişkin teknik bilgiler Tablo 4.9'da gösterilmektedir [4.8].

**Tablo 4.9:** Başlıca UK SMR Parametreleri [4.8]

|                 |                                               |                                                                                                                                  |
|-----------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Genel Bilgiler  | Tasarım Adı                                   | UK SMR                                                                                                                           |
|                 | Şirket                                        | Rolls-Royce ve Ortakları                                                                                                         |
|                 | Kullanım Yeri                                 | Kara (Land-based)                                                                                                                |
|                 | Reaktör Tipi                                  | 3-Döngülü PWR                                                                                                                    |
| Teknik Bilgiler | Termal/Elektrik Gücü                          | 1276 MW                                                                                                                          |
|                 | İşletme Ömrü                                  | 60 Yıl                                                                                                                           |
|                 | Soğutucu/Moderatör                            | Hafif su / Hafif su                                                                                                              |
|                 | Yakıt İkmal Döngüsü                           | 18-24 ay                                                                                                                         |
|                 | Yakıt Tipi/Demeti                             | UO <sub>2</sub> /Kare                                                                                                            |
|                 | Yakıt Zenginleştirme (%)                      | 4.95 (max)                                                                                                                       |
|                 | Reaktör Basınç Kabı Yükseklik / Çap / Ağırlık | 11.3m / 4.5 m / 220 ton                                                                                                          |
|                 | Güvenlik Sistemlerine Yaklaşım                | Aktif ve pasif                                                                                                                   |
|                 | Yakıt Döngüsü                                 | Açık döngü, Uzun vadeli kuru varil depolama sahasına aktarılmadan önce depolanmak üzere havuza transfer edilen kullanılmış yakıt |
|                 | Gereksinimleri / Yaklaşım                     |                                                                                                                                  |

2 ALARP-ALARA (As Low As Reasonably Achievable): Güvenlik açısından kritik ve güvenlikle ilgili sistemlerin düzenlenmesi ve yönetiminde bir ilkedir. Prensip, kalan riskin makul olarak uygulanabilir olduğu ölçüde azaltılmasıdır.

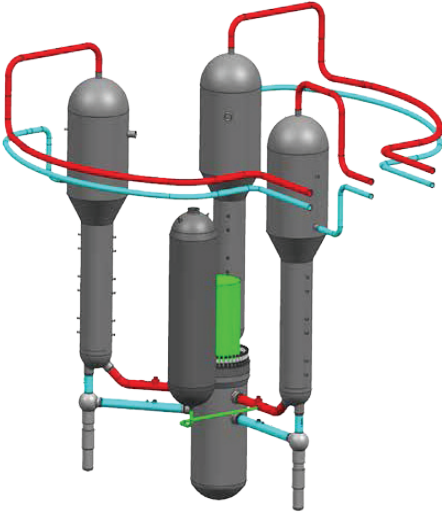
## Gelişim Kilometre Taşları;



Birincil devre ve diğer anahtar sistemler hem normal hem de hatalı çalışma sırasında radyasyon kaynaklarının salınmasını sınırlandırmak için çelik bir muhafaza kabı içinde yer alır. UK SMR, ciddi kazalarda mevcut eriyiği sınırlandırmak için kap-ıç muhafaza (in-vessel retention-IVR) tasarımını da benimsemektedir.

Yaklaşık 40.000 m<sup>2</sup>'lik kompakt bir alanda yer alan santral, çeşitli zemin ve toprak şartlarında ve çeşitli iç ve kıyı sahalarında kurulum için tasarlanmıştır. Bu esneklik, güvenlikle ilgili alanlar için sismik izolasyon gibi tasarım özellikleriyle sağlanır.

Üç döngülü PWR tasarımından esinlenen sistemde, Soğutma Suyu Adası ile birlikte Türbin Adasına bitişik Reaktör Adası yer almaktadır. Destek binaları ve yardımcı hizmetler, sahayı çevreleyen ve tsunami veya uçak çarpması gibi dış tehlikelere karşı bir koruma katmanı sağlayan dirençli bir tehlike bariyeri içinde yer almaktadır.



**Şekil 4.36:** UK-SMR tasarımı, 3 döngülü PWR tasarım konsepti [4.39]

Proje, 2025'te başlayacak türünün ilk örneği olan santralının inşası için İngiltere Nükleer Düzenleme Dairesi Genel Tasarım Değerlendirme sürecinin zamanında tamamlanmasını hedeflemektedir. Bu zaman hedefi, geliştirme süresini ve düzenleme riskini en aza indirmek için kabul görmüş teknolojilerin optimize edilmiş kullanımı yoluyla ulaşılabilir olduğu düşünülmektedir. UK SMR'ının gelişimini ileri seviyelere taşıyabilmek adına UK merkezli akademik ve endüstriyel ortaklarla birlikte bir konsorsiyum oluşturulmuştur. Tasarım tanımı olgun bir tasarım konsepti aşamasındadır. UK SMR tasarım görünümü Şekil 4.36'da verilmiştir.

**Ürün tanımını gösteren bir Rolls-Royce tasarım sertifikası verilmiştir. Bunun kapsadıkları:**

- » Santral Tanımı ve Çalışma Prensipleri
- » Reaktör Ada Sistemleri Tanımı
- » Türbin Ada Sistemleri Tanımı
- » İnşaat Mühendisliği Çözümleri
- » Saha Düzeni
- » Elektrik Güç Sistemi
- » Güvenlik Yönetim Prospektüsü
- » Ön Güvenlik ve Çevre Raporu
- » Ön Emniyet Çözümü

UK SMR, üç kesikli bir denge çekirdeği ile 18 ila 24 aylık bir yakıt döngüsünde çalışır. Yakıt değişim süresi için 18 gün kesinti tahmin edilmektedir. Tasarımın ilerlemesiyle birlikte daha fazla optimizasyon çalışması mevcuttur. Hem yakıt değişimi sırasında kullanılan yakıtı hem de yeni yakıtı geçici olarak depolayan kapalı bir havuz ile yakıt ikmali yönetimi gerçekleştirilir. Kullanılmış yakıt daha sonra uzun süreli kuru varil depolama sürecine geçilmeden önce depolanmak üzere harici bir kullanılan yakıt havuzuna aktarılır.

UK SMR atık işleme sistemleri, kabul görmüş teknolojilerin ve mevcut en iyi tekniklerin kullanımına dayanmaktadır. Hem tasarım hem de işletme uygulamaları yoluyla, aktif ve aktif olmayan atık ve deşarjları en aza indirmek için sistemlerin ge-



liştirilmesinde sektörden alınan dersler ve iyi uygulamalar kullanılmıştır. Etkili atık yönetimine ilişkin gerekli esnekliği elde etmek üzere standartlaştırılmış atık arıtma sistemi bileşenleri ve modülleri kullanılmıştır.

Birincil soğutucudaki çözünür bor olmadan çalıştırma, çevresel deşarjlarda önemli ölçüde azalmaya ve buna bağlı olarak atık işleme sistemlerinin basitleştirilmesini sağlar. Sıfır deşarjlı bir tesis elde etmek tasarım hedefidir.

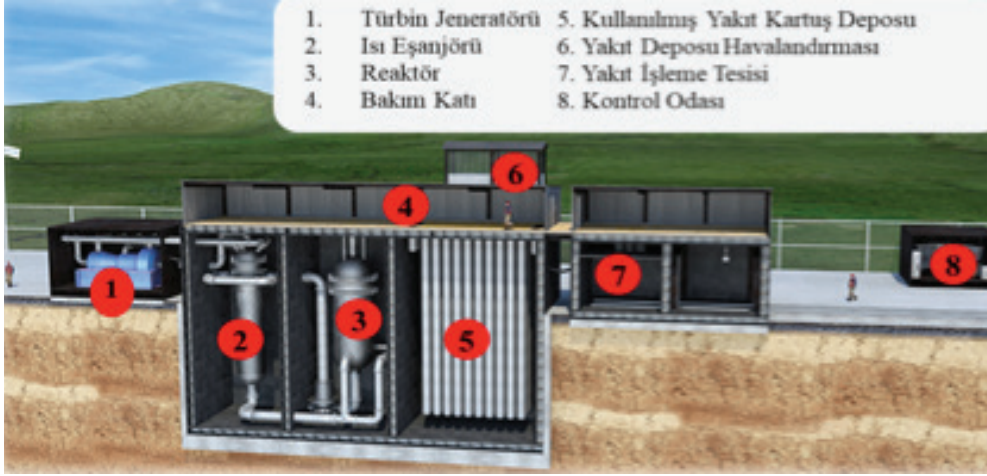
**Üretim devi Rolls-Royce liderliğindeki İngiliz iş dünyası konsorsiyumu, bu UK SMR tasarımının şunları gerçekleştireceğine inanmaktadır [4.40]:**

- » **Yapılandırmaya bağlı olarak 220MW ile 440MW elektrik sağlamak (Bu 150 adet kara rüzgâr türbinine eşdeğerdir),**
- » **Şebekeye ve tüketiciye zamanında ve düşük maliyetle elektrik sağlamak (En azından günümüzün büyük ölçekli reaktörleri tarafından MW başına üretilen elektrik kadar ucuz elektrik üretmek – SMR’ler çoklu üretime geçtiğinde daha da ucuz olacaktır),**
- » **Kabul görmüş teknolojiyle en düşük riski ve yüksek derecede ticari veya standartlaştırılmış hazır bileşenlerle en iyi değeri yansıtmak,**
- » **Tasarımın %75’inden fazlası modüler olduğundan, UK tedarik zinciri şirketlerinin seri üretime girmeleri için fırsatlar yaratmak,**
- » **Kamyon, tren ve hatta mavna ile taşınabilecek şekilde kompakt olmak,**
- » **İnşaatın başlamasından ilk elektriğin üretilmesine kadar sadece 5 yıllık bir süre gerektirmek,**
- » **İngiltere’nin ihracat yarışında ilk hamle avantajını en üst düzeye çıkaracak şekilde 2028 yılına kadar hazır ve çalışır durumda olmak,**
- » **Yakıt ikmali ve işletmeden çıkarma gibi işletme maliyetlerini en aza indirmek,**
- » **60 yıllık işletme ömrüne sahip olmak.**

İngiltere’nin konuyla ilgili yürütmekte olduğu bir diğer proje ise enerji yoğun endüstriler ve uzak yerleşkeler için tasarlanan düşük karbonlu, uygun maliyetli, yerleşik ve güvenilir bir elektrik ve ısı kaynağı sağlayabilen gelişmiş küçük modüler Yüksek Sıcaklık Reaktörü (HTR) olan “U-Battery” dir. Reaktör sistemleri ve güvenliği konusunda Jacobs, Cavendish Nuclear ve Kinectrics, yakıt ve yakıt çevrimi konusunda NNL ve BWXT, temel bileşenlerde Rolls-Royce ve Howdende, inşaat işlerinde Costain ve nakliye konusunda Mammoet ve Daher ortaklığıyla iş birliği içinde Urenco tarafından geliştirilmektedir [4.8].

Proje, özellikle 2020’de duyurulan Birleşik Krallık Hükümeti’nin Gelişmiş Modüler Reaktör yarışması kapsamında bir fon kazanarak ve Satıcı Tasarım İnceleme sürecinin bir parçası olarak Kanada Düzenleyici Kurumu (CNSC) ile etkileşimde bulunarak bazı önemli kilometre taşlarına ulaşmıştır. Mühendislik, üretim ve lisanslamada ikili

ilişkilerden faydalanmak adına ticari olarak çalışan ilk iki birimin biri İngiltere’de diğeri ise Kanada’da olacak şekilde birbiri ardına iki yıl arayla kurulması planlanmaktadır. U-Battery tasarım yapısı Şekil 4.37’de verilmiştir



**Şekil 4.37:** U-Battery projesinin gösterimi [4.41]

U-Battery konsepti<sup>3</sup>, başlangıçta Urenco tarafından Manchester Üniversitesi’ne ve Delft Teknik Üniversitesi’ne, dizel veya diğer daha küçük boyutlu fosil yakıtlar veya yenilenebilir teknolojilerle hizmet verilen bir pazara nükleer entegre etmek amaçlı mevcut gelişmiş teknolojiyi kullanmak üzere belirlenen bir projenin ürünüdür. Küresel pazarlarda ticarileştirme ve dağıtım yoluyla önemli ekonomik faydalar sağlama potansiyeline sahiptir. Hem Birleşik Krallık’ta ağır sanayi sitelerine elektrik sağlamak hem de Kanada’da madencilik sahalarında ve şebekeden bağımsız uzak topluluklarda konuşlandırılabilmesi büyük olası pazarlar belirlenmiştir. Bir pazar araştırması ve analizinde İngiltere’de ısı ve elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için küçük bir nükleer gömülü üretim kaynağını kullanabilecek potansiyel 200 sanayi bölgesi ve altı sektör (çelik, kağıt ve kağıt hamuru, cam, seramik, kimyasallar ve mineraler) tespit edilmiştir. Dekarbonizasyonda önemli bir rol oynayacak olan U-Battery teknolojisinin tamamen Birleşik Krallık’ta üretilebileceği düşünülmektedir. İhtiyaç duyulan bileşenlerin yüzde 70’i İngiliz şirketleri tarafından üretilmektedir [4.42].

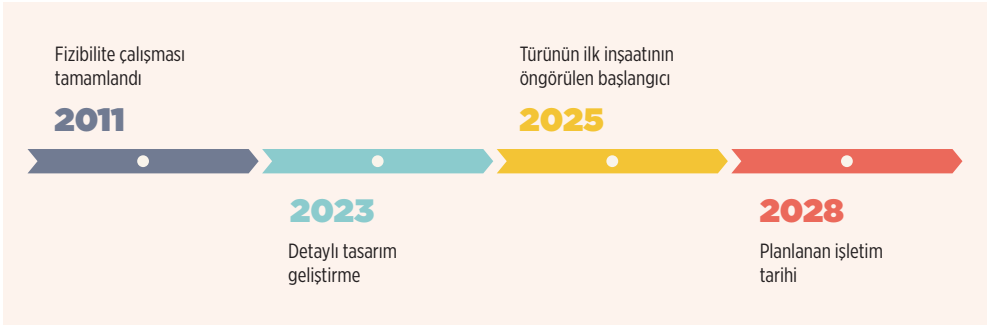
U-Battery; kullanıcıya özel arayüze bağlanan, birincil helyum ve ikincil nitrojen devrelerini içeren, ayrıca kullanılmış bir yakıt deposundan oluşan ve nükleere özgü sistemleri ve bileşenleri temsil eden standartlaştırılmış reaktör bloğundan oluşan çok amaçlı bir reaktördür. Genel ve teknik bilgiler ile gelişim sürecine ilişkin hedef tarihler Tablo 4.10’da yer verilmiştir [4.8].

<sup>3</sup> Genel olarak [4.8] nolu kaynaktan yararlanılmıştır.

**Tablo 4.10:** Başlıca U-Battery Parametreleri [4.8]

|                 |                                                  |                                                     |
|-----------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Genel Bilgiler  | Tasarım Adı                                      | U-Battery                                           |
|                 | Şirket                                           | Urenco                                              |
|                 | Reaktör Tipi                                     | Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Mikro Nükleer Reaktör |
| Teknik Bilgiler | Termal/Elektrik Gücü                             | 10 MW (t) / 4 MW(e)                                 |
|                 | İşletme Ömrü                                     | 30 Yıl                                              |
|                 | Soğutucu/Moderatör                               | Helyum / Grafit                                     |
|                 | Yakıt Tipi/Demeti                                | TRISO / Hegzagonal                                  |
|                 | Yakıt Zenginleştirme (%)                         | <20%                                                |
|                 | Reaktör Basınç Kabı<br>Yükseklik / Çap / Ağırlık | 5.5m / 2.2 m                                        |

### Gelişim Kilometre Taşları;



Yer altı reaktör boşluğuna ve bitişikteki kullanılmış çekirdek depolama tesisine dayalı bir tesis yerleşimi geliştirilmiştir. Her ikisi de tepe vinci ile hizmet vermektedir ve havalandırmalı kapalı bir binada güç dönüştürme modülü ile aynı yerde bulunmaktadır. Reaktör ve ısı değiştiricisi yan yana, ancak her biri kendi bölmesine yerleştirilmiştir. Kullanılmış yakıt, doğal taşınım ile soğutulur. Türbin jeneratörü yerin üstündeki ayrı bir binada bulunur. Genel tasarım, yakıt işleme tesisi aracılığıyla yakıtın erişime sahip yakıt varillerine yüklenmesini ve boşaltılmasını sağlar.

Kullanıcıya özel üç geniş uygulama öngörülmüştür: Bir dizi endüstriyel uygulamaya proses ısısı sağlamak, gaz türbini aracılığıyla elektrik üretmek ve değişken ısı ve güç karışımı ile kojenerasyon sağlamaktır.

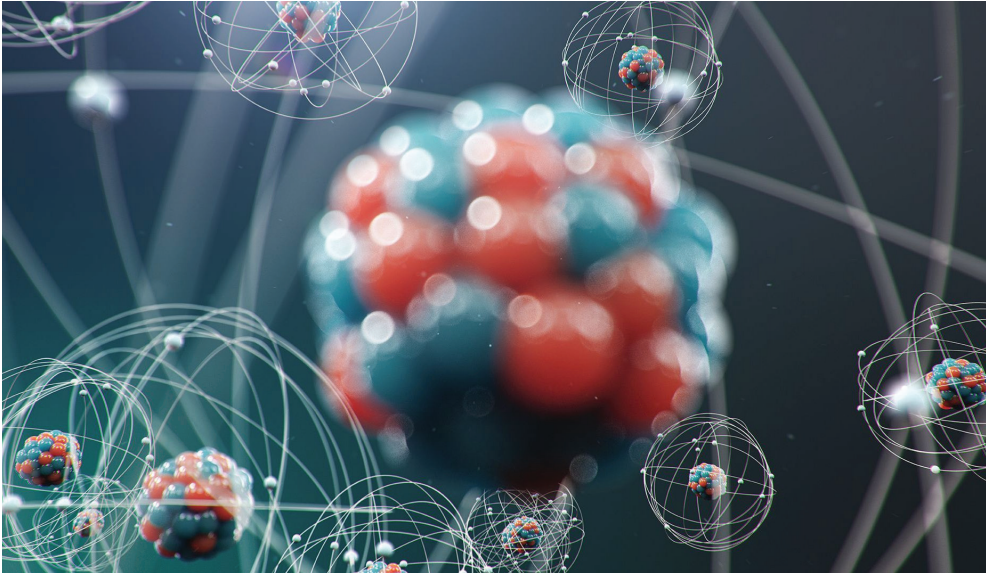
Potansiyel hedef uygulamalar ise şunları içermektedir: Mevcut nükleer üretim tesisleri için yedek güç; uzak bölgeler ve ağır sanayi siteleri için ısı ve elektrik kaynağı; bir dizi mevcut endüstriyel uygulama için yerelleştirilmiş ısı ve/veya güç kaynağı; tuzdan arındırma, bölgesel ısıtma, ulaştırma ve hidrojen üretimi gibi potansiyel yeni uygulamalar.

U-Battery'nin kojenerasyon kabiliyetleri hem ısı hem de elektrik üretimi gerektiren birçok pazar için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, ortak üretimli bir dağıtım, daha fazla geliştirme ve bir elektrik şebekesine bağlanma ihtiyacını ortadan kaldırdığı için maliyet açısından da oldukça verimlidir. Aynı tasarımı farklı yerlerde kullanan bir filo yaklaşımı benimsenecektir. Diğer yandan, genel ağın verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için birden fazla düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji kaynağını entegre eden hibrit bir enerji sisteminin parçası olarak da kullanılabilir. Dünya çapında 18.000 tuzdan arındırma tesisi ve yıllık 1.000 ek talep mevcuttur. U-Battery bu alanda da kullanım avantajları sağlayacaktır [4.43].

#### U-Battery tasarımının amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- » **Yalnızca yerleşik ve nükleer onaylı teknolojiyi kullanmak,**
- » **Modüler üretim ve tesis-dışı fabrika üretimini en üst düzeye çıkarmak,**
- » **Maliyet açısından rekabetçi ve esnek bir enerji tedarikçisi olmak,**
- » **Ortak bir reaktör adası kullanımı ile farklı bölgelere ve çeşitli pazarlara hizmet etmek,**
- » **Ek gelir veya değer yaratabilecek alternatif uygulamaları desteklemek.**

İletim maliyeti olmayan yerleştirilmiş güç dağıtımı yanı sıra, son derece sağlam yakıt, çok küçük termal çıktı, yavaşlatıcının yüksek termal kapasitesi ve verimli ısı transferi ile mümkün olan basit güvenlik sistemleri, yine basit tasarım ve küçük boyutuyla fabrika tabanlı üretim ve modüler yapısıyla U-Battery büyük ölçekli ekonomilerin yerini almaktadır.



## 4.7. JAPONYA

Japonya’da elektrik üretimi için ilk ticari reaktör, 1966-1998 yılları arasında işletilen, gaz soğutmalı, 166 MWe gibi küçük kapasiteli ve İngiltere’den ithal edilen bir reaktördür. İlerleyen süreçte ticari reaktörler olarak gaz soğutmalı yerine hafif su reaktörleri (LWR) tercih edilmiştir. Japonya’da ilk ticari hafif su reaktörü, 1970’de işletilmeye başlanan 375 MWe gücündeki bir reaktördür. Reaktörlerin güç çıkışı zamanla artırılarak, 600 MWe, 900 MWe ve 1100 MWe değerlerine ulaşmıştır. Bu dönemde, Japonya’nın elektrik üretimi için küçük reaktörlerden ziyade diğer ülkelere benzer şekilde büyük ölçekli reaktörlere önem verilmiştir <sup>4</sup>.

1979’da ABD’nde Three Mile Island Santrali 2. Ünite’de meydana gelen kaza ve 1986’da Ukrayna’da santralin 4. Ünitesi’nde meydana gelen Chernobly kazalarının ardından Japonya’da 1980-1990 yılları arasında küçük modüler reaktörler için çok sayıda Ar-Ge faaliyeti başlatılmıştır.

Three Mile Island ve Chernobly kazalarından sonra pasif güvenlik karakteristikleri reaktör güvenlik tasarımlarında yer almaya başlamış ve mümkün olduğu kadar etkin bir şekilde bu sistemlerin kullanılmasına yönelik ilgi oluşmuştur. Pasif sistemlerin reaktör tasarımında sunulması ile küçük ölçekli reaktör (500 MWe’den küçük), genel olarak büyük ölçekli reaktörlerden (1000 MWe üstü) daha basit yapıya sahip olurken, büyük ölçekli reaktörler ekonomik yönden avantaj oluşturmıştır. Bu nedenle küçük modüler reaktörlerdeki Ar-Ge çalışmalarında, büyük ölçekli reaktörlerin ekonomik avantajının üstesinden gelinmesine odaklanılmıştır.

Küçük ölçekli reaktör, doğal sirkülasyonla kor soğutma ve yerçekimi beslemeli acil durum kor soğutma sistemi gibi pasif güvenlik özellikleri ile ekonomik beklentiler açısından büyük ölçekli reaktörlere göre kullanımının daha uygun olabileceği yönünde Japonya dışında tüm dünyada bir eğilim oluşmuştur.

Bu süreçte en belirgin ve en iyi bilinen reaktör konsepti ABB-ATOM tarafından geliştirilen basınçlı su reaktörü (PWR) tasarımlı PIUS (Process Inherent Ultimate Safety) olarak adlandırılan “622 MWe/3 modül” entegre tip hafif su reaktörüdür. Bu tasarım, geçici olaylar veya kaza durumunda reaktörün güvenli bir şekilde devreden çıkarılması ve bozunum ısının uzaklaştırılarak operatör müdahalesi veya harici enerji beslemesi gerektirmeden pasif önlemler sunmuştur. Reaktör, entegre PWR yani iPWR (integrated PWR)’ın bir çeşidi olduğundan, birincil soğutma borusu bulunmaz ve bu nedenle büyük kırıklı soğutma kaybı kazasını (Large Break Loss of Coolant Accident) önlenmektedir.

<sup>4</sup> Japonya hakkındaki bu bölümde, [4.44] ve [4.8] nolu kaynaklardan yararlanılmıştır.

**Entegre PWR (iPWR) konsepti üzerine tasarım genişletilerek Japonya’da 3 adet reaktör konsepti geliştirilmiştir:**

- » Çelik reaktör kabı, ön gerilmeli beton reaktör kabı yerine kullanılarak, 210 MWe çıkışa sahip ISER (Inherently Safe and Economic Reactor) tasarımı Tokyo Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir.
- » JAERI (Japan Atomic Energy Institute) tarafından 350 MWe gücünde SPWR (System-Integrated PWR) konsepti geliştirilmiştir.
- » 300 MWe gücünde MISIR (Mitsubishi Intinsic Safe Integrated Reactor) konsepti geliştirilmiştir.

**Japonya’da iPWR haricinde yapılan çalışmalar ve tasarımlar ise şöyle sıralanabilir:**

- » JAERI tarafından deniz araçları için itici güç veya bölgesel enerji arzını sağlamak amacıyla pasif güvenlik özellikli ve daldırılmış reaktör kabı ile entegre tip PWR tasarımlı 30 MWe gücünde MRX (Marine Reactor X) reaktörü geliştirilmiştir.
- » Geleneksel döngü tipli PWR konsepti genişletilerek, Westinghouse tarafından geliştirilen 600MWe çıkışlı AP600 (Advanced PWR) reaktör tasarımını esas alan 600 MWe gücünde pasif güvenlik özellikleri sunan MS600 reaktörü Mitsubishi Heavy Industries (MHI) tarafından geliştirilmiştir.
- » Aynı şekilde geleneksel döngü tipli kaynar su reaktörü (BWR) genişletilerek Hitachi tarafından 600 MWe çıkışlı HSBWR-600 reaktörü ve 310 MWe gücünde TOSBWR-900P tasarımı Toshiba tarafından önerilmiştir. Bu reaktörler, General Electric tarafından geliştirilen 600 MWe gücündeki doğal sirkülasyonlu kor soğutma ve yer çekimi etkili acil durum çekirdek soğutma sistemine sahip SBWR (Simplified BWR) tasarımını temel almaktadır.

Ancak 1990'lara kadar Japonya’da bahsedilen SMR tasarımları geliştirilmesine rağmen hiç birinin üretimi gerçekleştirilmemiştir. Bunun nedeni, reaktör büyüklük ölçeğinin ekonomik beklentilerin üstesinden gelememesi dolayısıyla elektrik şirketlerinin ilgisini çekememesidir. Diğer taraftan büyük ölçekli hafif su reaktörleri işletme deneyimine dayalı güvenlik özellikleri ve standartlaşma projeleri vasıtasıyla ilerlemeye devam etmiştir.

ABD Enerji Birimi (US DOE) tarafından 2000 yılında IV. Nesil reaktör geliştirilmesi önerildiğinden Japonya’da SMR Ar-Ge faaliyetleri başlatılmıştır. Bu dönemde, SMR Ar-Ge faaliyetleri, mevcut büyük ölçekli hafif su reaktörleri için geçerli elektrik üretim fiyatı (birim kWh) ve yapım maliyeti (birim kWe) ile aynı seviyede kalması yönünde ekonomik beklentilerin karşılanması amaçlamıştır. Yüksek ekonomik performansı gerçekleştirmek için tasarım basitleştirilmesi en etkili yaklaşım olmuştur. Basitleştirmeyi optimize etmek için, 3 adet hafif su reaktör konseptine dayalı olarak SMR tasarımı önerilmiş ve geliştirilmiştir. Bunlar: IMR (Integrated Modular Water Reactor), CCR (Compact Containment Water Reactor), DMS (Double MS – Modular



Simplified and Medium Small Reactor)’dir. Bu tasarımlara ek olarak, hafif su reaktörlerine göre daha yüksek termal verim karakteristiğine sahip HTGR (High Temperature Gas-Cooled Reactor)’ye dayalı SMR konseptleri önerilmiştir. Bunlardan biri yüksek sıcaklı GTHT300 (Gas Turbine High Temperature Reactor 300)’dür.

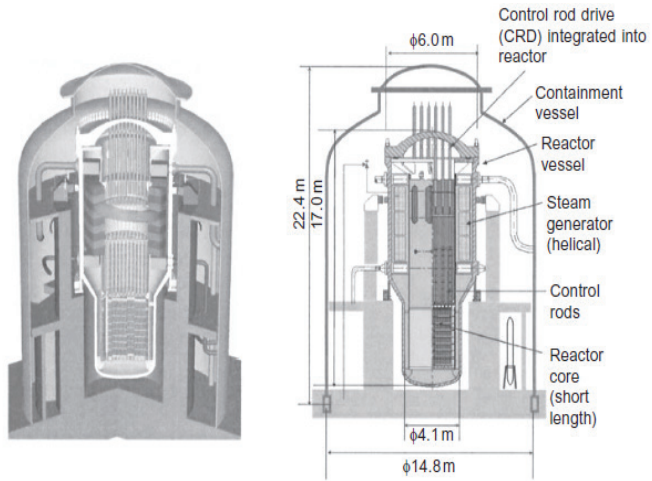
Bu tasarımlar haricinde, Alaska gibi izole alanlarda bölgesel kullanım amacıyla sodyum soğutmalı SFR (Sodium Cooled Fast Reactor)’yi esas alan bir SMR tasarımı olan 4S olarak adlandırılan (Super Safe Small Simple) konsept önerilmiştir.

Japonya’da geliştirilen 5 adet SMR’ın özellikleri aşağıda verilmektedir.

### **IMR (Integrated Modular Water Reactor)**

IMR, MHI (Mitsubishi Heavy Industries) ve JAPC (Japon Atomic Power Company) tarafından önerilen bütünleşik, basınçlı su reaktörü (PWR) yani iPWR (integral PWR) konseptidir. Basınçlı su reaktörü tasarımını esas almasına rağmen reaktör çekirdeğinin üst taraflarına yakın yerlerde birincil soğutucunun kaynamasına izin verilmektedir

ve soğutucunun doğal sirkülasyonu ile reaktör çekirdeği soğutulmaktadır. Reaktör çekirdek soğutucusunun kaynaması, doğal sirkülasyonlu çekirdek soğutma için gerekli itici gücü artırmaktadır. IMR tasarımının genel görünümü Şekil 4.38’de verilmektedir.



**Şekil 4.38:** IMR tasarımı genel görünüm [4.44]

IMR, reaktör kontrol sistemi vasıtasıyla nominal güç çıkışı %20-100 arasında olacak şekilde çalışır ve %20’nin altındaki düşük güçte çalışmada bile kontrol sistemi, reaktörü otomatik olarak kontrol eder. Birincil sistem basıncı ve reaktör gücü, besleme suyu veya kontrol çubukları ile kontrol edilmektedir. Güç çıkışı 350 MWe, ortalama yakıt değişimi gerektiren yanma oranı (average discharge burnup) 45 GW d/t (GW gün/ton) ve yakıt değişim aralığı 26 aydır. Sistem basıncı normal bir PWR’a benzer şekilde 15,5 MPa’dır. IMR tasarımında, 97 adet yakıt demeti 21x21 dizilimindedir ve %4,8 zenginleştirilmiş uranyum kullanarak 1000 MWt çıkış elde edilmektedir. Yakıtta kaplama olarak Zr-Nb alaşımı kullanıldığından 345°C’ye kadar artan soğutucu sıcaklığında yakıt bütünlüğü ve yakıt çubuklarının uzun ömürlü olması sağlanmaktadır.

IMR'ye ait tasarım hedefleri ve ana özellikler Tablo 4.11'de verilmektedir.

**Tablo 4.11: IMR tasarım hedefleri ve özellikleri**

| Parametre                                      | Değer                                   |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Geliştirici                                    | MHI                                     |
| Reaktör tipi                                   | Bütünleşik PWR                          |
| Hedeflenen güç çıkışları                       | 300 – 600 MWe                           |
| Hedeflenen yapım maliyeti                      | Büyük güçlü reaktörle aynı veya daha az |
| Hedeflenen kapasite faktörü                    | >%90                                    |
| Hedeflenen güvenlik                            | Mevcut santrallerle aynı seviyede       |
| Hedeflenen inşaat süresi                       | < 24 ay                                 |
| Lisanslamaya uygunluk                          | Mevcut lisanslama için uygun            |
| Reaktör gücü                                   | 350 MWe                                 |
| Çekirdek termal çıkışı                         | 1000 MWt                                |
| Birincil Çevrim                                | Doğal Sirkülasyon                       |
| Birincil sistem basıncı                        | 15,5 MPa                                |
| Birincil sistem giriş/çıkış sıcaklığı          | 300/345 °C                              |
| Birincil soğutma akış hızı                     | 3,0 t/s                                 |
| Buhar sıcaklığı                                | 289 °C                                  |
| Buhar basıncı                                  | 5 MPa                                   |
| Çekirdek eşdeğer çapı                          | 3 m                                     |
| Çekirdek yüksekliği                            | 3,7 m                                   |
| Reaktör basınç kabı yüksekliği/çap             | 17/6                                    |
| Yakıt değişim aralığı                          | 26 ay                                   |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı | 45 GW d/t (GW gün/ton)                  |
| Yakıt zenginleştirme                           | %4,8                                    |
| Reaktivite kontrol mekanizması                 | Kontrol çubuğu sürüş mekanizması        |
| Güvenlik sistemi                               | Hibrit (Pasif + Aktif)                  |
| Tasarım ömrü                                   | 60 yıl                                  |
| Sismik tasarım                                 | 0,3g                                    |
| Tasarım durumu                                 | Konsept tasarım tamamlandı              |

IMR tasarımında birincil soğutma sistemi ve buhar üreteçleri reaktör basınç kabının içindedir ve bu nedenle büyük kırıklı soğutucu kaybı kazası (Large Break LOCA) önlenmiş olur. Bu reaktör konseptindeki pompa, basınçlandırıcı ve birincil devre boruları gibi ekipman minimize edilmiştir. Acil durum çekirdek soğutma sistemi bulunmadığından ve bozunum ısısının atılması için sadece buhar üretici soğutma sistemi gerekli olduğundan IMR'nin güvenlik sistemi tasarımı önemli ölçüde basitleştirilmiştir. Buhar üreteçleri, normal devreye alma (startup), devreden çıkarma (shutdown) ve

kaza durumunda bozunum ısısı atımı için ısı değıştiricisi olarak da kullanılmaktadır. Acil durum çekirdek soğutma sistemi harici bir elektriksel güç gerektirmediğinden pasif sistemdir. Buhar üretici soğutma sistemi ise pompaların kullanımını gerektirdiğinden aktif ekipman olarak dizel ve gaz türbini tahrikli jeneratör beslemesi mevcuttur. Kontrol çubuğu sürüş mekanizması reaktivite kontrolü için birincil araçtır.

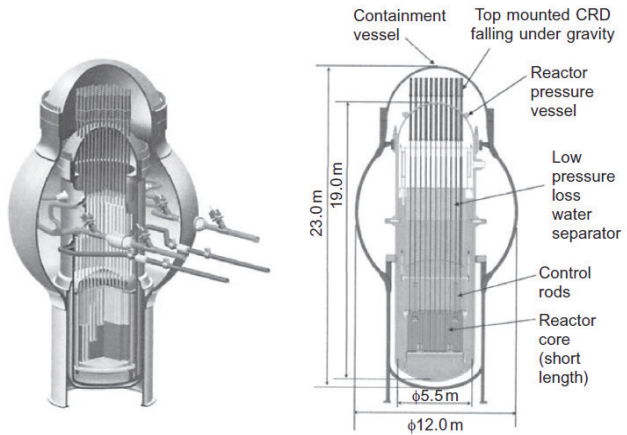
IMR'nin geliştirilmesi için optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Önceki deneyimlerden elde edilen teknoloji kullanılarak çeşitli güç aralıklarında reaktör konsepti geliştirilmesi dikkate alınmaktadır. Örnek olarak, 100MWe gücünde bir santral IMR teknolojisine dayalı olarak geliştirilmektedir.

IMR, öncelikli olarak karada kurulacak modüler santrallerle elektrik üretmek için tasarlanmıştır. IMR aynı zamanda elektriğin kojenerasyon uygulaması, bölge ısıtma, deniz suyu arıtma ve süreç buharı vb. amaçlarla kullanılabilir.

### CCR (Compact Containment Water Reactor)

Toshiba Corporation tarafından JAPC (Japon Atomic Power Company) koordinasyonunda önerilen bir kaynar su reaktörüdür (BWR). Reaktör çekirdeği, re-sirkülasyon pompaları olmaksızın soğutucunun doğal sirkülasyonu ile soğutulmaktadır. Sistem basitleştirilmesi adına karakteristik özelliklerinden biri yaklaşık 4MPa

gibi yüksek basınca dirençli kompakt muhafaza kabıdır. Kontrol çubuğu sürüş mekanizması reaktör kabının en üstünde bulunduğundan reaktör kabının en altındaki giriş elimine edilmiştir. Tasarımın temsili görünümü Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



Şekil 4.39 CCR tasarımı genel görünüm [4.44]

Güç çıkışı 423 MWe, yakıt değışimi gerektiren ortalama yanma oranı (average discharge burnup) 45 GWd/t (GWgün/ton) ve yakıt çevrimi 24 aydır. Doğal sirkülasyonlu çekirdek soğutma için sürüş kuvvetini artırmak için çekirdeğin etkin uzunluğu 2,2 metreye kısaltılmıştır. Sistem basıncı kaynar su reaktörü ile aynı olup 7 MPa'dır.

Acil durum çekirdek soğutma sistemi gerektirmediğinden ve bozunum ısısının bertarafı için sadece "izolasyon kondenseri soğutma sistemi" gerekli olduğundan

CCR'nin güvenlik sistemi tasarımı önemli ölçüde basitleştirilmiştir. Pasif bileşenlerden oluşan izolasyon kondenserleri sistemi, operatör müdahalesi olmadan bozunum ısısını 3 gün içinde uzaklaştırmaktadır. CCR tasarımının kontrol çubuğu sürüş mekanizması, BWR ve PWR farklı olduğu için buhar bölgesinde yer alan malzemeler için aşınma direnci testleri, uygulanabilirliği doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

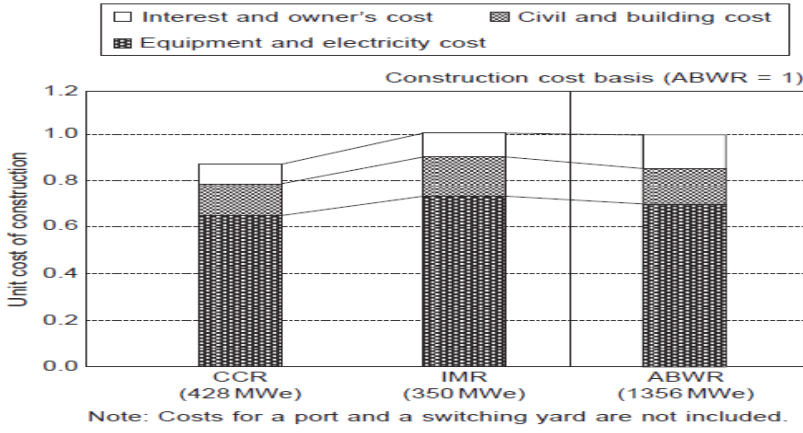
CCR tasarımı için gelecekte optimizasyon çalışmaları, önceki gelişmelerden elde edilen teknoloji kullanılarak çeşitli güç çıkışı aralıklarında tasarım geliştirme çalışmaları gerçekleştirilecektir. CCR tasarım hedefleri ve ana özellikler Tablo 4.12'de verilmektedir.

**Tablo 4.12:** CCR tasarım hedefleri ve özellikleri

| Parametre                                      | Değer                                        |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Geliştirici                                    | Toshiba Corporation                          |
| Reaktör tipi                                   | BWR                                          |
| Hedeflenen güç çıkışları                       | 300 – 600 MWe                                |
| Hedeflenen yapım maliyeti                      | Büyük güçlü reaktörlerle aynı veya daha az   |
| Hedeflenen kapasite faktörü                    | >%90                                         |
| Hedeflenen güvenlik                            | Mevcut santrallerle en azından aynı seviyede |
| Hedeflenen inşaat süresi                       | < 24 ay                                      |
| Lisanslamaya uygunluk                          | Mevcut lisanslama için uygun                 |
| Reaktör gücü                                   | 423 MWe                                      |
| Çekirdek termal çıkışı                         | 1268 MWt                                     |
| Sistem basıncı                                 | 7 MPa                                        |
| Birincil sistem giriş/çıkış sıcaklığı          | 215/287 °C                                   |
| Birincil soğutma akış hızı                     | 3,3 t/s                                      |
| Buhar sıcaklığı                                | 287 °C                                       |
| Buhar basıncı                                  | 7 MPa                                        |
| Çekirdek eşdeğer çapı                          | 3,5 m                                        |
| Çekirdek yüksekliği                            | 2,2 m                                        |
| Yakıt değişim aralığı                          | 24 ay                                        |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı | 45 GW d/t (GW gün/ton)                       |

Ekonomik açıdan bakıldığında, IMR, CCR ve büyük reaktör (ABWR) için yapım maliyetleri üzerine tahmini sonuçlar aynı değerlendirme yöntemi kullanılarak Şekil 4.40'ta verilmektedir. Şekil 4.40'ta kilowatt başına elektrik cinsinden ünite kurulum birim maliyeti IMR, CCR ve ABWR teknolojilerine göre karşılaştırılmaktadır. Değerler 1356 MWe gücündeki ABWR tasarımına göre normalize edilmiştir. Buna göre IMR ve CCR konseptleri neredeyse tipik bir ABWR ile aynı ekonomik seviyededir. Bu ekonomik başarının ana sebebi sistem ve bileşenlerin elimine edilerek basitleştirilmesi ve dolayısıyla muhafaza kabının ebadının küçülmesidir. Ek olarak, yapıların küçülmesi yapım ve inşaat mühendisliği maliyetlerini azaltmaktadır. An-

cak bu değerdendirmede yeni kurulacak santralin mevcut santralin şalt sahasını ve santral limanını paylaştığı göz önüne alındığından yeni bir sahaya kurulacak bu tip tesisler için ek maliyetler ortaya çıkacaktır.

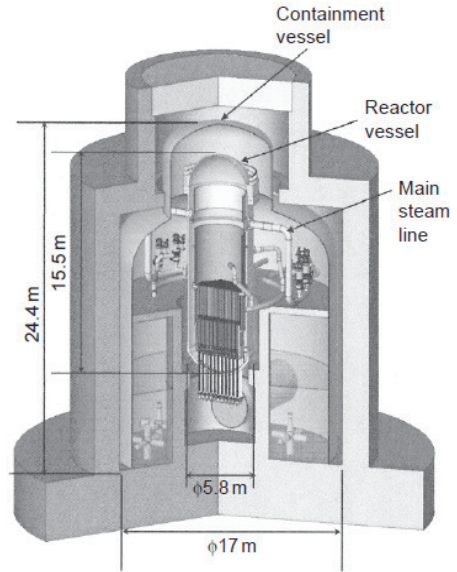


Şekil 4.40: IMR ve CCR'nin inşaat maliyeti değerdendirmesi [4.44]

### DMS (Double MS – Modular Simplified and Medium Small Reactor)

DMS, JAPC koordinasyonu ile Hitachi tarafından geliştirilen basitleştirilmiş BWR tasarımıdır. Çekirdek yüksekliği kısaltılarak ve resirkülasyon pompaları olmaksızın doğal soğutma ile reaktör çekirdeği soğutulmaktadır. Sistem basitleştirilmesi adına karakteristik özelliklerinden biri buhar-su ayırıcı ve kurutucunun elimine edilmesi ve buhar-su ayırma süreci için yer çekimi ile ayırma mekanizmasının bulunmasıdır.

Az gelişmiş elektrik şebekesi ve altyapısının olduğu bölgelerde kullanımı amacıyla geliştirilmiştir. Bölgesel ısıtma, deniz suyu arıtma vb. elektriksel olmayan uygulamalarda da kullanılabilir. Doğrudan çevrim kullanıldığından birincil çevrimde çekirdekte üretilen buhar, türbine doğrudan gönderilir. Birincil çevrim, muhafaza (containment) sistemi içinde reaktör çekirdeği ve iç donanımları, reaktör basınç kabı ve soğutucu/buhar borulamaları içerir. Reaktör soğutucusu akışı doğal sirkülasyon ile



Şekil 4.41: DMS tasarımı genel görünüm [4.44]

sağlandığından reaktör soğutucu pompası (RCP) kullanılmaz. Bu durum akış kaybı kazasını elimine etmektedir. Normal işletme koşullarında, beklenen geçici olaylar ve kaza durumunda çekirdek doğal sirkülasyonla soğutulur.

**Tablo 4.13:** DMS tasarım hedefleri ve özellikler

| Parametre                                      | Değer                                        |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Geliştirici                                    | Hitachi                                      |
| Reaktör tipi                                   | BWR                                          |
| Hedeflenen güç çıkışları                       | 300 – 600 MWe                                |
| Hedeflenen yapım maliyeti                      | Büyük güçlü reaktörlerle aynı veya daha az   |
| Hedeflenen kapasite faktörü                    | >%90                                         |
| Hedeflenen güvenlik                            | Mevcut santrallerle en azından aynı seviyede |
| Hedeflenen inşaat süresi                       | < 24 ay                                      |
| Lisanslamaya uygunluk                          | Mevcut lisanslama için uygun                 |
| Reaktör gücü                                   | 428 MWe                                      |
| Çekirdek termal çıkışı                         | 1200 MWt                                     |
| Sistem basıncı                                 | 7,2 MPa                                      |
| Birincil sistem giriş/çıkış sıcaklığı          | 215/287 °C                                   |
| Birincil soğutma akış hızı                     | 3,2 t/s                                      |
| Buhar sıcaklığı                                | 287 °C                                       |
| Buhar basıncı                                  | 7,2 MPa                                      |
| Çekirdek eşdeğer çapı                          | 4 m                                          |
| Çekirdek yüksekliği                            | 2,0 m                                        |
| Yakıt değişim aralığı                          | 24 ay                                        |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı | 45 GW d/t (GW gün/ton)                       |

Şekil 4.41’de DMS tasarımının genel görünümü ve Tablo 4.13’de ise tasarım hedefleri ve özellikler verilmiştir.

Güç çıkışı 428 MWe, yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı (average discharge burnup) 45 GW d/t (GWgün/ton) ve yakıt çevrimi 24 aydır. Doğal sirkülasyonlu çekirdek soğutma için sürüş kuvvetini artırmak amacıyla çekirdeğin etkin uzunluğu 2m’ye kısaltılmıştır. Kaynar su reaktörüne benzer şekilde sistem basıncı 7,2 MPa’dır.

Reaktör çekirdeği 400 adet yakıt demeti içerir ve aktif yakıt uzunluğu 2m’dir. Aktif yakıt uzunluğunun kısa olması çekirdek içinde basınç düşmesini azaltır ve doğal sirkülasyonu mümkün kılmaktadır. Kısa aktif yakıt uzunluğu gerekli termal çıkışı sağlamak adına yakıt demeti sayısını artırır. Bu nedenle reaktör basınç kabının çapı ve kontrol çubuğu sürücülerinin sayısını artırır fakat reaktör basınç kabının yüksekliğinin azaltılması ile doğal sirkülasyon debisi azaltılabilir.



DMS reaktöründe 2 farklı “reaktör devreden çıkarma sistemi” vardır. Kontrol çubuğu sürüş sistemi ve hazırda bekleyen sıvı kontrol sistemi reaktivite kontrol sistemi olarak kullanılmaktadır.

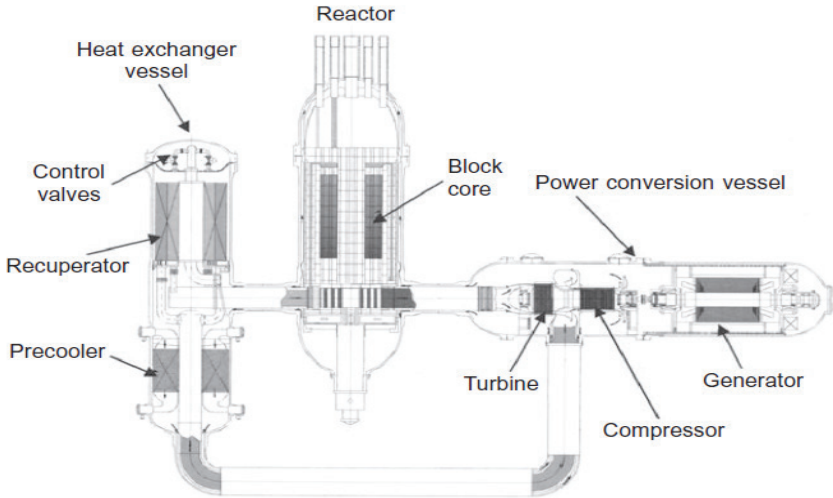
Güvenlik sistemi tasarımı için DMS; pasif akümülatör sistemli (passive accumulator system) basitleştirilmiş acil durum çekirdek soğutma bulundurur.

### **GTHTR300 (Gas Turbine High Temperature Reactor 300)**

GTHTR300, JAEA (Japan Atomic Energy Agency) tarafından önerilen yüksek termal verimli gaz türbini çevrim sistemli, yüksek sıcaklıklı helyum gaz soğutmalı modüler reaktördür. Tasarıma ait genel görünüm Şekil 4.42’de verilmiştir. Tasarımda, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör ile doğrudan çevrimli gaz türbini birleştirilmiştir.

Çok amaçlı kullanıma uygun, doğası itibariyle kendiliğinden güvenli (inherently-safe) ve saha uyumlu küçük modüler reaktörler olup 2030 yılına kadar ticarileştirilmesi için geliştirilmektedir. IV. Nesil reaktör olarak mevcut hafif su reaktörleri ile karşılaştırıldığında önemli avantajlar sunmaktadır. GTHTR300 önemli ölçüde basitleştirilmiş sistem tasarımı, yüksek termal verim ve JAEA’nın yüksek sıcaklıklı mühendislik test reaktörü, HTTR (high temperature engineering test reactor) ile elde edilen kabul görmüş teknolojileri kullanarak geliştirilmiştir. Ayrıca ekonomisi ve iyi güvenlik özellikleri ile %45-50 verimle enerji üretmek üzere tasarlanmıştır. Tasarımı basitleştirmek adına doğrudan çevrim helyum gaz türbini kullanılmaktadır.

GTHTR300 reaktörüne ait hedefleri ve özellikleri Tablo 4.14’de ise belirtilmiştir.



**Şekil 4.42:** GTHTR300 tasarımı genel görünüm [4.45]

**Tablo 4.14:** GTHTR özellikleri

| Parametre                        | Değer                                                         |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Güvenlik amacı                   | Radyoaktif salınımı tamamen pasif sistemle engelleme          |
| Saha gereksinimlerini karşılamak | BWR                                                           |
| Tahliye gerekliliği              | 300 – 600 MWe                                                 |
| Saha koşulları                   | Mevcut hafif su reaktörlerinin olduğu saha veya yeni bir saha |
| Sismik koşullar                  | Yeni jenerasyon hafif su reaktörleri ile aynı                 |
| Yakıt çevrimi                    | 100 GW d/t'den daha fazla                                     |
| Güç seviyesi                     | 100-4000 MWe/saha, Modüler tip 100-300 MWe/ünite              |
| Santral Ömrü                     | 60 yıl                                                        |
| Emremsizlik                      | >%90                                                          |
| Maliyet                          | 40-50 milyar yen/unit, Elektrik maliyeti 4 yen/kWh            |
| Reaktör gücü                     | 280 MWe                                                       |
| Çekirdek termal çıkışı           | 600 MWt                                                       |
| Reaktör giriş/çıkış sıcaklığı    | 587/850 °C                                                    |
| Soğutucu basıncı                 | 7 MPa                                                         |
| Soğutucu kütle debisi            | 438 kg/s                                                      |
| Kor yüksekliği                   | 8 m                                                           |
| İç/dış çekirdek çapı             | 3,6 / 5,5 m                                                   |
| Tasarım durumu                   | Ön lisanslamaya yönelik temel tasarım tamamlandı              |

GTHTR-300'ün güç çıkışı 280 MWe, ortalama yanma oranı 120 GW d/t (GW gün/ton), yakıt çevrimi 24 aydır. Blok tipli yakıtının ortalama uranyum zenginleştirilmesi %14'tür. Reaktör çekirdeğinin efektif yüksekliği 8m'dir. Reaktör çekirdeği helyum gazı ile soğutulur ve çekirdek giriş/çıkış sıcaklıkları 6,8 MPa sistem basıncı altında 587/850°C olduğundan sıcaklık nispeten yüksektir.

Güvenlik sistemi tasarımı olarak GTHTR300 konsepti, reaktöre özgü karakteristik ile ortaya konulabilen sıfır ciddi kaza (severe accident free) hedefini benimsemiştir. Bu karakteristik ile çekirdeğin erime olasılığı yoktur ve seramik yakıt tercihi ve grafit çekirdek kullanıldığından reaktör çekirdeği yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Anormal olaylar oluşsa bile çekirdek güç yoğunluğunun düşük, ısı kapasitesinin büyük olması nedeniyle ve negatif reaktivite geri beslemesi ile birlikte geçici olayların yavaş şekilde olması beklenmektedir. Ayrıca, soğutucu olarak kullanılan helyum gazı çok kararlıdır ve herhangi bir mekanik enerji üretimi veya salınımına sebep olmaz. Maksimum yakıt sıcaklığı kaza anında bile 1600 °C'den düşük olabilmekte ve yakıt bütünlüğü sağlanmaktadır. Bu sebeplerle tasarım muhafaza (containment) gerektirmez. Seramik kaplama yakıt muhafazasının bütünlüğünü korumakta; grafit reaktör çekirdeği, negatif reaktivite, düşük güç yoğunluğu ve yüksek termal iletkenlik sağ-

lamakta olduğundan reaktördeki bozunum ısısı doğal taşınımlı hava soğutma ile herhangi bir ekipmana ve operatör müdahalesine gerek kalmadan soğutucu kaybı veya santral kararması gibi ciddi kaza durumlarında bile atılabilmektedir

GTHTTR300 tasarımı, elektrik üretimi, termokimyasal hidrojen üretimi, arıtma, atık ısı kullanarak kojenerasyon ve çelik üretimi amacıyla kullanılabilir. Maksimum hidrojen üretimi 120 t/d olup bir milyon adet arabanın yakıtı için yeterlidir. 280-300 MWe elektrik enerjisine ek olarak deniz suyu arıtma ile 55000 m<sup>3</sup>/d içilebilir su ile yaklaşık 250.000 kişiye sağlanabilir. Yıllık 650.000 ton çelik üretilebilir.

Kendiliğinden güvenli (inherent-safe) özelliği ile maliyeti ve yüksek sıcaklıkta iletim kaybını azaltmaya yönelik tüketim merkezlerine özellikle sanayi tüketiminin gerçekleştiği yere yakın inşa edilebilir. Denizden uzak sahalarda geniş ölçüde soğutma suyuna ihtiyaç duyulmadan yapılabildiğinden kuru soğutma ekonomik olarak uygulanabilir olabilmektedir.

2003 yılının sonunda temel tasarım bitirilmiştir ve elektrik şirketleri, üniversiteler, tedarikçiler tarafından gözden geçirilmiştir. Ön maliyet değerlendirme sonuçlarına göre, inşaat maliyeti yaklaşık 200.000 yen/kWe'dir ve elektrik üretim maliyeti yaklaşık 4,5 yen/kWh'dir.

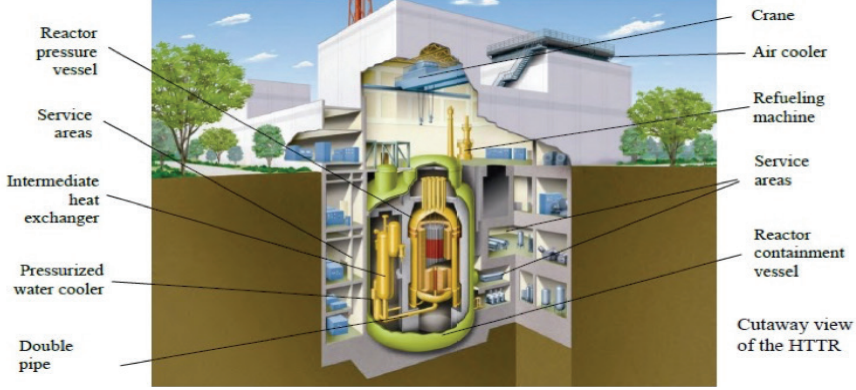
Bu konsepti esas alan 50 MWt'lik HTR50S küçük reaktör konseptinin temel tasarımı Kazakistan iş birliği ile devam etmektedir. Bu konsept, 750°C reaktör çıkış sıcaklığı koşullarında bir buhar üretici kullanmaktadır. Aynı zamanda MHR-50 (Mitsubishi Small-sized High Temperature Gas-cooled Modular Reactor-50) konsepti MHI tarafında JAEA koordinasyonu ile geliştirilmektedir. Bu reaktör, 50 MWe çıkış güçlü, mümkün olduğu kadar JAEA'nın HTTR reaktörü ile onaylanan teknolojileri kullanan, bir buhar üretici ve bir buhar türbini çevrim sistemine sahip yüksek sıcaklıklı helyum gaz soğutmalı modüler reaktör tasarımıdır.

### ***HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor)***

HTTR yüksek sıcaklıklı helyum gazı soğutmalı, 30 MWt çıkışlı test reaktörüdür. HTTR yüksek sıcaklıklı korda radyasyon testleri ve yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörün teknik temellerini iletirmek için yapılmıştır. İlk kritiklik 1998 yılının Kasım ayında gerçekleşmiş ve tam güce 850°C kor çıkış soğutucu sıcaklığı ile 2001 yılı Aralık ayında erişilmiştir. Maksimum soğutucu sıcaklığı olan 950°C'ye 2004 yılı Nisan ayında erişilmiştir. Kor girişi soğutucu sıcaklığı 395°C'dir.

Şu anda, reaktör, güvenlik kabul testleri için kullanılmaktadır. Bu testler, uluslararası iş birliği altında özünde var olan güvenlik karakteristiklerini göstermek amacıyla gerçekleştirilir. Kontrol çubuğunun geri çekilmesi, kor akış kaybı, kor soğutma kaybı gibi testleri içerir. Aynı zamanda, nükleer ısı kullanımı için teknik temelleri kurmak

için ilgili Ar-Ge, sudan hidrojen üretimi için iyot sülfür süreci için ilgili Ar-Gr gerçekleştirilmektedir. HTTR tasarımının genel görünümü Şekil 4.43'te ve temel özellikleri Tablo 4.15'de verilmiştir.



**Şekil 4.43:** HTTR30 tasarımı genel görünüm [4.44]

**Tablo 4.15:** HTTR'ye ait özellikler

| Parametre                                      | Değer                                                            |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Kor termal çıkış                               | 30 MWt                                                           |
| Geliştirici                                    | JAEA, MHI, Toshiba, IHI, Hitachi, Fuji Electric, NFI, Toyo Tanso |
| Soğutucu/Moderator                             | Helyum/Grafit                                                    |
| Reaktör giriş/çıkış soğutucu sıcaklığı         | 395/850°C veya 950°C                                             |
| Soğutucu basıncı                               | 4 MPa                                                            |
| Soğutucu kütle debisi                          | 12,4 kg/s ( 850°C için), 10,2 kg/s ( 950 °C için)                |
| Güvenlik sistemi                               | Aktif                                                            |
| Kor eşdeğer çapı                               | 2,3 m                                                            |
| Kor yüksekliği                                 | 2,9 m                                                            |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı | 22 GW d/t                                                        |
| Maksimum yakıt sıcaklığı                       | 1190 °C (850°C için), 1320°C ( 950 °C için)                      |
| Tasarım Durumu                                 | İşletmede                                                        |

#### 4S (Super Safe Small Simple)

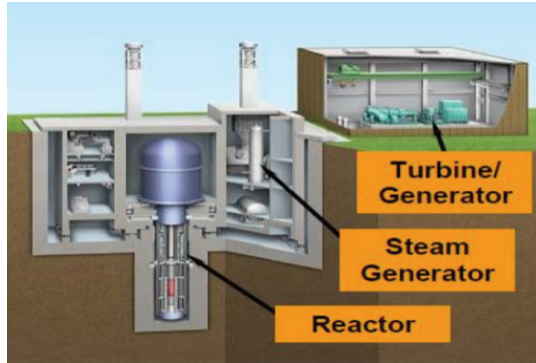
4S reaktör tasarımı, CRIEPI (Central Research Institute of Power Industry) ile koordinasyonlu olarak Toshiba Corporation tarafından geliştirilen tekrar yakıt yüklemesi olmaksızın çok uzun işletme periyoduna ve iyi güvenlik özelliklerine sahip metal yakıtlı, küçük modüler, sodyum soğutmalı havuz tipli hızlı reaktördür.

Elektrik enerjisi talebine bağılı olarak güç çıkışı 10 MWe (30 MWt) veya 50 MWe (135 MWt) olabilmektedir. Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı yaklaşık 35 GW d/t ve yakıt yenileme aralığı 30 yıldır. 4S'in reaktör koru, 30 MWt reaktör için 30 yıl ömre ve 135 MWt reaktör için 10 yıl kullanım ömrüne göre tasarlanmıştır.

4S konsepti, yakıt yüklemesi yapmayan, daha az bakım gereksinimlerine ve yüksek güvenlik özelliklerine sahip bir tasarım olup uzak bölgeler, maden sahaları vb. yerlerin enerji beslemesi için uygun olabilmektedir. Aynı zamanda elektriksel olmayan uygulamalarda kullanılabilir. Elektriksel olmayan uygulamalardan biri deniz suyu arıtma diğeri yüksek sıcaklıklı elektroliz süreci kullanarak hidrojen ve oksijen üretimi olabilmektedir. Deniz suyu arıtma sistemi için 50 MWe 4S santrali 168.000 m<sup>3</sup>/gün temiz su üretebilir. Hidrojen üretimi için ise 10 MWe santral 3.000 Nm<sup>3</sup>/h ve 50 MWe santral 15.000 Nm<sup>3</sup>/h hidrojen sağlayabilir.

Tasarımda kor, primer elektromanyetik pompalar ve orta ısı eşanjörü (IHX), birincil reaktivite kontrol sistemini oluşturan hareketli reflektörler, yedek reaktör kapatma sistemi olan nihai kapatma çubuğu, radyal muhafaza donanımları, kor destek plakası, soğutucu giriş modülleri ve yakıt alt bileşenleri reaktör kabına yerleştirilmiştir. Reaktör basınç kabının tasarım ömrü 60 yıldır.

Reaktör koru, 3,5 metre olan yüksekliğine göre nispeten dar olup korun etrafındaki hareket edebilir 6 segmentli silindirik reflektör ile kontrol edilir. Kor, yer çekimi ile korun altındaki bölgeye reflektörün düşürülmesi ile devre dışı edilebilir. Reflektör; 6 adet reflektör, segmentleri takılı kalsa bile reaktör korunu kapatabilmektedir. Hareket edebilir reflektör, kademeli hareket sağlar ve böylece korun ömrü boyunca yanma reaktivitesi kaybını kompanse eder. Böylece reaktör korunun yan taraflarında reaktivite kontrolü gereksizleşir ve reaktör işletmesinde basitleştirme için önemli bir faktördür. Su-buhar sistemi ile elektrik çıkışı kontrol edilerek yük takibi işletme modu için uygun bir reaktördür.



**Şekil 4.44:** 4S Reaktör tasarımı genel görünümü [4.46]

Reaktör tasarımı Şekil 4.44'te görüldüğü gibi reaktör kabı yer seviyesinin altına yerleştirildiğinden uçak çarpmalarına karşı önemli bir koruma sağlayarak tasarım emniyeti artırılmaktadır. Muhafaza yapısı (containment) sistemi, üst kubbe ve koruma kabından oluşur ve reaktör kabını ve reflektör sürüş ekipmanını çevreler.

Kor ısı birincil döngüden tekli orta ısı taşıma sistemine (single intermediate heat transport system) aktarılır ve daha sonra buhar üreticinde buhara dönüştürülür ve geleneksel buhar türbini ile jeneratör tahriki sağlanmaktadır.

4S nükleer santralinde alt ve üst yapılar için az alan gerektiğinden 4S santrali küçük sahalara inşa edilebilmektedir.

4S santrali sadece doğal sirkülasyon kullanan yedekli artık ısı bertaraf sistemi ve negatif reaktivite katsayılarına sahip metalik kor gibi bazı pasif güvenlik özelliklerine sahiptir. 2 adet birbirinden bağımsız ve yedekli artık ısı bertaraf sistemi vardır. Artık ısı bertaraf sistemleri, orta reaktör yardımcı soğutma sisteminden (IRACS), reaktör kabı yardımcı soğutma sisteminden (RVACS) oluşur. IRACS, orta ısı taşıma sisteminde kuru hava soğutucu kullanarak bozunum ısını ortadan kaldırır. RVACS ise sodyum soğutucudan halka yapıya radyal olarak transfer edilen ısıyı bertaraf eder. Halka yapı, koruma kabı ve silindirik çelik ısı kollektörü arasında zemin altındaki silindirik beton duvar içinde yer alır. 4S Tasarımına ait özellikler Tablo 4.16'da verilmektedir.

**Tablo 4.16:** 4S tasarımına ait özellikler

| Parametre                                      | Değer                                              |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Elektriksel güç çıkışı                         | 10 MWe                                             |
| Kor termal çıkışı                              | 30 MWt                                             |
| Döngü sayısı                                   | 1                                                  |
| Soğutucu/Moderator                             | Sodyum                                             |
| Birincil sodyum giriş/çıkış sıcaklığı          | 355/510°C                                          |
| Birincil sodyum debisi                         | 100 GW d/t'den daha fazla                          |
| (Primary sodium flow rate)                     | 547 t/h                                            |
| Orta sodyum giriş/çıkış sıcaklığı              | 60 yıl                                             |
| (Intermediate sodium inlet/outlet temperature) | 310/485°C                                          |
| Orta sodyum debisi                             | 40-50 milyar yen/unit, Elektrik maliyeti 4 yen/kWh |
| (Intermediate sodium flow rate)                | 482 t/h                                            |
| Türbin girişi buhar şartları                   |                                                    |
| Debi                                           | 44,2 t/h                                           |
| Basınç                                         | 10 MPa                                             |
| Sıcaklık                                       | 450°C                                              |
| Kor eşdeğer çapı                               | 0,95 m                                             |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı | 34 GW d/t                                          |
| Kordaki yakıt demeti sayısı                    | 18                                                 |
| Sismik tasarım                                 | Sismik izolatör                                    |
| Tasarım Ömrü                                   | 60 yıl                                             |
| Tasarım durumu                                 | Detaylı tasarım                                    |

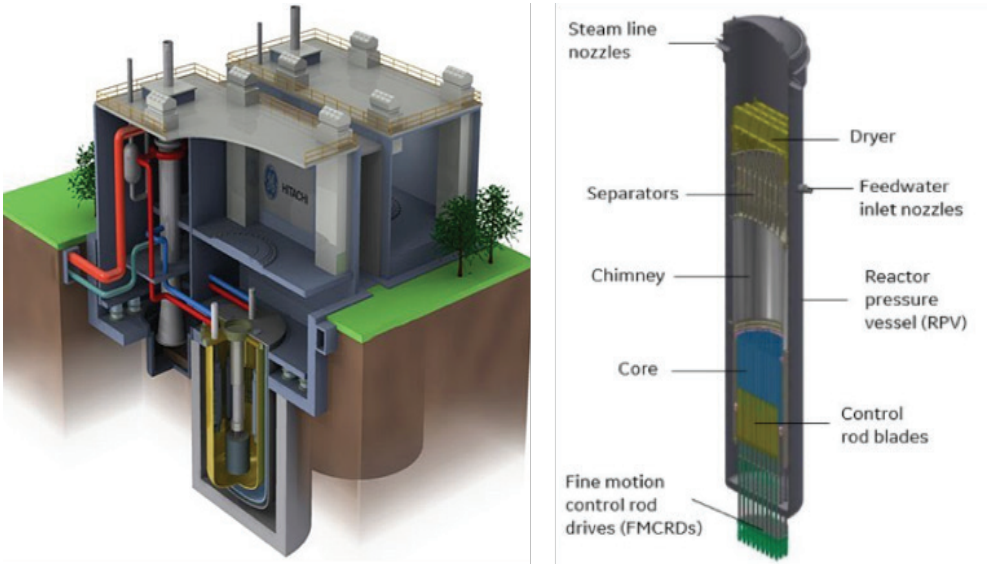


## JAPONYA'DAKİ DİĞER SMR ÇALIŞMALARI

### BWRX-300 (ABD ve Japonya)

Su soğutmalı SMR geliştirmesine yönelik en yeni tasarımlardan biri BWRX-300 reaktörüdür. General Electric ve Hitachi küresel ortaklığında geliştirilmektedir. Tasarımla ilgili ilk bilgilendirme 2018'de ortaya çıkmıştır. Dominion Company projenin yatırımcısı konumundadır.

BWRX300 basitleştirilmiş BWR olup ağırlıklı olarak 1520 MWe ESBWR tasarımı ve mühendisliğini kullanmaktadır. ESBWR henüz inşa edilmemiş ancak Amerikan Nükleer Düzenleme Komisyonu (US NRC) tarafından belgelendirilmiştir.



Şekil 4.45: BWRX300 tasarımı genel görünüm [4.47]

Tasarımın ana amacı, tasarım basitleştirme ile santral yatırım maliyetini minimize etmektir. ESBWR gibi BWRX-300 birincil soğutucunun doğal sirkülasyonunu ve çok sayıda pasif güvenlik özellikleri kullanır.

2019'da GE-Hitachi, çoklu anlaşmalar, özellikle Polonya, Estonya ve Çek Cumhuriyeti gibi Doğu Avrupa ülkeleri ile çoklu anlaşmalar yaptığını duyurmuştur. Santral tedarikçisi, US NRC ile olan lisanslama faaliyetleri 2020 yılının başında başlatmıştır ve 2030 yılına kadar ilk kurulumun gerçekleşmesi muhtemeldir.

BWRX300 tasarımının kesiti Şekil 4.45'te ve temel özellikleri Tablo 4.17'de verilmiştir.

**Tablo 4.17:** BWRX-300 tasarımına ait özellikler

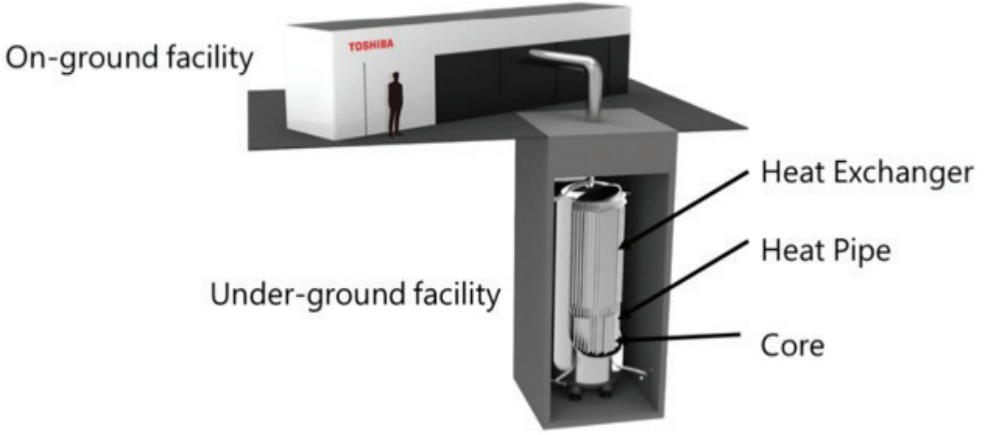
| Parametre                                      | Değer                                             |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Geliştirici                                    | GE-Hitachi                                        |
| Reaktör tipi                                   | Kaynayan su reaktörü (BWR)                        |
| Soğutucu                                       | Hafif su                                          |
| Termal çıkış                                   | 870 MWt                                           |
| Elektriksel Güç                                | 270-290 MWe                                       |
| Kor giriş/çıkış sıcaklığı                      | 270/287°C                                         |
| Yakıt demeti sayısı                            | 240                                               |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı | 49,5 GW d/t                                       |
| Tasarım ömrü                                   | 60 yıl                                            |
| Gerekli saha                                   | 8400 m2                                           |
| Güvenlik                                       | Tamamen pasif                                     |
| Sismik Tasarım                                 | 0,3g                                              |
| Tasarımın durumu                               | Ön lisanslama ABD, İngiltere ve Kanada'da başladı |

### **MoveLuX**

MoveLux, Toshiba Corporation tarafından geliştirilen çok küçük mobil reaktör olup 10 MWt termal ve 3-4 MWe çıkışa sahiptir. Isı borusu birincil kor soğutma olarak kullanılarak pasif güvenlik ve basitleştirilmiş sistemi sağlar. Kalsiyum hidrit 800°C gibi yüksek sıcaklıkta çalışır ve yavaşlatıcı olarak kullanılır. Birincil devrede sodyum, ikincil devrede helyum kullanılmaktadır. Brayton çevrimi ile elektrik üretimi yapan sistemde ısı atmosfere atıldığından su kaynağı gerektirmez. Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı 1 GWd/t, tasarım ömrü 10-15 yıl, gerekli alan 100m<sup>2</sup>'dir. Konsept tasarım durumunda olup 2028 yılında, sistemin tanıtılmasının nükleer yakıtsız yapılması, 2030'larda ise türünün ilk örneği olarak tanıtılması planlanmaktadır. Çok amaçlı bir reaktör olup elektrik üretimi, hidrojen ve yüksek sıcaklıklı ısı üretimi amacıyla tasarlanmıştır. Küçük akıllı şebekelerde baz yük santrali olarak kullanılmasının yanında yenilenebilir kaynaklarla birlikte çalıştırılması da mümkündür. Tasarımın genel görünümü Şekil 4.46'da gösterilmektedir.

1970'lerde inşa edilen küçük nükleer güç istasyonları hariç Japonya'da herhangi bir SMR kurulumu yapılmamıştır. 11 Mart 2011'deki deprem ve akabindeki Fukushima Dai-ichi Nükleer Santrali'ndeki ciddi kazadan sonra Japonya'da SMR dahil olmak üzere nükleer santral yapımı durdurulmuştur. Nükleer enerjinin kullanımına yönelik politika Japonya'da tartışma halinde olduğundan ve karara bağlanmadığından, SMR konuşlanmasının Japonya'daki geleceği hakkında tam olarak bir şey söylenememektedir. Ancak bazı Japon SMR tasarımlarının kurulum faaliyetleri diğer ülke-

lerde devam etmektedir. Örnek olarak 4S tasarımının Alaska'da yapımı için faaliyetler sürmekte ve Amerika Nükleer Düzenleme Komisyonu (US Nuclear Regulatory Commission) tarafından değerlendirilme sürecindedir. Diğer bir örnek HTR50S kurulum faaliyetleri Kazakistan'da devam etmektedir.



**Şekil 4.46:** MoveLux tasarımının genel görünümü [4.48]

Fukushima Dai-ichi kazasından sonra güvenlik gereksinimleri daha katılaşmıştır. Bazı SMR tasarım konseptleri değiştirilmesine ve güncellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Nükleer santrallerinin kurulumu, Japonya'da kolay olması beklenmediğinden, SMR inşasının gelecekte Japonya dışında olması daha ihtimal görülmektedir. Deneyim sahibi olunan hafif su reaktörü temelli SMR ve diğeri yeni ve hafif su reaktörünü baz almayan tasarımların gelecekte geliştirilmesi öngörülmektedir.

## 4.8. KANADA

Uzun yıllardır nükleer araştırma ve teknolojiye lider ülkelerden biri olan Kanada, 19 reaktör 13,5 GWe kapasite ile elektriğinin yaklaşık %15'ini nükleer enerjiden sağlamaktadır. Nükleer santrallerin çoğu Ontario'da bulunmaktadır [4.8] <sup>5</sup>.

Kanada'daki nükleer enerji 1942'de ağır su nükleer reaktörün araştırılması ve tasarlanması amacıyla İngiliz-Kanada ortak laboratuvarı olan Montreal Laboratuvarı'nın kurulmasıyla başlar. 1967-1970 yılları arasında deneysel minyatür reaktör geliştirilmiştir. 1952'de Kanada Atom Enerji Şirketi kurulmuştur. Kanada'nın ilk nükleer santrali olan Nuclear Power Demonstration'ı (NPD) 20 MWe kapasite ile Haziran 1962'de çalışmaya başlamıştır. Doğal uranyum yakıtı ve ağır su yavaşlatıcısı ve soğutma sıvısı kullanan dönemin önemli reaktörü olarak kendini göstermiştir. Bu yapımla Kanada'da ve başka yerlerde inşa edilen ve işletilen ağır su reaktörü olarak bilinen ve CANada Deuterium Uranium ifadesinin kısaltması olarak kullanılan CANDU reaktörün temeli oluşturulmuştur. 1961'den itibaren bir tür basınçlı ağır su reaktörü (PHWR) olan CANDU geliştirilmeye başlanmış ve hem Kanada'da hem de Hindistan, Pakistan, Arjantin, Güney Kore, Romanya ve Çin'de inşa edilerek işletilmiştir. İlk tam ölçekli CANDU reaktörü 26 Eylül 1968'de Ontario'daki Huron Gölü kıyısındaki Douglas Point'te işletmeye alınmıştır.

Kanada, ülkelerin "Net Sıfır" hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olmak için kabul görmüş olgun tasarımı ve nükleer alandaki tecrübesini SMR konusunda da geliştirmek üzere Ar-Ge çalışmalarına devam etmektedir. Bu alanda kabul görmüş CANDU® teknolojisine dayanan 300MW(e) bir reaktörü, basitleştirilmiş sistemler, daha az bileşen ve modüler bir tasarıma sahip olacak şekilde geliştirmeye devam etmektedir. Tasarım hedefleri, kompakt bir düzende yüksek kapasite faktörüne sahip düşük maliyetli, düşük karbonlu bir güçtür.

Bir CANDU SMR kısaca CSMR, kabul görmüş teknolojiyi kullanarak hızlı bir dağıtım sağlamak, yakıt üreticilerinin doğal uranyum yakıtını kullanarak enerji bağımsızlığını korumak ve zenginleştirilmiş uranyum yakıtı ithal etme ihtiyacını ortadan kaldırmak için tasarlanmıştır. Bu, yüksek performanslı bir tedarik zincirinin tanımlanmasını ve kullanımını en üst düzeye çıkarır, proje teslim riskini en aza indirir ve ülkelerde yüksek teknoloji işler yaratır. CSMR, daha küçük ve daha esnek bir karbonsuz elektrik üretim kaynağı ile %90 kapasite faktörüne sahip bir III.+Nesil reaktördür. Kompakt şekli ve şebeke kararlılığı özellikleri ile çok çeşitli potansiyel reaktör alanlarına uyum sağlamaktadır.

C-SMR tasarımın genel teknik özellikleri Tablo 4.18'de verilmiştir.

<sup>5</sup> Kanada bölümü 4.8 nolu kaynaktan yararlanılarak yazılmıştır.

**Tablo 4.18:** CSMR tasarımın temel teknik özellikleri

| Parametre                                                | Değer                                                                  |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Teknoloji geliştiricisi, menşe ülke                      | Candu Energy Inc. SNC                                                  |
| Lavalin Grup Üyesi, Kanada                               | 30 MWT                                                                 |
| Reaktör tipi                                             | Basınçlı Ağır Su Reaktörü                                              |
| Soğutucu/yavaşlatıcı                                     | Ağır Su (D2O)                                                          |
| Termal/elektrik kapasitesi, MW(t)/MW(e)                  | 960 / 300                                                              |
| Birincil döngü                                           | Cebri                                                                  |
| NSSS Çalışma Basıncı (birincil/ikincil), MPa             | 9,9 / 4,6                                                              |
| Kor Çıkış Soğutucu Sıcaklığı (oC)                        | 310                                                                    |
| Yakıt tipi/demet dizisi                                  | 37 element                                                             |
| Çekirdekdeki yakıt demeti sayısı                         | 2064                                                                   |
| Yakıt zenginleştirme (%)                                 | Doğal Uranyum; zenginleştirilmemiş                                     |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı (GWd/ton) | 5,8                                                                    |
| Yakıt değişimi                                           | Çalışır durumda değişebilir                                            |
| Reaktivite kontrol mekanizması                           | Bölge kontrolörleri, mekanik ayarlayıcılar                             |
| Güvenlik sistemlerine yaklaşım                           | Ortak aktif ve pasif sistemler                                         |
| Tasarım ömrü (yıl)                                       | 70 yıl                                                                 |
| Tesis ekolojik ayak izi (m2)                             | 21 000                                                                 |
| Reaktör Basınç Kabı yükseklik/çap (m)                    | NA; Calandria                                                          |
| Reaktör Basınç Kabı ağırlığı (metrik ton)                | 300                                                                    |
| Sismik Tasarım (SSE)                                     | 0,3g                                                                   |
| Yakıt döngüsü gereksinimleri / Doğal                     | Doğal Uranyum, tek yönlü                                               |
| Ayırt edici özellikler                                   | Doğal Uranyum yakıtı (zenginleştirme yok); yüksek derecede yerleştirme |
| Tasarım durumu                                           | Konsept                                                                |

CSMR, CANDU reaktörlerini işleten birçok ülkede lisanslı, onlarca yıllık kabul görmüş bir tasarıma dayanmaktadır. Fukushima sonrası, tasarım özellikleriyle modern düzenleyici koşullarını karşılamaktadır. CSMR, doğal uranyum kullanımına bağlı bir tasarım olduğundan zenginleştirilmiş yakıt veya yakıt yeterlilik programı gerektirmez ve bu nedenle yavaşlatıcı ve soğutma için ağır su kullanır.

Yatay basınçlı tüplü, basınçlı ağır su reaktörü olarak tasarımda reaktör çekirdeği, bir dizi basınç tüpünü barındıran ve calandria adı verilen yatay konumlanmış ve birçok gövde-borulu reaktör segmentinden yani yakıt demetlerini içeren tüplerden oluşur. Reaktör soğutma sistemi bu basınç tüplerinden, iki buhar üreticinden, dört birincil sirkülasyon pompasından ve ara bağlantı borularından ve kollektörlerden oluşur. Gövde-borulu reaktör segmentleri olan yakıt tüpleri yatay konumda hep bir araya gelerek reaktör gövdesi Calandriyayı oluştururken Calandria aynı zamanda basınç

tüplerini çevreleyen ağır su ile nötronların yavaşlatıldığı ve ergime durumuna karşı da korutucu olarak görev yapabilen ve içinde işletme sırasında değiştirilebilir yakıt demetlerinin olduğu bir reaktördür.

C-SMR çekirdeği, 14x14 bir demette 176 kanaldır. Calandria dış gövde yarıçapı 285 cm'dir. Reaktör, standart CANDU doğal uranyum yakıt demetleri ile yüklenir.

Reaktör kontrolü, normal çalışma sırasında birincil reaktivite düzenleme aracı sağlamak için sekiz bölge kontrol ünitesi kullanır. Çekirdek tasarımı, bölge kontrol ünitelerinde çok küçük değişikliklerle kontrolün elde edilmesini sağlar. Reaktivite ayarlayıcı çubuklar, nötron emici çubuklar ve geleneksel CANDU tasarımlarında bulunan çözünür nötron zehirlerinin kullanılması ve bağımsız iki güvenli kapatma sistemi vardır. Büyük ölçekli CANDUlar gibi, CSMR da güvenli kapatma şartlarını yerine getirir.

Calandria, ağır su ve reflektörü içerir; koruma tankı ise hafif su içerir. Ağır su ısı taşıma sistemi, iki buhar üretici ve dört pompa ile tek bir döngü şeklindedir. Her ikisi de ters çevrilmiş U boruları ve tümleşik buhar bölmesi ile ön ısıtıcılara sahip iki buhar üretici vardır.

Basınç ve kontrol sistemi; bir basınçlandırıcı, tahliye kondansatörü, besleme pompaları, bir depolama tankı ve kontrol valflerinden oluşmaktadır.

CSMR güvenlik özellikleri, radyolojik tehlikelere karşı derinlemesine savunma sağlar. Yakıt bölmesi, boşaltılan yakıtın bozunma ısısı yüküne göre, büyük bir su hacmine sahip sağlam, sismik olarak dayanıklı bir yapıdır ve aktif soğutma sistemi kaybı durumunda günlerce pasif soğutma sağlayabilmektedir.

CSMR, pasif araçlar da dahil olmak üzere, kaza durumunda çekirdeği soğutmak için çok fazla soğutma suyu sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Buna ek olarak, en acil durumlarda hidrojen konsantrasyonlarını en aza indirmeye katkıda bulunan geniş bir muhafaza hacmine sahiptir.

CSMR'larda, reaktivite kontrol ve ölçüm cihazları; ayrı, düşük sıcaklıklı ve düşük basınçlı ortama göre tasarlanmıştır ve böylece reaktivite cihazlarının basınç etkisiyle yerinden olması önlenmiş olur. Karakteristik CANDU basınçlı boru tasarımı, ciddi kazaların meydana gelme olasılığını önler. CSMR'de bozunma ısısı giderme, üç grup iki sistem tasarımıyla bazı şartların sağlanmasıyla gerçekleştirilir:

Isı İletim Sistemindeki ısı giderme yükü, basınçlandırıcıdaki yükü de içerecek şekilde normal çalışma şartlarını kapsar. Isı İletim Sistemi, buhar üreteçlerindeki doğal ısı taşıma sistemini de katkı sağlar. Buhar üreteçlerinde yedek besleme suyu girişleri de vardır.



Acil durum çekirdek soğutma sistemi, bir soğutucu kaybı (LOCA) durumunda, soğutma işlemini gerçekleştirir.

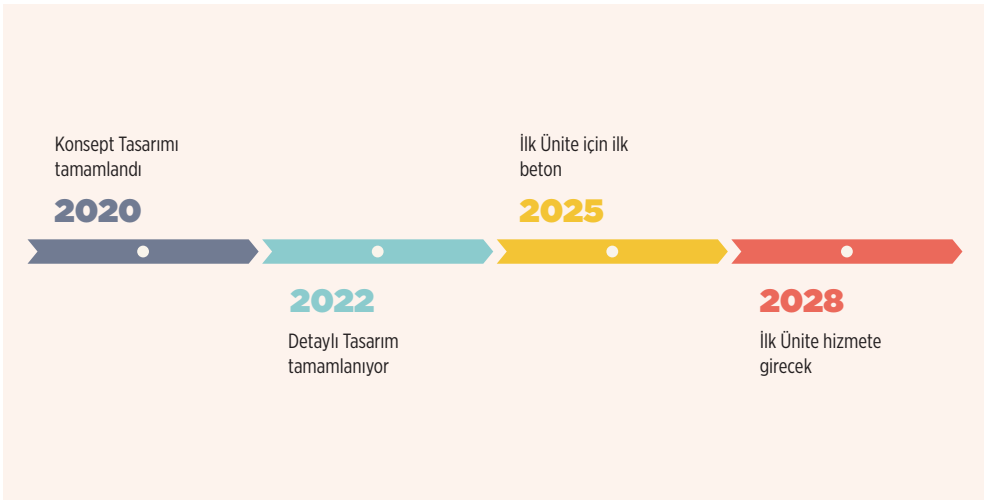
Bir soğutucu kaybı durumunda radyoaktif malzemenin dış ortama salınımını engelleyen muhafaza sistemi; bir betonarme kubbe ve bir iç çelik astar, erişim hava kilitleri, ekipman kapağı, basınç düşümü için ortam hava soğutucuları ve izolasyon sistemi ile bir betonarme muhafaza yapısını (reaktör binası) içerir.

Genel CSMR tasarım felsefesi, maliyeti azaltarak, inşaat programını kısaltarak, işletme-bakım ve yönetim maliyetlerinin düşürülmesi ve tesis ömrünün uzatılması ile toplam birim enerji maliyetinin azaltılmasıdır. Ayrıca CSMR, güvenlik, düşük radyasyon etkileşimi, yüksek kapasite faktörü ve bakım kolaylığı dahil olmak üzere geleneksel CANDU avantajlarına sahiptir. Santral, tüm işletme aşamaları için en az operatör eylemi gerektirecek ölçüde otomatikleştirilmiştir.

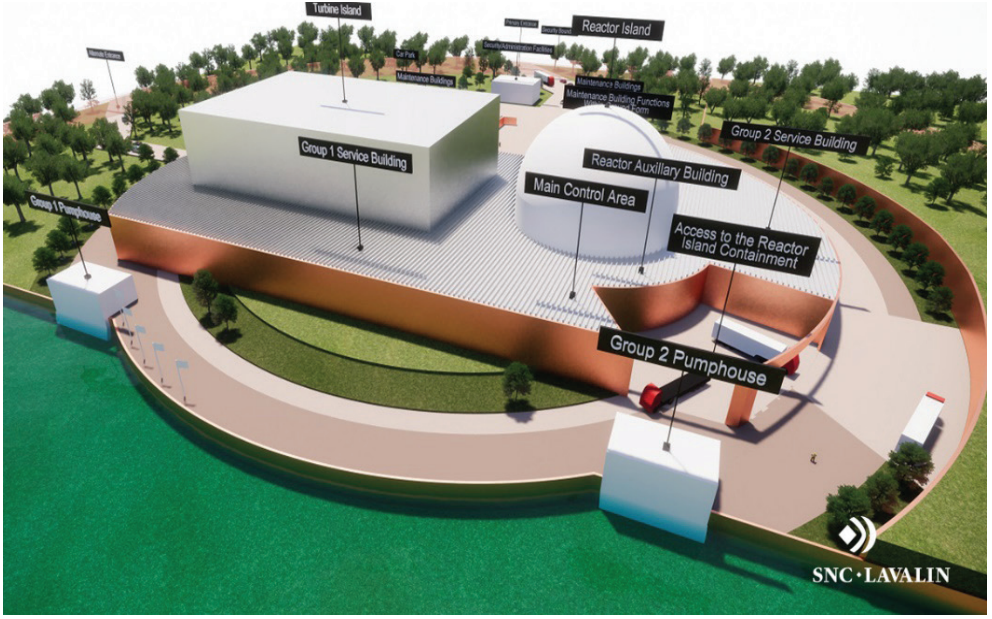
Kontrol sistemleri, iki bağımsız kapatma sistemi, acil durum çekirdek soğutma sistemi, acil ısı giderme sistemi ve muhafaza sistemini içeren güvenlik sistemleri ile tümleşik bir yapı halindedir. Bu güvenlik sistemlerinin her biri birbirinden ve aynı zamanda reaktör ve proses kontrol sistemlerinden de bağımsız olarak çalışır.

CSMR tasarımı, inşaat programını en aza indirecek şekilde düzenlenmiştir. Bu; yerleşimin basitleştirilmesi, ara yüzlerin optimize edilmesi, inşaat tıkanıklığının azaltılması, tüm alanlara erişim sağlanması, esnek ekipman kurulum ve malzeme taşıma gereksinimlerini azaltılması ile elde edilir. CSMR'nin tasarımında; reaktör binası, reaktör yardımcı binası, türbin binası, hizmet binası ve bakım binası gibi yapılar bulunmaktadır. Yardımcı yapılar; pompa dairesi ve yönetim binasını içermektedir.

Tasarımın önemli kilometre taşı tarihleri aşağıdaki planlanmıştır:



Tasarıma ait genel görünüm Şekil 4.47’verilmiştir.



**Şekil 4.47:** Kanada tasarımı CMSR'ın genel görünümü [4.49]

CSMR'nin tasarımı Kavramsal Tasarım aşamasındadır.

Standart CSMR, doğal uranyuma dayalı açık çevrim bir yakıt döngüsü kullanır ve böylece çok düşük ısı üretimli atık (yanmış uranyum) üretir. Aynı zamanda, hafif su reaktörlerinden çıkan kullanılmış yakıtı yakma yeteneğine sahiptir ve bu özellik, bu tasarımı herhangi bir hafif su soğutmalı reaktörler için değerli kılmaktadır. Uygun bir tasarımla MOX ve toryum yakıtlarının kullanımı da mümkündür.

CSMR tasarımında, Kanada'da radyoaktif atıkların işlenmesi için kullanılan son teknolojik sistemler ve ekipman tercih edilmektedir. Radyoaktif atık yönetim sistemleri, ALARA ilkesine uygun olarak rutin salınımları sınırlama amacı ile tasarlanmıştır.

Reaktörün 70 yılı aşan kullanım ömrü boyunca üretilen düşük ve orta seviyeli katı atıkların ilgili atık alanında depolanması, yüksek seviyeli atıkların ise sahada bir kuru depolama tesisinde depolanması planlanmaktadır.

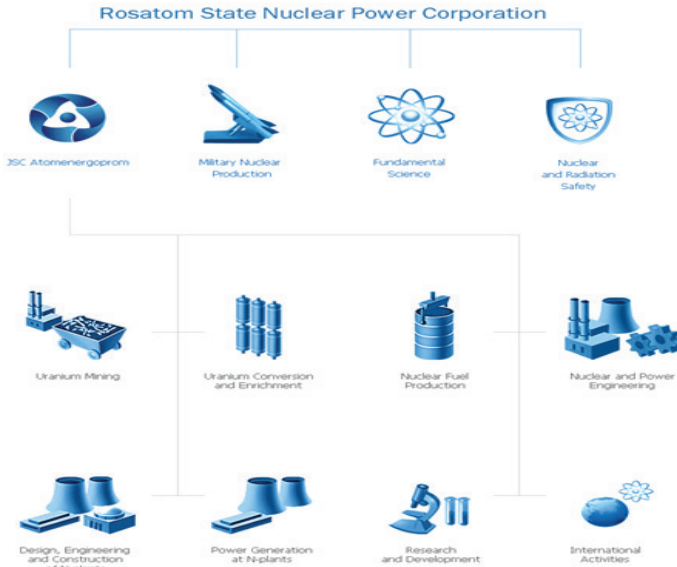
Candu Enerji şirketi, yerinde depolama, uzun süreli depolama ve Nükleer Atık Yönetim Organizasyonunun derin jeolojik depolama için tasarım şartlarını karşılayan yeni ve uzun vadeli depolama konteynerlerinin tasarımı da dahil olmak üzere tüm kullanılmış yakıtın güvenli bir şekilde depolanması, işlenmesi ve bertarafı üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir.

## 4.9. RUSYA

Rusya; enerji verimliliğini artırma, çevreye etkileri azaltma, sürdürülebilirlik, enerji ve teknolojik alanlarda gelişmeleri destekleyerek verimlilik ve rekabetçiliği geliştirmek gibi enerji politikalarını uygulamaktadır. Rusya, 2000 yılında 2035 yılına kadar geçerli olan ve gerekli durumlarda güncellenmesi gereken bir enerji strateji belgesi yayımlamış ve enerji politikası bu belge üzerinden ilerlemektedir. Ayrıca 2020 için oluşturulan belgenin en az 5 yılda bir olmak üzere gerekli durumlarda güncellenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu anlamda son yayımlanan enerji strateji belgesi, aşağıdaki hedefleri içermektedir:

- » Doğalgaz kullanımında verimliliğin artırılması
- » Hidrokarbon ham maddelerinin işlenmesi ve kullanımının artırılması
- » Kömür üretim hacminin sabitlenmesi ve kömür kalitesinin artırılması
- » Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişiminin artırılması
- » Nükleer santrallarda güvenliğin artırılarak yeni, ileri teknoloji nükleer santralların geliştirilmesi

Nükleer enerji endüstrisi Rusya'da gelişmiş olup Şekil 4.48'de görüldüğü üzere diğer endüstriyel sektörlere itici bir güç oluşturmaktadır. Ülkede; uranyumun elde edilmesinden başlayarak dönüşüm ve zenginleştirme, yakıt üretimi, yeniden işleme, nükleer santral tasarımı, ekipman üretimi, santral kurulumu, işletilmesi, santral bakım-onarımı gibi çok geniş yelpazeye uzanan çalışmalar mevcuttur.



Şekil 4.48: Rusya'da nükleer endüstrinin yapısı [4.50]

Rusya dünyada en çok reaktör tasarımına sahip ülke olarak nükleer alanda yoğun Ar-Ge faaliyetlerini de bir taraftan yürütmektedir. Türkiye'nin de içinde bulunduğu Çin, Hindistan, İran gibi birçok ülkede nükleer santral yapımını üstlenmesinin yanı sıra nükleer üretimi geliştirmek için Belarus, Finlandiya ve Macaristan ile de anlaşmalar imzalamıştır.

Bilindiği üzere Akkuyu Nükleer Santrali Rusya devlet şirketi (Rosatom) tarafından yapılmaktadır. Rusya'da, nükleer santrallardan sağlanan elektrik son 6 yılda %11 oranında bir artış göstermiş, kurulu güç ise %9 oranında artmıştır. Ülkede nükleer santrallar kurulu güç olarak %12, elektrik üretimi olarak %18'lik bir paya sahiptir (2019 verileri).

Rusya'da faaliyette olan nükleer santrallar ve durumlarını Şekil 4.49'da gösterilmektedir. Ülkede toplamda 30,3 GW kurulu güçte 38 enerji ünitesi ile 11 nükleer santral faaliyet göstermektedir [4.50].

#### Rusya'da faaliyet gösteren reaktör türleri ve ünite sayıları:

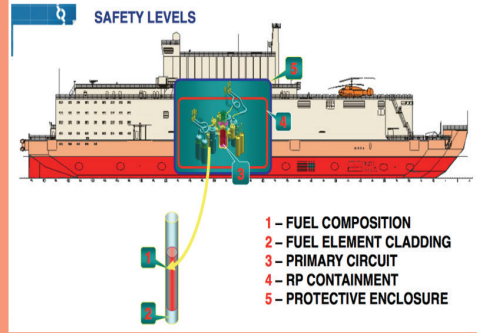
- » VVER reaktörlü 21 enerji ünitesi (3 ünite VVER-1200, 13 ünite VVER-1000, 5 ünite VVER-440)
- » Kanallı reaktörlü 13 enerji ünitesi (10 ünite RBMK-1000, 3 ünite EGP-6)
- » Sodyum soğutmalı hızlı reaktörlü 2 enerji ünitesi (BN-600 ve BN-800)
- » KLT-40S tipi her biri 35 MW güce sahip 2 deniz tipi nükleer reaktördür.



Şekil 4.49: Rusya'daki Nükleer Santrallar [4.50]

Rusya'daki SMR teknolojisi incelendiğinde; Rusya uygulanabilir SMR endüstrisine sahip ülkelerin başında gelmektedir.

Ülkenin ilk SMR tasarımı; yüzer santral olarak tasarlanan Şekil 4.50'de hem çizim hem de gerçek resmi görülen Akademik Lomonosov, Aralık 2019'da Rusya'nın Pevek şehrinde şebekeye bağlanmıştır.



**Şekil 4.50:** Akademik Lomonosov KLT 40S Reaktörlü Yüzer Santral [4.51]

Akademik Lomonosov, Mayıs 2020'de ticari işletmeye başlamıştır. Türünün tek örneği olan yerli tasarımın yapımına 2007 yılında başlanmış ve 2018 yılının başında tamamlanmıştır. İnşaat ruhsatı Rusya Federasyonu'nun nükleer düzenleyici kurumunda olan Rostechndazdor tarafından 2003 yılında verilmiştir.

İki KLT-40S reaktör modülüne sahip santralin her bir ünitesi 35 MW gücünde elektrik üretebilmektedir. Santral, St. Petersburg'daki ilk testlerden sonra, nükleer yakıtın yüklendiği ve son testlerin yapıldığı Murmansk'a çekilmiştir. Buradan da Pevek'te konuşlandırılarak şebekeye bağlanmıştır.

Yüzer santralin devreye girmesinin ardından 23 Aralık 2020 tarihinde Rosatom (Rusya Devlet Nükleer Enerji Kurumu) ile Yakutistan Hükümeti arasında Ust-Kuyga'da SMR teknolojisine dayalı santral inşaatı için bir anlaşma imzalanmıştır.

Bu projede RITM-200 reaktörünün kullanılması planlanmıştır. Bu reaktörler, Rusya'nın 50 yılı aşkın süredir buz kırıcı filolarında kullanmakta olduğu SMR teknolojisinden yararlanılarak üretilmiştir. Bu proje yüzer santraldan sonra Rusya'nın ilk yerleşik SMR projesi olmasıyla ön plana çıkmaktadır.

Rusya'daki SMR tasarımları ve özellikleri Tablo 4.19'da yer almaktadır.

**Tablo 4.19: Rusya'daki SMR tasarımları [4.8]**

| Tasarım             | Şirket                                                         | Reaktör Tipi                                 | Soğutucu      | Kapasite MW(e) | Ömür (Yıl) | Tasarım Durumu                                                                                                                      |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------|----------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EGP-6</b>        | IPPE & Teploelek-troproekt Design                              | RBMK* (Reaktör Bolshoy Moshchnosti Kanalniy) | Hafif su      | 12             | 40         | Bir reaktör 2018 yılında devreden çıkarılmış 3 reaktörün 2021'de çıkarılması planlanmaktadır.                                       |
| <b>RITM-200</b>     | JSC Afrikantov OKBM                                            | Tümleşik PWR                                 | Hafif Su      | 53             | 60         | 6 adet RITM-200 reaktörü Arktika, Sibir ve Ural buzkıran gemilerine yerleştirilmiştir. Kara için olan reaktör tasarım aşamasındadır |
| <b>VK-300</b>       | NIKIET                                                         | Sadeleştirilmiş pasif BWR                    | Hafif Su      | 250            | 60         | Reaktörün detaylı tasarımı ile santralin standart tasarımı tamamlanmıştır.                                                          |
| <b>KLT-40S</b>      | JSC "Afrikantov OKBM", Rosatom,                                | PWR                                          | Hafif Su      | 35             | 40         | Aralık 2019 da Pevek'te şebekeye bağlanmıştır.                                                                                      |
| <b>RITM-200M</b>    | JSC "Afrikantov OKBM",                                         | Integral PWR                                 | Hafif Su      | 50             | 60         | 6 prototip reaktörü imal edilerek buzkıran gemilerine yerleştirilmiştir (2 tanesi test aşamasındadır)                               |
| <b>ABV-6E</b>       | Afrikantov OKBM", Rosatom                                      | PWR                                          | Hafif Su      | 6-9            | 40         | Tasarımın son aşamasında                                                                                                            |
| <b>VBER-300</b>     | JSC "Afrikantov OKBM", Rosatom                                 | Integral PWR                                 | Hafif Su      | 325            | 60         | Lisanslama aşamasında                                                                                                               |
| <b>SHELF</b>        | NIKIET                                                         | Integral PWR                                 | Hafif Su      | 6.6            | 60         | Detaylı tasarım aşamasında                                                                                                          |
| <b>GT-MHR</b>       | JSC "Afrikantov OKBM"                                          | Modüler Helyum Reaktör                       | Helyum        | 288            | 60         | Ön tasarımı tamamlandı                                                                                                              |
| <b>BREST-OD-300</b> | NIKIET                                                         | Sıvı Metal Soğutmalı Hızlı Reaktör           | Kurşun        | 300            | 30         | Detaylı tasarımı yapıldı muhtemel devreye alınma tarihi 2026                                                                        |
| <b>SVBR</b>         | JSC Institute for Physics Power Engineering JSC EDB Hidropress | Sıvı Metal Soğutmalı Hızlı Reaktör           | Kurşun-Bizmut | 100            | 60         | Detaylı tasarımı yapıldı muhtemel devreye alınma tarihi 2025                                                                        |



| Tasarım              | Şirket                                                 | Reaktör Tipi                             | Soğutucu            | Kapasite MW(e) | Ömür (Yıl) | Tasarım Durumu    |
|----------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|----------------|------------|-------------------|
| <b>KARAT-45</b>      | NIKIET                                                 | BWR                                      | Hafif Su            | 45-50          | 80         | Kavramsal Tasarım |
| <b>UNITHERM</b>      | NIKIET                                                 | PWR                                      | Yüksek Safılıkta Su | 6.6            | 30         | Kavramsal Tasarım |
| <b>KARAT-100</b>     | NIKIET                                                 | BWR                                      | Hafif Su            | 100            | 80         | Kavramsal Tasarım |
| <b>RUTA-70</b>       | RDİPE & İPPE                                           | Havuz tipi                               | Hafif Su            | 70             | 60         | Kavramsal Tasarım |
| <b>ELENA</b>         | National Research Centre 'Kurchatov Institute' (RRCKI) | PWR                                      | Hafif Su            | 0.068          |            | Kavramsal Tasarım |
| <b>MHR-T Reactor</b> | JSC "Afrikantov OKBM"                                  | Modüler Helyum Yüksek Sıcaklıklı Reaktör | Helyum              | 4x205.5        | 60         | Kavramsal Tasarım |
| <b>MHR-100</b>       | JSC "Afrikantov OKBM"                                  | Modüler Helyum Reaktör                   | Helyum              | 25-87          | 60         | Kavramsal Tasarım |

Rusya'nın SMR tasarımlarından öne çıkan bazı reaktörlere ait bilgiler aşağıdaki gibidir [4.8]:

### RITM 200

RITM-200, JSC Afrikantov OKBM tarafından tasarlanan III.+ Nesil reaktör tasarımıdır. Bu reaktör PWR teknolojisine dayanmakta olup Rosatom'un 400 reaktör-yıllık buz kırıcılarında kullanmakta olduğu SMR teknolojisinden yararlanılarak üretilmiştir. 6 adet RITM-200 reaktörü Arktika, Sibir ve Ural buzkıran gemilerine yerleştirilmiştir. Bu reaktörler elektrik üretimi, su arıtma ve kojenerasyonda kullanılabilir. Reaktör, Şekil 4.51'de görülmektedir. Buhar üreticinin, reaktör basınç kabının içinde olması, reaktör sistemini KLT-40S tasarımına göre daha kompakt hale getirmiştir.

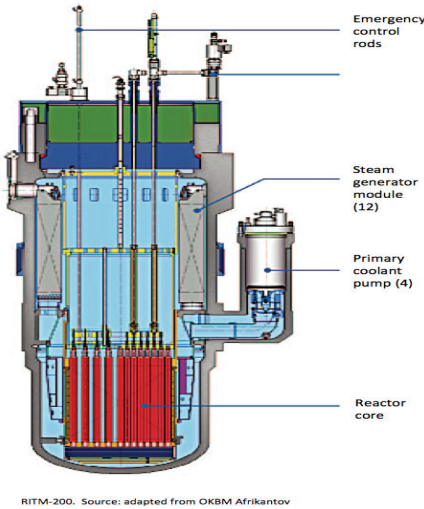
RITM200 Tasarımı için önemli tarihler şöyle verilmektedir:



Tasarıma ait teknik özellikler Tablo 4.20’de belirtilmiştir.

**Tablo 4.20: RITM 200 Teknik Özellikleri [4.8]**

| Parametre                                     | Değer                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geliştirici                                   | JSC “Afrikantov OKBM”, Rusya Federasyonu                                                                                            |
| Reaktör tipi                                  | Tümleşik PWR                                                                                                                        |
| Soğutucu/ moderatör                           | Hafif su/hafif su                                                                                                                   |
| Termal/elektriksel kapasite, MW(t)/MW(e)      | 165/53                                                                                                                              |
| Birincil çevrim                               | Cebri sirkülasyon                                                                                                                   |
| Buhar İşletme Basıncı (birincil/ikincil), MPa | 15.7                                                                                                                                |
| Kor Giriş/Çıkış Soğutucu Sıcaklığı(°C)        | 277/313                                                                                                                             |
| Yakıt Tipi/Montaj Dizilimi                    | UO2 pelet/altıgen                                                                                                                   |
| Kordaki yakıt demeti sayısı                   | 199                                                                                                                                 |
| Yakıt Zenginleştirilmesi(%)                   | <20                                                                                                                                 |
| Yakıt İkmal Periyodu(ay)                      | 72-84                                                                                                                               |
| Reaktivite Kontrol Mekanizması                | Kontrol Çubukları                                                                                                                   |
| Güvenlik Sistemleri                           | Birleştirilmiş aktif ve pasif                                                                                                       |
| Tasarım Ömrü(yıl)                             | 60 (uzatılabilir)                                                                                                                   |
| Reaktör Basın Kabı yükseklik/çap (m)          | 7.5/3.4                                                                                                                             |
| Sismik Tasarım(SSE)                           | 0.3g                                                                                                                                |
| Ayırt edici özellikler                        | Tümleşik reaktör, koryum muhafazası, çift koruma                                                                                    |
| Tasarım Durumu                                | 6 adet RITM-200 reaktörü Arktika, Sibir ve Ural buzkıran gemilerine yerleştirilmiştir. Kara için olan reaktör tasarım aşamasındadır |



**Şekil 4.51: RITM 200 Reaktörü [4.52, 4.53]**

## KLT-40S SMR

KLT 40S, yüzer santral olarak tasarlanan ve türünün ilk örneği olan Akademik Lo-monosov'da kullanılan reaktör olup Aralık 2019'da devreye girmiştir. KLT40S, basınçlı su reaktörü olup her bir modül 35MW(e) gücündedir.

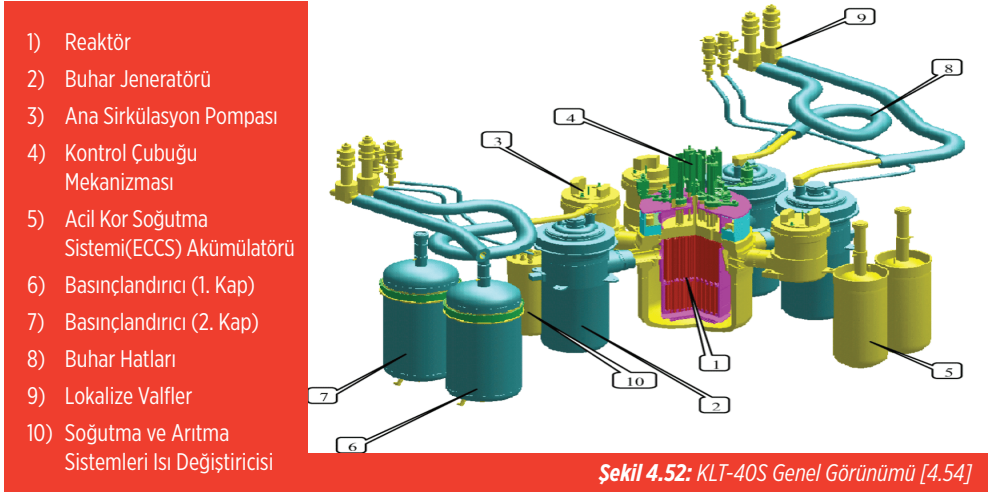
Tasarım III. Nesil KLT-40 deniz tahrik sistemine dayanmakta olup daha zor koşullarda çalışan ve uzun süreli işletme sağlayan nükleer buz kırıcılarındaki reaktörlerin ileri bir versiyonudur. Bu reaktörler kara konuşlu nükleer santrallardaki gibi ulaşım hatları, iletim hatları ya da başka hazırlıklara gerek duymadan üretildiği yerde montajı, testi yapılarak işletmeye hazır hale gelir. Bu nedenle yer seçimiyle ilgili özgürlük sunmaktadır.

KLT40S reaktör ünitesi PG-28S tipinde 4 buhar türbinine bağlıdır. Genel yapısı koruyuculu yüksek basınçlı kaptır. Kap; çekirdek, dengeleme ve acil durum koruma çubuklarını içerir. Koruyucuda dengeleme ve acil durum gruplarına ait devreye alma aksamı, reaktörün sıcaklığını ölçen direnç-sıcaklık dönüştürücü elemanlar ve termoelektrik-sıcaklık dönüştürücü ölçüm elemanları bulunur.

KLT40S tasarımı için önemli tarihler:

|                    |                                                                                                                                  |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1998</b>        | Yüzer nükleer santral için ilk proje oluşturuldu.                                                                                |
| <b>2002</b>        | Çevresel etki değerlendirmesi Rusya Federasyonu Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca onaylandı.                                |
| <b>2006</b>        | Bazı gecikmelerden sonra proje Minatom (Rusya Federasyonu Nükleer Enerji Bakanlığı) tarafından gözden geçirildi.                 |
| <b>2012</b>        | Santral kurulumu için Pevek bölgesi seçildi. JSC" Baltiysky Zavod" inşaat, kurulum, test ve devreye alma çalışmalarını üstlendi. |
| <b>2017</b>        | İnşaat ve test Baltık Tersanesinde tamamlandı.                                                                                   |
| <b>2018</b>        | Muayene, yakıt ikmali, reaktör koru son testleri yapıldı.                                                                        |
| <b>2019 Yaz</b>    | Yüzer santralin Pevek'e ikmali yapıldı.                                                                                          |
| <b>Aralık 2019</b> | 19 Aralık'da şebekeye bağlandı.                                                                                                  |
| <b>Mayıs 2020</b>  | 22 Mayıs'da işletmeye başladı.                                                                                                   |

Reaktörün yapısal temsili görünümü Şekil 4.52’de görülmektedir. Tasarıma ait teknik özellikler Tablo 4.21’de belirtilmiştir.



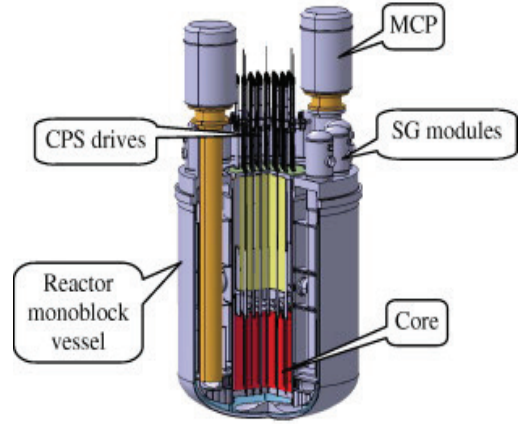
**Tablo 4.21: KLT40S Teknik Özellikleri [4.8]**

| Parametre                                                | Değer                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geliştirici                                              | JSC “Afrikantov OKBM”, Rosatom, Rusya Federasyonu                                                            |
| Reaktör tipi                                             | PWR                                                                                                          |
| Soğutucu/ moderatör                                      | Hafif su/hafif su                                                                                            |
| Termal/elektriksel kapasite, MW(t)/MW(e)                 | 150/35                                                                                                       |
| Birincil çevrim                                          | Cebri sirkülasyon                                                                                            |
| Buhar İşletme Basıncı (birincil/ikincil), MPa            | 12,7                                                                                                         |
| Kor Giriş/Çıkış Soğutucu Sıcaklığı(°C)                   | 280/316                                                                                                      |
| Yakıt Tipi/Montaj Dizilimi                               | UO2 pelet silumin matris içinde                                                                              |
| Kordaki yakıt demeti sayısı                              | 121                                                                                                          |
| Yakıt Zenginleşmesi(%)                                   | 18,6                                                                                                         |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı (GWd/ton) | 45,4                                                                                                         |
| Yakıt İkmal Periyodu(ay)                                 | 30-36                                                                                                        |
| Reaktivite Kontrol Mekanizması                           | Kontrol çubuğu sürme mekanizması                                                                             |
| Güvenlik Sistemleri                                      | Aktif(kısmen pasif)                                                                                          |
| Tasarım Ömrü(yıl)                                        | 40                                                                                                           |
| Reaktör Basınc Kabı yükseklik/çap (m)                    | 4,8/2                                                                                                        |
| Sismik Tasarım(SSE)                                      | MSK ölçeğine göre 9                                                                                          |
| Ayırt edici özellikler                                   | Isı ve elektrik kojenerasyonu için yüzer güç ünitesi, yerinde yakıt ikmali yok, harcanan yakıt geri alınıyor |
| Tasarım Durumu                                           | İşletmede                                                                                                    |

## SVBR

SVBR kurşun-bizmut soğutmalı 100MW elektrik gücünde çok amaçlı modüler reaktördür. Rusya'da nükleer denizaltılarında kullanılmaktadır. SVBR teknolojisi, temel parametreleri ve öne çıkan teknik karakterleri ile IV.Nesil reaktör olarak anılmaktadır. Reaktörün temsili görünümü Şekil 4.53'te görülmektedir.

Tasarıma ait teknik özellikler Tablo 4.22'de belirtilmiştir.

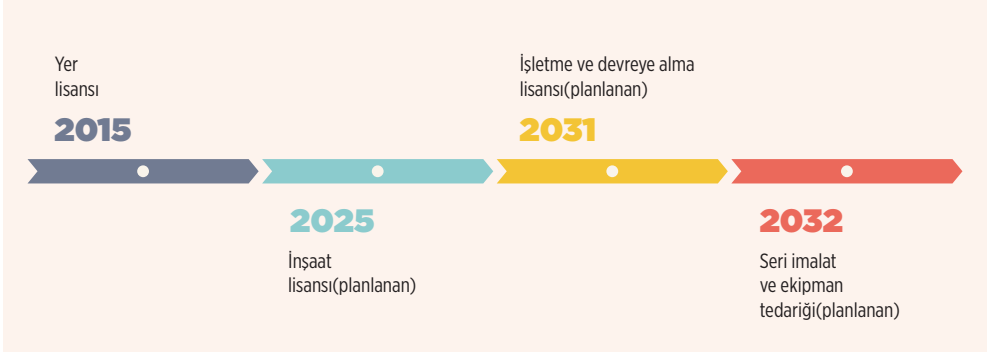


Şekil 4.53: SVBR reaktörünün temsili görünümü [4.55]

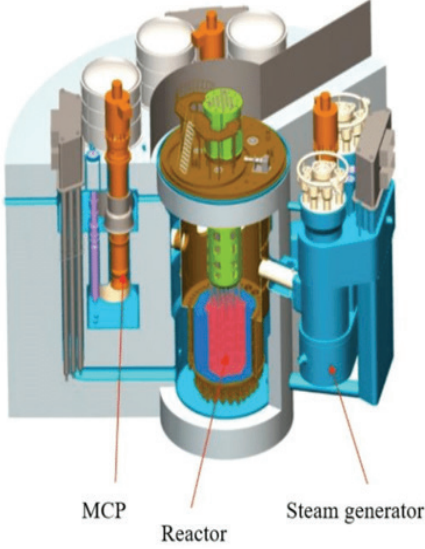
Tablo 4.22: SVBR Teknik Özellikleri [4.8]

| Parametre                                                | Değer                                                                                        |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geliştirici                                              | JSC Institute for Physics and Power                                                          |
| Engineering - JSC EDB                                    | PWR                                                                                          |
| Gidropress, Rusya Federasyonu                            | Hafif su/hafif su                                                                            |
| Reaktör tipi                                             | Sıvı metal soğutmalı hızlı reaktör                                                           |
| Soğutucu/ moderatör                                      | Kurşun-bizmut ötektik alaşım                                                                 |
| Termal/elektriksel kapasite, MW(t)/MW(e)                 | 280/100                                                                                      |
| Birincil çevrim                                          | Cebri sirkülasyon                                                                            |
| Buhar İşletme Basıncı(birincil/ikincil),MPa              | Düşük basınç                                                                                 |
| Kor Giriş/Çıkış Soğutucu Sıcaklığı(°C)                   | 340/485                                                                                      |
| Yakıt Tipi/Montaj Dizilimi                               | UO2/altıgen                                                                                  |
| Kordaki yakıt demeti sayısı                              | 61                                                                                           |
| Yakıt Zenginleşirmesi(%)                                 | <19.3                                                                                        |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı (GWd/ton) | 60                                                                                           |
| Yakıt İkmal Periyodu(yıl)                                | 7-8                                                                                          |
| Reaktivite Kontrol Mekanizması                           | Kontrol Çubuğu Sürme Mekanizması                                                             |
| Güvenlik Sistemleri                                      | Pasif                                                                                        |
| Tasarım Ömrü(yıl)                                        | 60                                                                                           |
| Reaktör Basınç Kabı yükseklik/çap (m)                    | 8,2/4,53                                                                                     |
| Sismik Tasarım(SSE)                                      | 0,5g                                                                                         |
| Ayırt edici Özellikler                                   | Reaktör, buhar jeneratörü ve pompaların bir kaptaki olduğu integral monoblok birincil çevrim |
| Tasarım Durumu                                           | Detaylı tasarımı yapıldı                                                                     |

## SVBR Tasarımı için önemli tarihler



### BREST OD 300



Şekil 4.54: KLT-40S Genel Görünümü [4.54]

BREST-OD-300 reaktörlü santral tasarımında; reaktör farklı modlarda çalıştırılarak reaktör çalışmasına destek olacak tüm proses ve sistemlerin optimize edilmesi hedeflenmektedir.

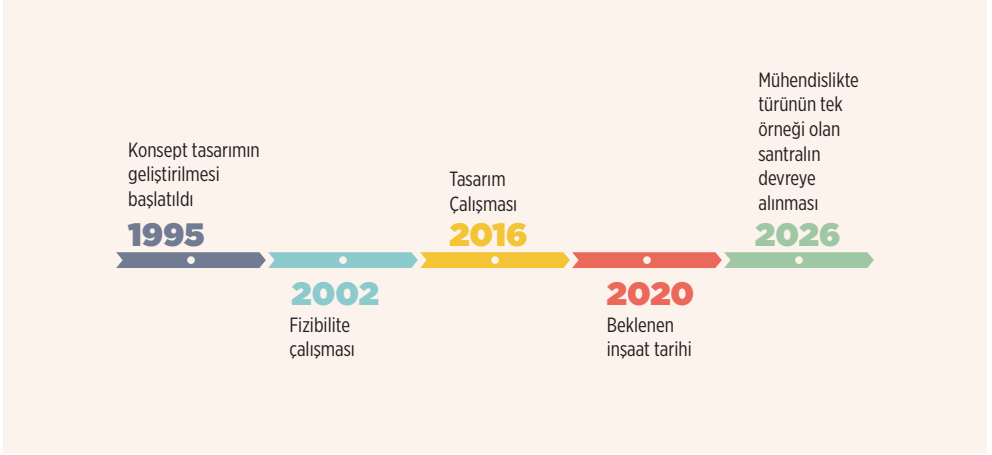
Asıl amaç “kendinden güvenli” konseptinin, kurşun soğutmalı hızlı reaktör tipinde başarıyla uygulanmasıdır. İşletme testlerinden sonra ünite şebekeye elektrik sağlamak üzere devreye alınacaktır.

BREST-OD-300; orta boyutlu kurşun soğutmalı hızlı reaktöre referans olarak tasarlanmış Rus tasarımı bir reaktördür. Kurşun soğutmalı hızlı reaktör ülkede geliştirilmekte olan hızlı reaktörlerden biridir. Deneysel ve tanıtım amaçlı olan bu reaktör; uranyum plütonyum mononitrit (U-Pu)N yakıtını kullanmakta olup 300MW elektrik üretme gücüne sahiptir. Bu proje ile ilgili gündemdeki amaç; detaylı tasarımın tamamlanıp inşaatına başlanması için tüm gerekli Ar-Ge çalışmalarının uygulanmasıdır.

Reaktörün temsili görünümü Şekil 4.54’de görülmektedir. Tasarıma ait teknik özellikler Tablo 4.23’de belirtilmiştir.



## BREST-OD-300 Tasarımı için önemli tarihler

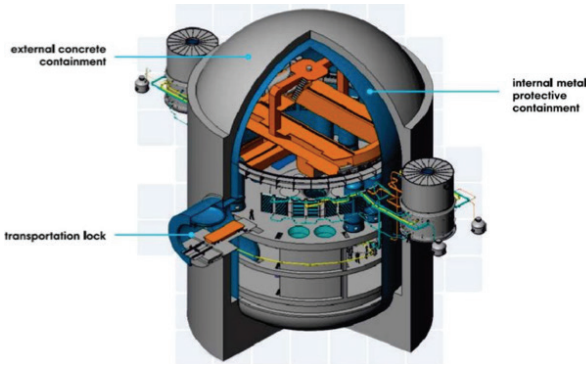


**Tablo 4.23:** BREST OD 300 teknik özellikleri [4.8]

| Parametre                                                | Değer                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geliştirici                                              | NIKIET, Rusya Federasyonu                                                                                  |
| Reaktör tipi                                             | Sıvı Metal Soğutmalı Hızlı Reaktör                                                                         |
| Soğutucu/ moderatör                                      | Kurşun                                                                                                     |
| Termal/elektriksel kapasite, MW(t)/MW(e)                 | 700/300                                                                                                    |
| Birincil çevrim                                          | Cebri Sirkülasyon                                                                                          |
| Buhar İşletme Basıncı (birincil/ikincil)                 | Düşük Basınç                                                                                               |
| Kor Giriş/Çıkış Soğutucu Sıcaklığı (°C)                  | 420/535                                                                                                    |
| Yakıt Tipi/Montaj Dizilimi                               | Miks uranyum plütonyum nitrit                                                                              |
| Kordaki yakıt demeti sayısı                              | 169                                                                                                        |
| Yakıt Zenginleştirilmesi (%)                             | 14,5'a kadar                                                                                               |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı (GWd/ton) | 61,45                                                                                                      |
| Yakıt İkmal Periyodu (aktif günler)                      | 900-1500                                                                                                   |
| Reaktivite Kontrol Mekanizması                           | Şim mekanizması ve otomatik kontrol çubukları                                                              |
| Güvenlik Sistemleri                                      | Pasif                                                                                                      |
| Tasarım Ömrü (yıl)                                       | 30                                                                                                         |
| Reaktör Basınç Kabı yükseklik/çap (m)                    | 17,5/26                                                                                                    |
| Sismik Tasarım(SSE)                                      | VII-MSK 64                                                                                                 |
| Ayırt edici özellikler                                   | Yüksek dereceli güvenlik (kurşunun doğal özellikleri, yakıt, kor ve soğutma sistemi tasarımından kaynaklı) |
| Tasarım Durumu                                           | Detaylı tasarımı yapıldı                                                                                   |

## VBER-300

VBER-300; karaya konuşlandırılmış nükleer santrallar, taşınabilir yüzer nükleer santrallar ve nükleer kojenerasyon santrallarında kullanım için tasarlanan çok amaçlı, orta boyutlu, 325 MW elektrik üretebilen güç reaktörüdür. Bu tasarım gemicilikte kullanılan modüler reaktörler için evrim niteliğindedir. Termal güçteki artış kütesel ve yüzey boyutlarında artışa neden olurken bu reaktörün ana tasarımı gemilerdeki ile aynıdır. VBER-300 tasarımı, VVER reaktörlerinin tasarım, güvenlik ve işletme tecrübelerinden elde edilen bilgilerle geliştirilmiştir. Bu nedenle VBER-300 reaktörü işletme güvenliğini sağlayan ve üretim giderlerini azaltan nükleer gemi teknolojilerinin kabul görmüş işletme tecrübelerini uygulamaktadır.



Şekil 4.55: VBER 300 temsili görünümü [4.57]

miştir. OKBM (Rus nükleer mühendislik şirketi) verilerine göre VBER-300, kojenerasyon özelliğine sahip olduğunda elektrik üretimi 200MW(e)'ye kadar kısararak 460 Gcal/saat mertebelerine kadar ısı sağlayabilmektedir. Reaktörün temsili görünümü Şekil 4.55'de verilmiştir.

VBER-300 reaktörlü nükleer santrallar, merkezi bir enerjinin sağlanamadığı uzak alanlara termal ve elektriksel enerji sağlamayı ve fosil yakıtlı santralların yerini almayı hedeflemektedir. Bu santral ile 2 reaktör ünitesine sahip, 600 MW(e) üretebilen ve 300.000 nüfuslu bir şehrin ihtiyacını karşılayabilen bir santral tasarımı planlanmıştır.

### VBER 300 Tasarımı için önemli tarihler

|           |                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2001      | Tasarım çalışmaları başladı                                                                                                                                                                                                                    |
| 2002      | İki ünite için teknik ve ticari teklif                                                                                                                                                                                                         |
| 2004      | Birinci ön tasarım 1 GosAtomNadzor tarafından onaylandı                                                                                                                                                                                        |
| 2006      | Tasarımı desteklemek amacıyla "JSC Kazakistan-Rusya" şirketi kuruldu                                                                                                                                                                           |
| 2007-2009 | Santral tasarımı için teknik anlaşma ile reaktör, otomatik proses kontrol sistemi, ısı üretme tasarımlarına son hali verildi. Ayrıca Kazakistan Mangistau bölgesi için VBER-300 ile ilgili fizibilite, ekonomi ve yatırım çalışmaları yapıldı. |
| 2007-2008 | 100-600 MW'lık VBER reaktörlü santralin geliştirilmesi                                                                                                                                                                                         |
| 2008-2011 | VBER-460/600 tasarımı için Ar-Ge çalışmaları                                                                                                                                                                                                   |
| 2011-2012 | VBER-600/4'ün ısı değişim çevrimine dayalı olarak artırılmış kapasite ile geliştirilmesi                                                                                                                                                       |
| 2012-2015 | VBER-600/4'ün teknik ve ekonomik optimizasyonu                                                                                                                                                                                                 |

Tasarıma ait teknik özellikler Tablo 4.24’de belirtilmiştir.

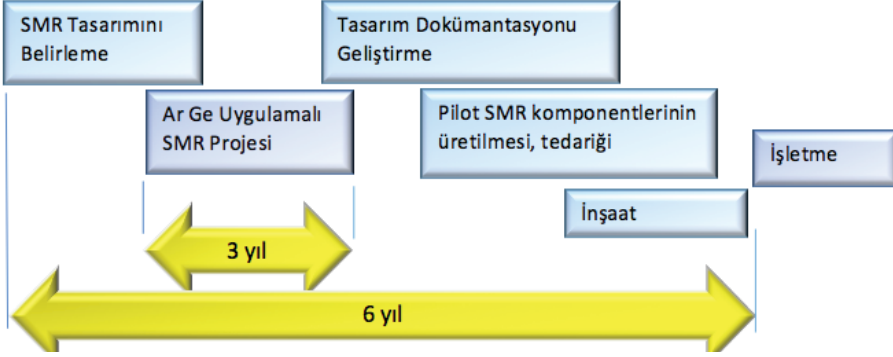
**Tablo 4.24:** VBER 300 Teknik Özellikleri [4.8]

| Parametre                                                | Değer                                                                                |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Geliştirici                                              | JSC “Afrikantov OKBM”,                                                               |
| Rosatom, Rusya Federasyonu                               | Sıvı Metal Soğutmalı Hızlı Reaktör                                                   |
| Reaktör tipi                                             | Tümleşik PWR                                                                         |
| Soğutucu/ moderatör                                      | Hafif su/hafif su                                                                    |
| Termal/elektriksel kapasite, MW(t)/MW(e)                 | 917/325                                                                              |
| Birincil çevrim                                          | Cebri Sirkülasyon                                                                    |
| Buhar İşletme Basıncı(birincil/ikincil),MPa              | 16.3                                                                                 |
| Kor Giriş/Çıkış Soğutucu Sıcaklığı(°C)                   | 292/328                                                                              |
| Yakıt Tipi/Montaj Dizilimi                               | UO2 pelet/altıgen                                                                    |
| Kordaki yakıt demeti sayısı                              | 85                                                                                   |
| Yakıt Zenginleştirilmesi(%)                              | 4,95                                                                                 |
| Yakıt değişimi gerektiren ortalama yanma oranı (GWd/ton) | 50                                                                                   |
| Yakıt İkmal Periyodu(ay)                                 | 72                                                                                   |
| Reaktivite Kontrol Mekanizması                           | Kontrol çubuğu sürme mekanizması ve çözünebilir boron                                |
| Güvenlik Sistemleri                                      | Hibrit(aktif ve pasif)                                                               |
| Tasarım Ömrü(yıl)                                        | 60                                                                                   |
| Reaktör Basınç Kabı yükseklik/çap (m)                    | 9,3/3,9                                                                              |
| Sismik Tasarım(SSE)                                      | 0,25g                                                                                |
| Ayırt edici özellikler                                   | Yüzer nükleer santraller için güç kaynağı, kojenerasyon seçenekleri, kompakt tasarım |
| Tasarım Durumu                                           | Lisanslama aşamasında                                                                |

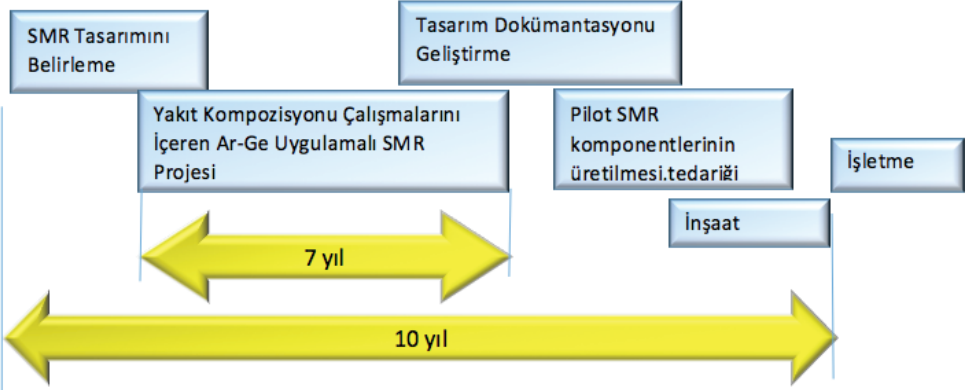
Rusya’da uygulanan SMR projelerinde iki tip yol haritası bulunmaktadır ve bu durum Şekil 4.56’da açıklanmaya çalışılmıştır.

Birincisi; referans reaktöre dayalı yani daha önce var olan bir reaktör tasarımından yola çıkılarak oluşturulan, ikincisi ise yakıt kompozisyonu çalışmalarını içeren tamamen Ar-Ge çalışmalarına dayalı inovatif reaktör tasarımına dayalı plandan oluşan bir yol haritasıdır [4.58].

### Referans Reaktöre Dayalı SMR Geliştirme Planı



### Yenilikçi (inovatif) Projeye Dayalı SMR Geliştirme Planı



Şekil 4.56: Rusya SMR Projelerinde Yol Haritaları [4.58]

Rusya nükleer enerji sektöründe kabul görmüş SMR ile ilgili yıllardır işletmekte olduğu buz kırıcıların verdiği deneyimle yeni SMR tasarımları geliştirmekte ve bu konudaki Ar-Ge çalışmalarını sürdürmektedir.

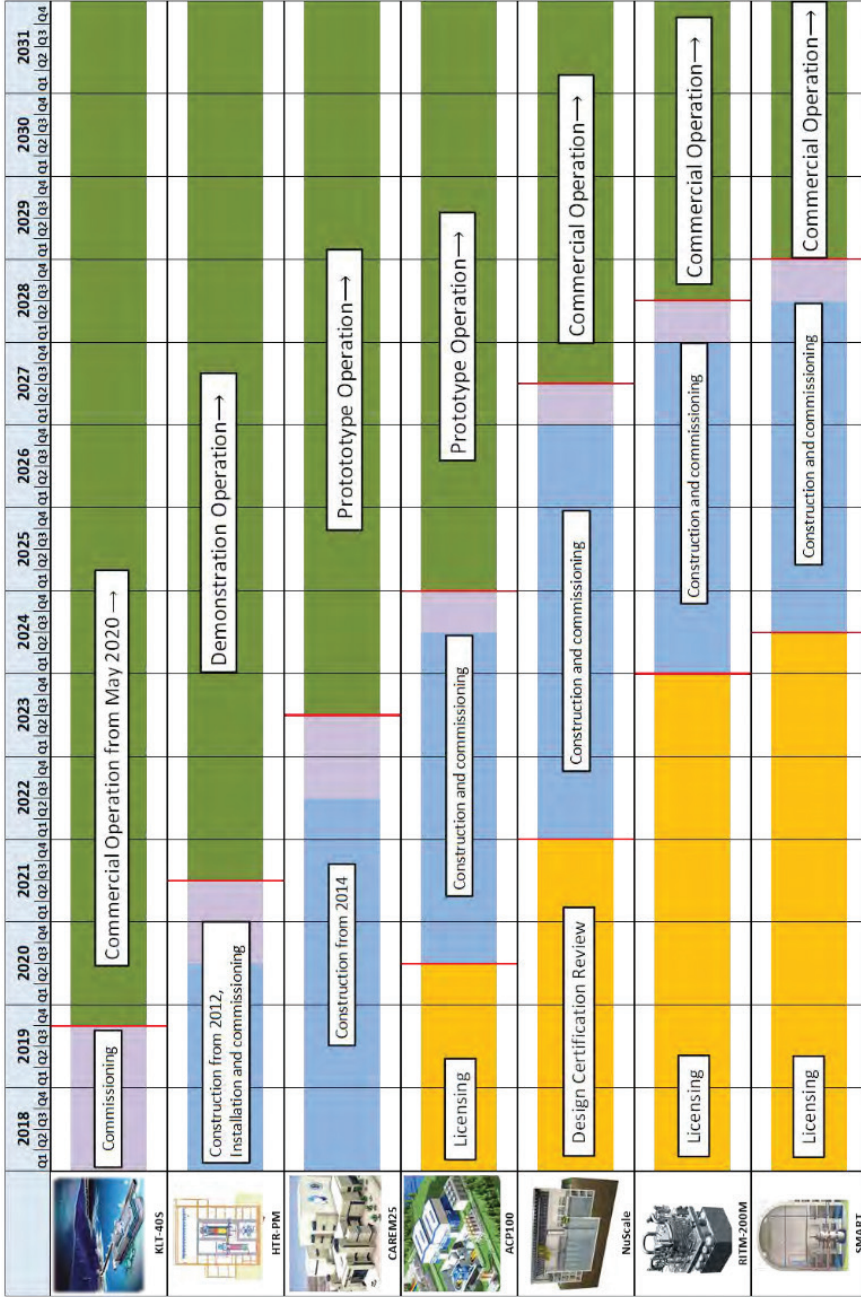
Bu alandaki çalışmaların ürünü olan türünün tek örneği Akademik Lomonosov dünyadaki ilk yüzer nükleer santral olarak yerini almıştır. Diğer SMR tasarımları ile ilgili çalışmalar devam etmekte olup kavramsal tasarımı tamamlanan Elena reaktörü devreye girdiğinde dünyanın en küçük reaktörü olma özelliğine sahip olacaktır.

Ülkelerin geliştirdiği SMR tasarımları Tablo 4.25’de verilmektedir.

**Tablo 4.25:** Küresel olarak geliştirilmekte olan SMR tasarımları [4.8]

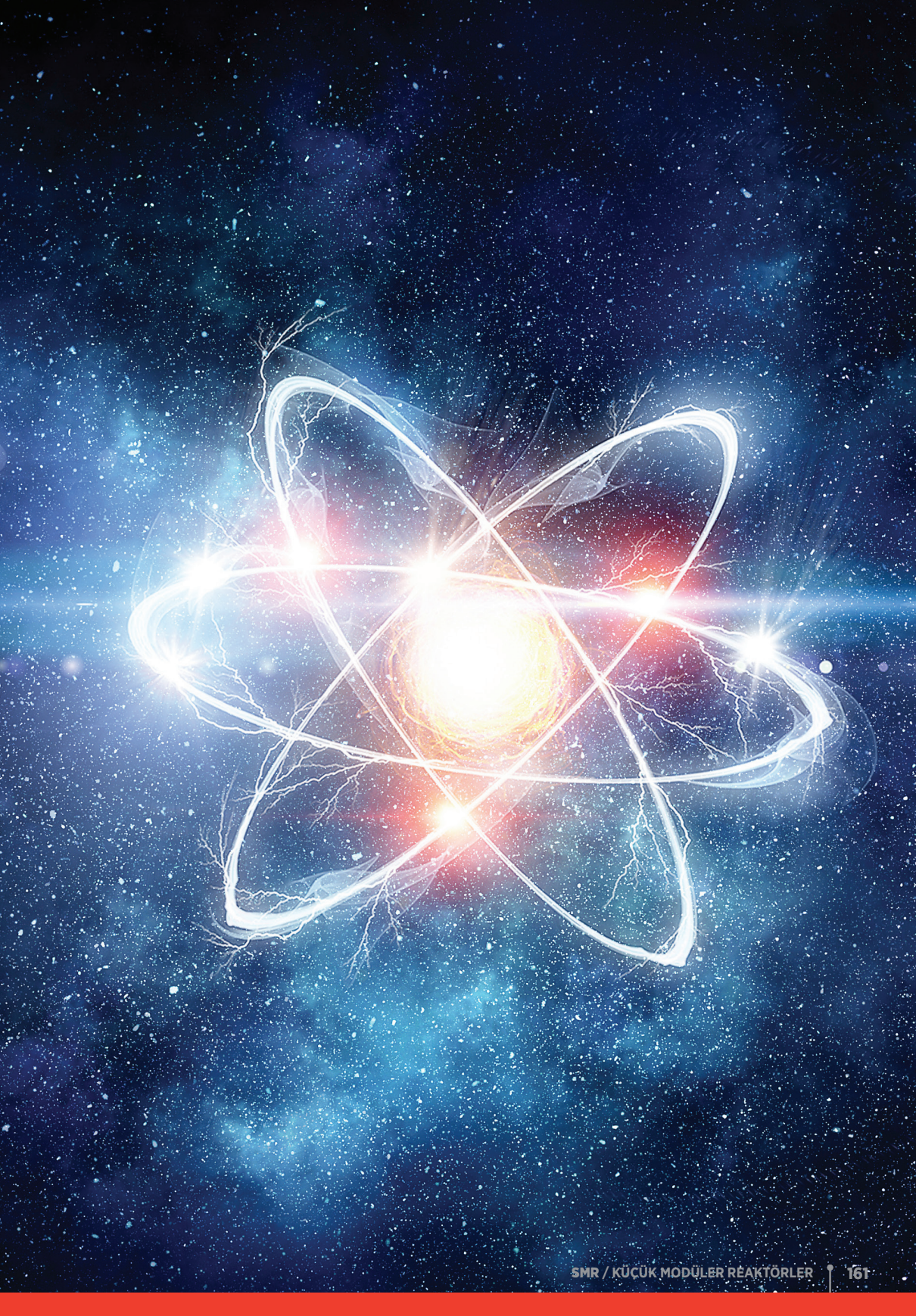
| Design                          | Net Output Per Module (Mwe) | Number Of Modules (If applicable) | Type              | Designer                                | Country               | Status                                                                                         |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Single Unit LWR-SMRs            |                             |                                   |                   |                                         |                       |                                                                                                |
| CAREM                           | 30                          | 1                                 | PWR               | CNEA                                    | Argentina             | Under Construction                                                                             |
| SMART                           | 100                         | 1                                 | PWR               | KAERI                                   | KOREA                 | Sertified Design                                                                               |
| ACP 100                         | 125                         | 1                                 | PWR               | CNNC                                    | China                 | Construction Began in 2019                                                                     |
| SMR-160                         | 160                         | 1                                 | PWR               | Holtech International                   | United States         | Conceptual Design                                                                              |
| BWRX-300                        | 300                         | 1                                 | BWR               | GE Hitachi                              | United States - Japan | First Topical Reports Submitted to the US NRC and to the CNSC as part of the Licencing Process |
| CANDU SMR                       | 300                         | 1                                 | PHWR              | SNC-Lavalin                             | Canada                | Conceptual Design                                                                              |
| UK SMR                          | 450                         | 1                                 | PWR               | Rolls Royce                             | United Kingdom        | Conceptual Design                                                                              |
| Multi Module LWR-SMRs           |                             |                                   |                   |                                         |                       |                                                                                                |
| NuSkale                         | 50                          | 12                                | PWR               | NuSkale Power                           | United States         | Sertified Design. US NRC Design Approval Recieved in August 2020                               |
| RITM-200                        | 50                          | 2                                 | PWR               | OKBM Afrikan Tov                        | Russia                | Land-Based Nuclear Power Plan- Conceptual Design                                               |
| Nuward                          | 170                         | 2 to 4                            | PWR               | CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome       | France                | Conceptual Design                                                                              |
| Mobile SMRs                     |                             |                                   |                   |                                         |                       |                                                                                                |
| ACPR50s                         | 60                          | 1                                 | Floating PWR      | CGN                                     | China                 | Under Construction                                                                             |
| KLT-40s                         | 35                          | 2                                 | Floating PWR      | OKBM Afrikan Tov                        | Russia                | Commercial Operation                                                                           |
| gen IV SMRs                     |                             |                                   |                   |                                         |                       |                                                                                                |
| Xe-100                          | 80                          | 1 to 4                            | HTGR              | X-energy LLC                            | United States         | Conceptual Design                                                                              |
| ARC-100                         | 100                         | 1                                 | LMFR              | Advanced Reactor Concepts LLC           | Canada                | Conceptual Design                                                                              |
| KP-FHR                          | 140                         | 1                                 | MSR               | KairosPower                             | United States         | Pre - Conceptual Design                                                                        |
| IMSR                            | 190                         | 1                                 | MSR               | TerresTrialEnergy                       | Canada                | Basic Design                                                                                   |
| HTR-PM                          | 210                         | 2                                 | HTGR              | China Huaneng/CNEC/ Tsinghua University | China                 | Under Construction                                                                             |
| EM2                             | 265                         | 1                                 | GMFR              | Genaral Atomics                         | United States         | Conceptual Design                                                                              |
| Stable Salt Reactor             | 300                         | 1                                 | MSR               | Moltechs Energy                         | United Kingdom        | Pre- Conceptual Design                                                                         |
| Notrium                         | 345                         | 1                                 | SFR               | TerraPower/GE Hitachi                   | United States         | Conceptual Design                                                                              |
| Westing-house Lead Fast Reactor | 450                         | 1                                 | LMFR              | Westinghouse                            | United States         | Conceptual Design                                                                              |
| MMRs                            |                             |                                   |                   |                                         |                       |                                                                                                |
| eVinci                          | 0.2 -5                      | 1                                 | Heat pipe reactor | Westinghouse                            | United States         | Basic Design                                                                                   |
| Aurora                          | 2                           | 1                                 | LMFR              | Oklo                                    | United States         | Licence application submitted to do US NRC                                                     |
| U-Battery                       | 4                           | 1                                 | HTGR              | Urenco and partners                     | United Kingdom        | Basic Design                                                                                   |
| MMR                             | .5 - 10                     | 1                                 | HTGR              | USMC                                    | United States         | Basic Design                                                                                   |

Nükleer teknolojide önde gelen ülkelerin geliştirmekte oldukları bazı SMR tasarımları için ilerleme durumları, IEAE raporunda olduğu üzere Şekil 4.57'de gösterilmektedir [4.8].



Şekil 4.57: Bazı SMR tasarımları ilerleme durumu [4.8]







# BÖLÜM

# 5

NÜKLEER  
SANTRAL VE SMR  
KARŞILAŞTIRMA



## 5. NÜKLEER SANTRAL VE SMR KARŞILAŞTIRMA

*SMR teknolojisini daha iyi anlamak için bilinen geleneksel nükleer santrallerle bir kıyas yapılmıştır. Büyük ve küçük olmak üzere her iki santral türünde teknik yapı, güvenlik-lisanslama, yakıt ve atık yönünden karşılaştırma yapılarak SMR ile büyük nükleer santrallerin özellikleri aşağıda detaylıca açıklanmaya çalışılmıştır.*

### 5.1. Teknik Ekipman

Büyük ölçekli nükleer santraller ile küçük modüler reaktörler öncelikle teknik ve ekipman açısından bir mukayese edilerek incelenmiştir.

Önceki bölümlerde açıklandığı üzere her bir reaktörün tip ve ülke açısından farklı şekilde tasarlandığından en yaygın ve kabul görmüş su soğutmalı reaktörler üzerinden inceleme yapılmıştır. Bu nedenle büyük kapasiteli reaktör tiplerinden EPR, ATMEA1, APRI400, API000, CAP1400 ve VVER 1200/AES 2006 seçilirken; SMR tasarımlarından CAP200, IMR, SMART, NuScale, UK-SMR ve Westinghouse-SMR seçilmiştir. Bu karşılaştırmada her iki tip santral ölçeğinde, temel teknik tasarım parametreleri, öne çıkan tasarım ve ekipman özellikleri esas alınmıştır.

### Büyük Ölçekli Nükleer Santrallerin Temel Teknik Özellikleri

#### EPR

- » AREVA tarafından geliştirilen evrimsel 1650 MWe sınıfı PWR tasarımıdır.
- » Tasarım Fransız N4 serisinden ve Almanya'nın Konvoi serisinden edinilen deneyime dayanmaktadır.
- » Kapasite faktörü %90'ın üzerindedir.
- » 4-döngü birincil sistem düzenlemesi bulunur ve her bir döngü bir buhar jeneratörü ve bir reaktör soğutma suyu pompası içerir.
- » Santral tasarım ömrü 60 yıldır.
- » Geliştirilmiş geometriye sahip reaktör basınç kabında (RPV) kaynak sayısı azaltılmıştır, böylece santralin ömrü boyunca bakım faaliyetlerinde ve maliyette azalma öngörülmektedir.
- » Dijital I&C (Siemens TELEPERM-XS) bulunmaktadır.

### ATMEA1

- » AREVA ve MHI tarafından daha önce geliştirilen kabul görmüş teknolojilerin birleştirilmesi ile ortaklaşa kurulan ATMEA şirketince geliştirilen 3150 MWth termal çıkış ile 1100 MWe gücünde bir PWR tasarımıdır.
- » Santral ömrü 60 yıldır.
- » 3-döngü birincil sistem bulunmaktadır.
- » Her döngüye ait buhar jeneratörü, birincil döngünün basıncını kontrol eden bir adet basınçlandırıcı ve kor tutucu (core catcher) bulunmaktadır.

### CAP-1400

- » 1400 MWe PWR ve pasif güvenlik sistemlerine dayalı tasarımıdır.
- » Westinghouse AP1000 tasarımıyla elde edilen deneyimlere dayalı olarak Çin SNPTC tarafından geliştirilen tasarımıdır.

### AP1000 (Advanced Passive 1000)

- » 1100 MWe PWR tasarımı (ABD Westinghouse AP600 tasarımıyla geliştirilmiştir.)
- » 2-döngülü birincil sistem tasarımı, her bir döngüde tek bir buhar üretici, 2 reaktör soğutma pompası bulunmaktadır.
- » Birincil döngü basıncını kontrol etmek için diğer tasarımlara nazaran daha büyük basınçlandırıcı mevcuttur.
- » Kor soğutma, koruma kabı izolasyonu, atık ısı uzaklaştırma ve koruma kabı soğutma için pasif sistemler ön plandadır.
- » Sadeleştirilmiş tasarımı ile sistem ve ekipmanda (pompa sayısı, güvenlik sınıfı valfler vb.) %50'ye varan azalma sağlanmaktadır.

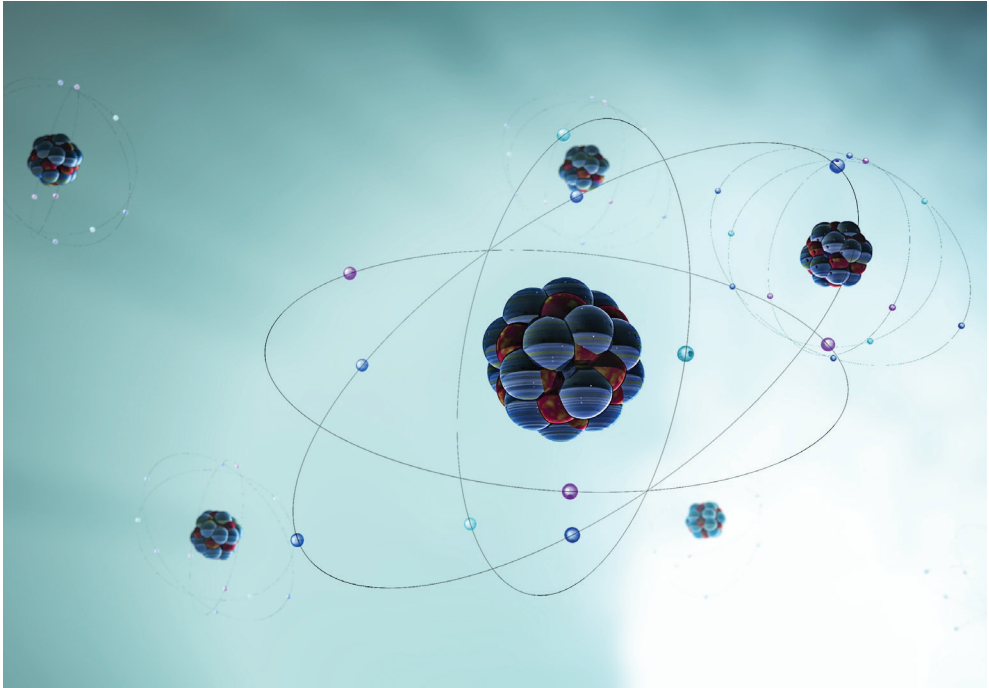
### VVER-1200 / AES-2006

- » Rusya tarafından geliştirilen VVER tasarım serisi deneyimlerine dayalı olarak geliştirilmiştir.
- » VVER 1000 tasarımı 1200 MWe güce evrilmiş, VVER serileri ile aynı 4 döngülü birincil sistem bulunmaktadır.
- » Santral ömrü 60 yıldır.
- » Diğer PWR tasarımlarından farklı olarak yatay buhar üreticileri ve daha büyük kapasiteli basınçlandırıcı bulunmaktadır.
- » Digital I&C (Siemens TELEPERM-XS) kullanılmaktadır.
- » AES 2006 tasarımında farklı ulusal düzenleme standartları için iki farklı tasarım mevcuttur:
  - VVER1200- V392M (Moscow Atomenergoproekt Institute tarafından geliştirilmiş ve Novovoronezh II sahasında iki ünite inşaa halinde)
  - VVER1200- V-491 (St. Petersburg Atomenergoproekt Institute tarafından geliştirilmiş ve iki ünite Leningrad II sahasında inşaa halindedir.)

Bahsi geçen seçili büyük ölçekli nükleer santrallerin temel teknik parametreleri Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

**Tablo 5.1:** Seçili Büyük Ölçekli Nükleer Santrallerinin Temel Teknik Parametreleri [5.1]

|                                                     | EPR           | ATMEA1        | APR 1400      | AP 1000       | CAP 1400      | VVER 1200<br>AES 2006 |
|-----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|
| Reaktör Tipi                                        | PWR           |               |               |               |               |                       |
| Soğutucu/<br>Moderatör                              | Hafif Su      |               |               |               |               |                       |
| Termal Kapasite<br>Elektrik Kapasite<br>MW(t)/MW(e) | 4590/<br>1750 | 3150/<br>1150 | 3983/<br>1400 | 3200/<br>1200 | 4058/<br>1500 | 3200/<br>1170         |
| Sistem Basıncı<br>(MPa)                             | 15.5          | 15.5          | 15.5          | 15.5          | 15.5          | 16.2                  |
| Soğutucu Sıcaklığı<br>(°C)                          | 312.6         | 308.5         | 307.2         | 303           | 304           | 313.5                 |
| Verimlilik (%)                                      | 36            | 36            | 35.1          | 32            | 34.5          | 33.9                  |
| Tasarım Ömrü (Yıl)                                  | 60 YIL        |               |               |               |               |                       |



## SMR'ların Temel Teknik Özellikleri

Son yıllarda yürütülen çalışmalar sonucunda öne çıkan CAP 2000, IMR, NuScale, SMART, UK - SMR ve Westinghouse-SMR teknolojileri seçilerek temel teknik parametreleri açısından bir karşılaştırma yapılmıştır. Tablo 5.1'de görüldüğü üzere bu SMR teknolojilerinin hepsi soğutucu olarak hafif su kullanmaktadır. Bütün tasarımların santral ömürlerinin 60 yıl olduğu görülmektedir. Teknik olarak önemli bir parametre olan sistem basıncının ise tüm seçili tasarımlarda ortalama 15MPa olduğu görülmektedir.

### CAP200 (SNERDI/SNPTC, Çin)

- » 200 MWe gücünde Çin gelişmiş pasif basınçlı su reaktörüdür.
- » Kentsel alanlarda nükleer kojenerasyon ve işletmesi sona ermiş termik santral sahalarına kurulabilme gibi çok sayıda uygulamaya uygun olacak şekilde tasarlanmıştır.
- » Birincil sistem kompakt yerleşim şeklinde tasarlanmış, buhar üreteçleri reaktör basınç kabına direk bağlıdır.
- » Nükleer Buhar Tedarik Sistemi (Nuclear Steam Supply System) reaktör basınç kabı, buhar üreteci, reaktör soğutma pompası, basınçlandırıcı ve yardımcı sistemlerden oluşmaktadır.
- » Reaktör Basınç Kabı ve buhar üreteçlerini bağlamak için ana borular yerine basınç nozulları bulunur.
- » Dikey U-tüp tipi buhar jeneratörü kullanılmaktadır.
- » Alttaki elektrikli ısıtıcı ve üstte spreyl bulunan tipik buhar tipi basınçlandırıcı mevcuttur.
- » Reaktör soğutma sıvısı pompaları- Sızdırmaz muhafazalı motor pompası ya da bir ıslak bobin pompasıdır.

### IMR (Mitsubishi Heavy Industries, Japonya)

- » 350 MWe orta büyüklükte güçte bir tasarımıdır.
- » Nükleer Buhar Tedariği Hibrit Isı Transfer Sistemi (Hybrid Heat Transport System (HHTS) ile sağlanmaktadır.
- » Ana sistem bileşenlerinin tamamının reaktör basınç kabının (RPV) içine yerleştirildiği entegre tip su soğutmalı reaktördür.
- » Entegre doğal sirkülasyon sistemi ile kendi kendini basınçlandırma sistemi kullanılmakta ve bu sayede ana soğutma suyu boruları, birincil soğutma suyu pompaları ve basınçlandırıcı ortadan kaldırılmıştır.
- » İki tip kazan içi buhar üretici bulunmakta olup; biri reaktör basınç kabının üst bölgesindeki buhar bölümünde yer alan buhar üretici (SGV), diğeri ise reaktör basınç kabının alt bölgesindeki sıvı bölümünde yer alan buhar üreticidir.(SGL)
- » Hem birincil hem de ikincil taraflardaki basınç düşüşlerini en aza indirmek ve doğal sirkülasyon performansını sürdürmek için U tipi tüp demeti (SGL için) bulunur.
- » Türbin binasında; türbin jeneratör, türbin, kondansatör, nem ayırıcı ve yeniden ısıtıcı (MSR) ve yardımcı ekipmanlarının montajına imkan sağlanmaktadır.



### SMART (KAERI, Güney Kore)

- » 365 MWt çıkışlı ve 107 MWe nominal elektrik gücüne sahip entegre tip PWR tasarımıdır.
- » Elektrik üretimi, deniz suyunu tuzdan arındırma, bölgesel ısıtma, endüstriler için proses ısısı gibi çok sayıda farklı uygulama için tasarlanmıştır.
- » Normal çalışma sırasında reaktör soğutma pompaları tarafından zorunlu sirkülasyon mevcuttur.
- » Acil durumlarda kullanılmak üzere birincil soğutma sisteminin doğal sirkülasyon kabiliyeti bulunur.
- » Normal çalışma koşulları altında aşırı ısıtılmış buhar üretmek için sarmal olarak sarılmış tüplere sahip modüler tip tek geçişli buhar üreteçleri mevcuttur.

### Westinghouse SMR (Westinghouse Electric Company LLC, ABD)

- » 800 MWt termal çıkışa ve 225 MWe'den daha yüksek net elektrik çıkışına sahip entegre PWR tasarımıdır.
- » Düz iç borulu buhar jeneratörü bulunmaktadır.
- » Birincil sistemdeki basıncı kontrol etmek için reaktör basınç kabı içinde buhar jeneratörünün üzerine yerleştirilmiş entegre basınçlandırıcı mevcuttur.
- » Korda cebri reaktör soğutma sıvısı akışı sağlamak için kapatma flanşının hemen altına reaktör basınç kabının kabuğuna yatay olarak monte edilmiş contasız kutulu motor pompaları bulunmaktadır.
- » Hava soğutmalı kondenser mevcuttur.
- » Hidrojen soğutmalı seçeneklerle oluşabilecek patlama olasılığını ortadan kaldıran hava soğutmalı elektrik jeneratörü vardır.

### NuScale (NuScale Power Inc., ABD)

- » Hafif su soğutmalı PWR olup, tek bir tesiste 600 MWe güç sağlanmaktadır.
- » Nükleer Buhar Besleme Sistemi (NSSS), bir reaktör kuru, iki adet birbirine dokunmuş tek geçişli sarmal bobin buhar üretici (inter-woven once-through helical-coil steam generators) ve bir reaktör basınç kabı içindeki dahili basınçlandırıcıdan oluşur.
- » Doğal sirkülasyon kullanarak tam güç koşullarında verimli çalışacak şekilde tasarlanmıştır, böylece reaktör soğutma suyu pompalarına olan ihtiyacı ortadan kalkmıştır.
- » Kimyasal ve Hacim Kontrol Sistemi (CVCS) tarafından sağlanan spreyleyler kullanılarak basınç düşürülür.
- » Türbin binaları; kondansatörleri, yoğunlaşma sistemleri ve besleme suyu sistemleriyle birlikte türbin-jeneratörleri barındırır.
- » Türbin Jeneratör Binası, her biri altı türbin ve hava soğutmalı jeneratörü barındıran iki ayrı türbin binasına sahiptir.

### UK SMR (Rolls-Royce and Partners, İngiltere)

- » 1276 MWt termal çıkış ve 443 MWe gücü ile üç döngülü, kapalı bağlantılı, basınçlı su reaktörüdür. (PWR)
- » Soğutma sıvısı, üç santrifüj reaktör soğutma sıvısı pompası (RCP) aracılığıyla bağlantılı dikey U tüp buhar üreteçlerine sirküle edilir.
- » Buhar jeneratörü çıkış koşulları 290°C ve 76 bar'dır. (1276 MWth)
- » Reaktör basınç kabı (RPV); bir RPV gövdesi, küresel bir kapak tertibatı ve saplamalar, somunlar, küresel pullar ve mekanik salmastralar içeren bir cıvata düzenlemesinden oluşur.
- » Basınçlandırıcı, düşük alaşımlı çelikten yapılmış üst ve alt başlıkları olan dikey, silindirik bir kaptır.
- » Yakın bağlantılı döngülerin RPV'ye, bunun altında hiçbir bağlantı veya penetrasyon olmadan yakıt verilen bölgenin yukarısında bağlanması sayesinde Soğutucu Kaybı Kaza (LOCA) riski en aza indirilir.
- » Birincil devre basıncı, basınçlandırıcının tabanında bulunan elektrikli ısıtıcılar ve basınçlandırıcının tepesinde bulunan bir nozuldan püskürtülmesi ile kontrol edilir.

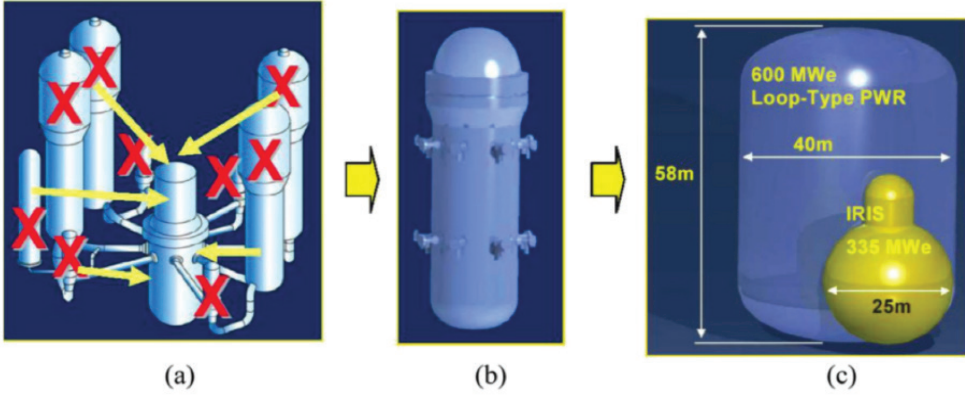
Bahsi geçen bu SMR modellerinin, teknik tasarım ve ekipman açısından öne çıkan temel teknik parametreleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir [5.2].

**Tablo.5.2:** SMR modellerinin teknik tasarım ve ekipman açısından öne çıkan temel teknik parametreleri [5.2]

|                                      | CAP200                 | IMR                                          | SMART                | NuScale                 | UK SMR                                 | Westinghouse SMR     |
|--------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------------------|----------------------|
| Teknolojiyi Geliştiren Ülke / Şirket | ÇİN<br>SNERDI<br>SNPTC | JAPONYA<br>Mitsubishi<br>Heavy<br>Industries | G. KORE<br>KAERI     | ABD<br>NuScale<br>Power | İNGİLTERE<br>Rolls-Royce<br>& Partners | ABD<br>Westinghouse  |
| Reaktör Tipi                         | PWR                    | Entegre<br>PWR                               | Entegre<br>PWR       | Entegre<br>PWR          | PWR                                    | Entegre<br>PWR       |
| Soğutucu Moderatör                   | <b>HAFİF SU</b>        |                                              |                      |                         |                                        |                      |
| Termal/Elektrik Kapasitesi MWt/MWe   | 660/>200               | 1000/350                                     | 330/100              | 160/50                  | 1276/443                               | 800/>225             |
| Birincil Döngü                       | Cebri<br>Sirkülasyon   | Doğal<br>Sirkülasyon                         | Cebri<br>Sirkülasyon | Doğal<br>Sirkülasyon    | Cebri<br>Sirkülasyon                   | Cebri<br>Sirkülasyon |
| Sistem Basıncı MPa                   | 15.5                   | 15.51                                        | 15                   | 12.8                    | 15.5                                   | 15.5                 |
| Kor Giriş/Çıkış Sıcaklıkları °C      | 289/313                | 329/345                                      | 296/323              | 258/314                 | 296/327                                | 294/324              |
| Tasarım Ömrü                         | <b>60 YIL</b>          |                                              |                      |                         |                                        |                      |

Yukarıda özetlenen bilgilerden yola çıkılarak SMR'lar teknik özellikleri açısından incelendiğinde; su soğutmalı SMR'ların, genel olarak dünyaca kabul gören ve kanıtlanmış teknolojiler olan büyük ölçekli reaktör tasarımları baz alınarak geliştirildiği ortadadır. Büyük ölçekli reaktörlere göre SMR tasarımlarında sistem ve bileşenlerin sayısının azaldığı, hatta bazı SMR tasarımlarında birincil sistemin bileşenlerinin büyük ölçekli reaktörlerden farklı olarak reaktör kabının içine veya yakınına entegre edilebildiği görülmektedir. Ayrıca kısmen veya tamamen yeraltına gömülebilir SMR tasarımları da bulunmaktadır [5.3].

Büyük ölçekli hafif sulu reaktörlerin birincil döngü konfigürasyonları (a) ile SMR (IRIS) entegre birincil döngü konfigürasyonu (b), koruma kabı (containment) büyüklüklerinin karşılaştırılması (c) olmak üzere Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere büyük ölçekli nükleer reaktörlere kıyasla birçok SMR tasarımı birincil döngü entegrasyonu ile ciddi oranda sade hale getirilmiştir.



**Şekil 5.1:** Büyük ölçekli nükleer reaktör ve SMR tasarım birincil döngüleri ve koruma kabı karşılaştırma örnekleri [5.4]

SMR'larda modülerleşme ve sistem entegrasyonu ile tasarımın sadeleştirilmesinin ana sistemler ve bileşenler açısından aşağıda belirtilen çeşitli faydaları bulunmaktadır:

- Bileşenlerde (borulama vs.) önemli miktarda azalma, böylece mühendislik risklerinde ve maliyette azalma
- Soğutucu kaybı kaza (LOCA) riski ve olasılığında azalma
- İmalat, inşaat ve bakımda iyileştirme
- Düşük güç ve modüler özellikler, reaktörün neredeyse tamamen bir fabrikanın kontrollü ortamında inşa edilmesini ve aynı zamanda modül modül yerine yerleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum da projenin kalite seviyesini ve verimliliğini arttırmaktadır.

- Güç esnekliği (power flexibility) sayesinde daha küçük ve daha zayıf şebekelere sahip ülkelere kolayca uyartılabilir.
- Modüller bağımsız olarak yönetilebilir. Bakım ve yakıt ikmali kesintileri diğer modüller çalışırken yapılabilir.
- Daha az soğutma suyu ihtiyacı vardır.
- Deniz suyu tuzdan arındırma, bölgesel ısıtma, endüstriler için proses ısısı tesisleri vb. farklı amaçlar için de kullanılabilirler.

## 5.2. Güvenlik ve Lisanslama

### Lisanslama

Küçük modüler reaktörler, düşük kurulu gücünün olmasına ve birçok pasif güvenlik özelliğine sahip yenilikçi teknolojileri kullanılmasına rağmen lisanslama söz konusu olduğunda büyük ölçekli reaktörler ile nihai hedefi aynıdır; çalışanların, halkın ve çevrenin olası bir kaza durumunda korunmasını sağlamak, kaza risklerini ve herhangi bir radyoaktif salınımı en aza indirmektir.

Büyük ölçekli nükleer santrallerin ömrü boyunca bütün aşamaları sahanın değerlendirilmesi, tasarım, inşaat, devreye alma, işletme, söküm, düzenleyici kontrolündeki salınım şeklindedir. Ancak küçük modüler reaktörlerin ömrü boyunca farklı aşamaları vardır, bu aşamalarda da farklı lisanslama yaklaşımları gerektirmektedir.

SMR'ların ömrü boyunca bütün aşamaları; sahanın değerlendirilmesi, tasarım, inşaat, üretim, saha dışında devreye alma, transfer, sahada devreye alma, işletme, sahadan söküm, saha dışı söküm, düzenleyici kontrolündeki salınım gibidir. Bu aşamalarda üretim, inşaat, transfer, işletme, söküm gibi aşamalar büyük ölçekli reaktörlere göre farklılık göstermektedir.

Etkin bir lisanslama süreci kısmen, SMR teknolojisinin olgunluğuna bağlıdır. SMR'ların tasarımındaki yenilikçi yaklaşımlar düzenleyici otorilere lisanslama konusunda zorluk oluşturabilir. Mevcut lisanslama çerçeveleri hafif su reaktörlerinin deneyime dayanmaktadır. SMR'ların Hafif su reaktörlerinin tasarımına sahip olması, lisanslama sürecini kolaylaştırmaktadır. Ancak yeni tasarıma sahip SMR'ların tasarımlarındaki pasif güvenlik sistemleri, çeşitli arıza koşulları ve acil durum eylem planlama bölgelerine dayalı olarak güvenlik durumlarının değerlendirilmesi ve onaylanması gibi kriterler lisanslamayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca lisanslamayı zorlaştıran bir diğer faktör de, SMR tasarımlarında farklı yakıt ve soğutucu kullanılması ve neticede, düzenleme kuruluşlarında uzman çeşitliliği ihtiyacı olmaktadır.

IAEA'nın 2020 yılında güncellenen uluslararası SMR kitabına göre yaklaşık 70'e yakın SMR tasarımı bulunmaktadır [5.2].

Denizde konuşlandırılan bazı SMR tasarımlara ait lisanslama durumları Tablo 5.4'te gösterilmektedir. Karada konuşlandırılan bazı SMR tasarımlarına ait lisanslama durumları ise Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

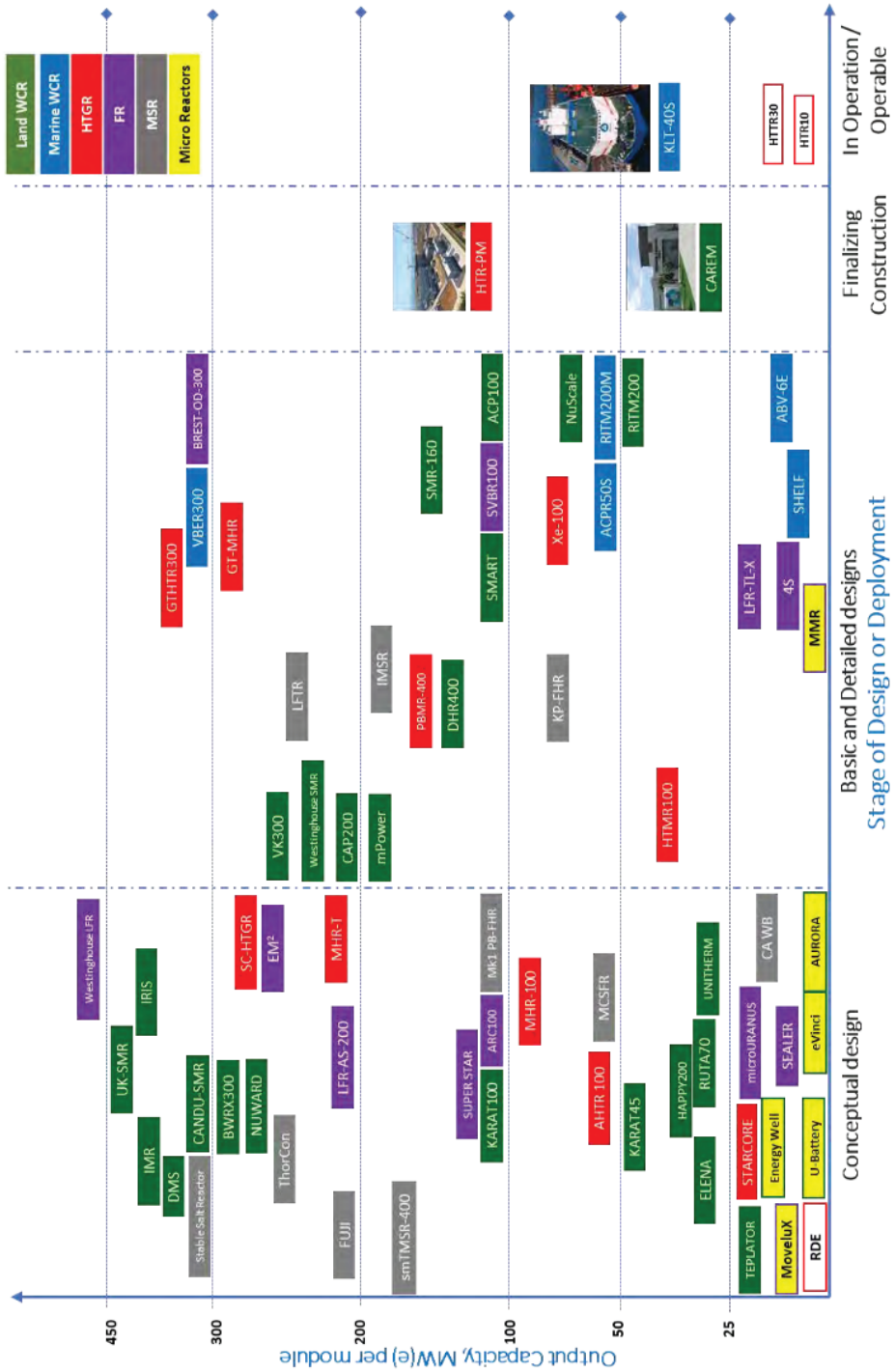
Kapasitelerine göre SMR tasarımlarının lisanslama durumları ise Şekil 5.2'de gösterilmektedir [5.2, 5.5].

**Tablo 5.3:** Denizde konuşlandırılan SMR Tasarımları [5.2]

|                              | KLT 40S                     | ACPR50S         | RITM-200M                 | SHELF         |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|---------------|
| Ülke                         | Rusya                       | Çin             | Rusya                     | Rusya         |
| Tasarımcı                    | OKBM Afrikantov             | CGNPC           | OKBM Afrikantov           | NIKIET        |
| Tasarım ve lisanslama durumu | 2 modüler reaktör işletmede | Detaylı Tasarım | 6 tane prototip mevcuttur | Temel Tasarım |

**Tablo 5.4:** Karada Konuşlandırılan SMR Tasarımları [5.2]

|           | ÜLKE                         | TASARIMCI                              | TASARIM VE LİSANSLAMA DURUMU                         |
|-----------|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| CAREM     | Arjantin                     | CNEA                                   | Prototip olarak yapım aşamasında                     |
| ACP100    | Çin                          | CNNC/NPIC                              | İnşaat için detaylı tasarım                          |
| CANDU SMR | Kanada                       | Candu Energy                           | Kavramsal tasarım aşamasında                         |
| NUWARD    | Fransa                       | EDF                                    | Kavramsal tasarım aşamasında                         |
| SMART     | GüneyKore<br>Suudi Arabistan | KAERI,<br>K.A.CARE                     | Standart tasarım onaylanmıştır.                      |
| UK-SMR    | İngiltere                    | Rolls Royce Plc                        | Kavramsal tasarım, İngiltere'de ön lisans aşamasında |
| NuScale   | Amerika                      | NuScale Power Inc.                     | Standart Tasarım onaylanmıştır                       |
| BWRX-300  | Amerika ve Japonya           | GE Hitachi & Hitachi GE Nuclear Energy | İngiltere Kanada ve Amerika'da ön lisans aşamasında  |



Şekil 5.2: Kapasitelerine göre SMR tasarımlarının lisanslama durumları [5.2]



## Güvenlik

SMR reaktörlerde güvenlik konusundaki yaklaşım büyük ölçekli reaktörlerden farklı değildir. En önemli hedef çalışanların, halkın ve çevrenin olası bir kaza durumunda korunmasını sağlamak, kaza risklerini ve herhangi bir radyoaktif salınımı en aza indirmektir. Büyük ölçekli reaktörler, komuta bağlı olarak elektriksel veya mekanik olarak çalıştıklarından dolayı güvenlik sistemleri aktif durumdadır. Ancak SMR'ların güvenlik özellikleri daha çok pasif sistemlere ve reaktörün düşük güç ve çalışma basıncı gibi tasarımından kaynaklanan doğal güvenlik özelliklerine dayanır. Bundan dolayı güvenlik marjı artarak, çeşitli çalışma koşullarında reaktör korunum ciddi hasar görme riskini ve dolayısıyla bir kaza durumunda radyoaktivite salınım potansiyelini ortadan kaldırır. Sonuç olarak, güçlendirilmiş reaktör kabı ve acil durum önlemlerine olan ihtiyaç azalır.

Büyük ölçekli reaktörler ile küçük modüler reaktörlerin güvenlik özellikleri ile ilgili genel farklılıklar aşağıdaki Tablo 5.5'te yer almaktadır. Bu tabloda bahsedilen farkların dışında, küçük modüler reaktörlerin tasarımlarının basitleştirilmesi ile dışarıdan operatör müdahalesi azaltılmıştır. Böylece olumsuz çevre etkileri azaltılmıştır, kapasite faktörleri büyük ölçekli reaktörlere göre daha yüksektir, sistem bileşenlerinde arıza olasılığı düşüktür. SMR'larda yarı otonom işletme ve pasif güvenlik sistemleri sayesinde güvenli kapatmanın sağlanmasıyla sabotaj ihtimalinin azaltılması söz konusudur. Nükleer konusunda insan kaynağı sıkıntısı çeken ülkelerde basit sistemleri ile kolaylık sağlaması gibi avantajları mevcuttur [5.6, 5.7].



**Tablo 5.5:** Büyük ölçekli reaktörler ile küçük modüler reaktörlerin güvenlik özellikleri ile ilgili genel farklılıklar [5.7]

| Büyük Ölçekli Reaktörler                                                                                                                                                                             | Küçük Modüler Reaktörler                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yüksek basınçlı enjeksiyon sistemi.<br>Düşük basınçlı enjeksiyon sistemi.                                                                                                                            | Aktif güvenlik enjeksiyon sistemi gerekmez. Korun soğutulmasında pasif sistemler kullanılır.                                                                                            |
| Acil durum pompaları ve acil durum emme basıncı ile bağlantılı güvenlik ile ilgili pompalar                                                                                                          | Kazaların azaltılmasına yönelik güvenlik ile ilgili pompalar kullanılmıyor.                                                                                                             |
| Acil durum dizel jeneratörleri                                                                                                                                                                       | Pasif tasarımda koru soğutabilmek için acil durum alternatif akıma ihtiyaç yoktur. Reaktör koruma kabı doğrudan ısı çekme sistemini içerir.                                             |
| Aktif koruma kabı ısı sistemleri                                                                                                                                                                     | Böyle bir sisteme gerek yoktur, çünkü ısı, pasif olarak koruma kabı dışına atılır.                                                                                                      |
| Koruma kabı sprej sistemi                                                                                                                                                                            | Buhar basıncını düşürmek veya radyoaktif fisyon ürünlerini koruma kabından uzaklaştırmak için sprej sistemlerine gerek yoktur.                                                          |
| Acil kor soğutma sisteminin ölçü ve kontrol sistemleri karmaşık sistemlerdir. Bundan dolayı birçok test ile güvenilirliği doğrulanır.                                                                | Basit ve pasif güvenlik sistemlerinden dolayı daha az test gereklidir. İstenmeden devreye girme gibi bir durum söz konusu değildir.                                                     |
| Acil durum besleme suyu sistemi                                                                                                                                                                      | Acil durum besleme suyu sistemine ihtiyaç duymadan kordaki ısıyı atabilme özelliği mevcuttur.                                                                                           |
| Reaktör soğutma suyu pompa contalarından kaynaklı güvenlik sıkıntısı. Contaların bakımı ve değişim maliyeti                                                                                          | Entegre tasarımlar, conta ihtiyacını ortadan kaldırır.                                                                                                                                  |
| Soğutucu sistemler ve ilgili arayüz sistemleri, nehir ve deniz suyu sistemleri, aşırı hava koşulları ve biyolojik kirlenme gibi nedenlerden dolayı fonksiyon kaybına maruz kalan aktif sistemlerdir. | SMR tasarımları pasiftir. İletim ve aktarım yoluyla ısının atılması gerçekleştirilir.                                                                                                   |
| Güvenlikle ilgili sistemleri desteklemek için kapalı soğutma suyu sistemleri gereklidir                                                                                                              | Güvenlikle ilgili sistemler için kapalı soğutma suyu sistemlerine gerek yoktur.                                                                                                         |
| Güvenlikle ilgili sistemlerin düzgün çalışmasını desteklemek için Isıtma, havalandırma ve klima (HVAC) sistemlerinin çalışması gerekir.                                                              | Tesis tasarımı, hem HVAC sistemini hem de ilgili kapalı su soğutma sistemlerini ortadan kaldırarak güvenlikle ilgili bölümleri soğutma ihtiyacını en aza indirir veya ortadan kaldırır. |

Aşağıda öne çıkan bazı SMR tasarımlarının güvenlik özellikleri yer almaktadır.

| Güvenlik Özellikleri |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CAP200 [5.2]</b>  | <p>Yerçekimi, sıkıştırılmış hava ve doğal sirkülasyondan yararlanılarak çalışan pasif güvenlik sistemleri bulunmaktadır. Pompa, fan gibi aktif bileşenler kullanılmamaktadır. Birkaç basit valf ile pasif güvenlik sistemleri otomatik olarak devreye girer.</p> <p><i>a) Hidrojen kontrol sistemi</i></p> <p>Tasarıma esas veya tasarım kaynaklı olmayan acil durumlar oluştuğunda ortaya çıkacak hidrojen için tasarlanmış hidrojen kontrol sistemi mevcuttur. Hidrojen izleme sistemi ve pasif oto-katalitik rekombinerlerden oluşur. Sistem sayesinde koruma kabındaki hidrojen konsantrasyonu düzenleyici limitlerinde olması sağlanır.</p> <p><i>b) Pasif koruma kabı soğutma sistemi</i></p> <p>Pasif kor soğutma sisteminin ana işlevi, tasarıma esas kaza sonrasında korun soğutulmasını sağlamaktır. Soğutma, soğutma suyu kaybı kazaları dışında reaktör soğutma sistemine bor çözeltisi takviyesi ve soğutma suyu kaybı kazalarından sonra ise güvenli enjeksiyonu sağlamaktır. CAP200 için pasif kor soğutma sistemi, pasif güvenlik enjeksiyon sistemi ve pasif bozunma ısısı çekme sisteminden oluşur.</p> <p><i>c) Pasif koruma kabı soğutma sistemi</i></p> <p>Koruma kabı su dolu bir havuzun içerisinde yer almaktadır. Buhar hattı boru kırılmaları kazaları veya soğutma suyu kaybı kazaları sonrası koruma kabındaki ısı, su havuzuna aktarılmaktadır. Su havuzu güvenlikle ilgili bir bileşen olup koruma kabının dış yüzeyini soğutarak tasarım basınç ve sıcaklığının aşmamasını sağlar. Pasif koruma kabı soğutma sistemi operatör kontrolü olmadan ya da dışarıdan destek olmadan çalışır.</p>                                                                                                       |
| <b>IMR [5.2]</b>     | <p><i>a) Güvenlik sistemleri yaklaşımı</i></p> <p>Entegre tipte birincil sistem sayesinde yakıt erimesine (fuel failure) sebep olacak soğutma suyu kaybı, kontrol çubuğu fırlaması (rod ejection), kilitli rotor sebepli kazalar önlenmiş olur.</p> <p>Doğal sirkülasyon sebebiyle ana soğutucu boru ve birincil soğutucu pompasına ihtiyaç duyulmamıştır. Kendinden basınçlandırma sistemi sayesinde ayrıca basınçlandırıcı yoktur.</p> <p>Reaktör basınç kabında 2 tip buhar üretici mevcuttur. Buhar üst kısımda yer alan ve sıvı/alt kısımda yer alan buhar üreteçleri normal devreye alma, kapatmada ya da kaza durumlarında ısı çekmek için kullanılmaktadır.</p> <p><i>b) Bozunma ısısı çekme sistemi</i></p> <p>Reaktör basınç kabındaki ısınin atmosfere atılması için tek başına doğrudan ısı çekme sistemi devreye girer.</p> <p>Su sızıntısı meydana gelse ve pompalar çalışmasa bile, basınç kabının içindeki ve dışındaki basınç eşitlendiğinde su sızıntısı otomatik olarak sonlandırılacaktır. Pasif buhar jeneratörü soğutucusunda, kazanın erken safhalarında bozunma ısısı, soğutma suyu kullanılarak uzaklaştırılmaktadır, sonrasında ise hava ile soğutma gerçekleştirilir. Böylece herhangi bir operatöre, enerjiye veya suya ihtiyaç duyulmadan soğutma işlemi yapılabilir.</p> <p><i>c) Koruma kabı</i></p> <p>Entegre birincil sistem ve basitleştirilmiş yardımcı sistemler ile kompakt bir koruma kabı oluşturulmuştur. Yüksek tasarım basıncı sayesinde basınç kazanındaki su sızıntıları önlenmiş olur. Reaktör koruma kabı doğrudan ısı çekme sistemini içeren güvenlik sistemlerinin parçasıdır. Koruma sistemi tasarımı olası radyoaktif madde salınımını önleyecek şekilde tasarlanmıştır.</p> |

|                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>SMART</b><br/><b>[5.2, 5.8]</b></p> | <p><i>a) Güvenlik sistemi ve yapılandırması</i></p> <p>SMART'ın güvenlik sistemleri otomatik çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bunlar, reaktör kapatma sistemi, pasif güvenlik enjeksiyon sistemi, bozunma ısısı çekme sistemi ve koruma kabı basıncı ve radyoaktivite kontrol sisteminden oluşur. Ek güvenlik sistemleri arasında otomatik basınçlaştırma sistemi (ADS) bulunur.</p> <p><i>b) Bozunma ısısı çekme sistemi</i></p> <p>Reaktör kapatıldıktan sonra, ikincil sistemi kullanan normal bozunma ısısı çekme mekanizması herhangi bir nedenle çalışmadığında, pasif ısı çekme sistemi reaktörü 36 saat içerisinde güvenli kapatma koşullarını getirir ve kazanın başlamasından sonraki 36 saat içinde güvenli kapatma koşulunu korur. Bu nedenle, güvenlik fonksiyonu, tasarıma esas kazalar için operatörler tarafından herhangi bir düzeltici müdahale olmaksızın 72 saat boyunca çalışır.</p> <p><i>c) Acil durum kor soğutma sistemi</i></p> <p>Tasarıma esas kaza sonrası korun soğutulması için pasif güvenlik enjeksiyon sistemi (PSIS) kullanılır. Acil durum kor soğutma, dört kor katma suyu tankı (core make up tank) (CMT'ler) ve dört güvenli enjeksiyon tankı (SIT'ler) kullanılarak gerçekleştirilir.</p> <p><i>d) Koruma kabı</i></p> <p>Koruma kabı radyoaktif fisyon ürünlerini içeren birincil soğutma sıvısı sızıntısına karşı çevreyi koruyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu güvenlik fonksiyonu, pasif bir güvenlik sistemi olarak koruma kabı basınç ve radyoaktivite baskılama sistemi (CPRSS) ile gerçekleştirilir.</p> <p>Koruma kabı sistemi, alt koruma alanı (LCA), üst koruma alanı (UCA), koruma kabı içi yakıt yükleme suyu depolama tankı (IRWST) ve bunların yanı sıra radyoaktivite baskılama sistemi, ısı çekme sistemini (CHRS) içerir.</p> |
| <p><b>NUSCALE</b><br/><b>[5.2]</b></p>    | <p>Yüksek basınçlı koruma kabına, pasif olarak çalışan bozunma ısısını giderme ve koruma kabının ısısını giderme sistemlerine sahiptir. Nuscale Modüler Reaktörünün entegre tasarımı; çok büyük primer borulara ve reaktör soğutma suyu pompalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmır.</p> <p><i>a) Bozunma ısısı çekme sistemi</i></p> <p>Bozunma ısısı çekme sistemi (DHRS), soğutucu kaybı kazaları dışında normal besleme suyunun olmadığı durumlarda, reaktör ikincil kısmının soğutulmasını sağlar. Sistem, kapalı devre, iki fazlı doğal sirkülasyonlu bir soğutma sistemidir. Normal işletme koşullarında, bozunma ısısı çekme sistemi kondansatörleri stabil ve etkin işletme için yeterli suyu muhafaza eder.</p> <p><i>b) Acil durum kor soğutma sistemi</i></p> <p>Acil durum kor soğutma sistemi (ECCS), üç tane bağımsız reaktör havalandırma valfinden ve iki bağımsız reaktör devridaim valfinden (RRV'ler) oluşur. Koruma kabında soğutucu kaybı kazalarında, acil durum kor soğutma sistemi, soğutucuyu koruma kabından, reaktör kabına döndürür. Bu, korun kapalı kalmasını ve bozunma ısısının ortadan kaldırılmasını sağlar.</p> <p>Acil durum kor soğutma sistemi, ısıyı uzaklaştırır ve koruma kabının iç yüzeyindeki buhar yoğunlaşması ve konvektif ısı transferi yoluyla koruma kabı basıncını baskılar.</p> <p><i>c) Koruma kabı</i></p> <p>Reaktör ve koruma kabı, yer altına inşa edilmiştir, su dolu bir havuz içerisinde çalışır. Reaktör suyun doğal sirkülasyon prensiplerini kullanarak çalışır; bu nedenle, reaktör boyunca suyu sirküle etmek için pompaya gerek yoktur. Bunun yerine, sistem bir konveksiyonel proses sistemini kullanır.</p>                                                                                                         |

**W-SMR**  
**[5.2, 5.9]**

Westinghouse SMR tasarımı yer çekimi ve doğal sirkülasyondan yararlanılarak oluşturulan gelişmiş güvenlik sistemlerinden oluşur. Tesis, güvenlik işlevlerini yerine getirmesi için enerjiye veya diğer destek sistemlerine bağımlı değildir. Entegre tipteki reaktör tasarımından dolayı büyük primer borularına gerek yoktur. Böylece, büyük kırıklı soğutucu kaybı kazaları riski azalır. Reaktör kabı, koruma kabı ve kullanılmış yakıt havuzunun konumları, dış tehditlere ve potansiyel doğal tehlikelere karşı koruma sağlar.

*a) Tasarlanmış güvenlik sistemi yaklaşımı ve yapılandırması*

- Westinghouse SMR tasarımının, pasif sistemlerinin tasarım temeli ve lisanslanması ilk olarak AP1000 santralının tasarımında uygulanmıştır.

Westinghouse SMR'de üç farklı bozunma ısı çekme yöntemi vardır;

- Yerçekimi beslemesi ile doğal sirkülasyonla soğutma
- Pasif bozunma ısı çekme, ısı eşanjörleri ile soğutma
- İki aşamalı otomatik basınçsızlaştırma sistemi, su enjeksiyonu ve yerçekimi beslemeli borik asit su takviyesi dahil olmak üzere sürekli boşaltma ve besleme yöntemleriyle pasif soğutma

*b) Koruma kabı sistemi*

Koruma kabı, su havuzuna daldırılan karbon çelik bir kaptır. Öngörülen olayları takiben koruma kabındaki basınç, kabuğun içinden onu çevreleyen suya ısının aktarılmasıyla korunur. Yedi günden fazla süreyle yeterli bozunma ısı giderme kapasitesi sağlayan iki büyük nihai soğutma tankı mevcuttur.



|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>UK-SMR</b><br/><b>[5.2, 5.10]</b></p> | <p><i>a) Güvenlik sistemi yaklaşımı</i></p> <p>Pasif güvenlik sistemleri, güvenlik işlevlerini 72 saat boyunca otomatik olarak operatör müdahalesiz yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır.</p> <p><i>b) Tasarlanmış Güvenlik Önlemleri</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kapalı döngü buhar üretici buharı ve besleme döngüsüyle ısısının çekilmesine ek olarak, pasif bozunma ısısı çekme (PDHR) ve acil durum kor soğutma (ECCS) sistemleri koruyucu güvenlik önlemleridir.</li> <li>- Kontrol çubukları (scram) ve acil bor enjeksiyonu, reaktörün kapatılması için iki farklı ve güvenilir bir yol sağlar.</li> <li>- Birincil devre ve diğer önemli sistemler, çeşitli işletme koşullarında radyoaktif salınımı sınırlamak için çelik bir koruma kabının içine yerleştirilmiştir. Olası bir kaza durumunda nükleer yakıtın çevreye yayılmasını önleyecek olan kor tutucu mevcuttur. Kor tutucu, olası bir kaza durumunda zincirleme reaksiyonu anında durdurarak erimiş yakıtı kararlı bir şekilde tutabilmeyi sağlar.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p><b>IRIS</b><br/><b>[5.2, 5.11]</b></p>   | <p><i>a) Pasif Acil Durum Isı Çekme Sistemi (EHRS)</i></p> <p>Acil durum ısı çekme sistemi, reaktörde gerçekleşecek olay ve kaza durumlarında reaktörün kapatılmasını takriben devreye giren pasif soğutma sağlayan ve birincil döngünün basıncını soğutucu kaybı olmaksızın düşüren bir sistemdir.</p> <p><i>b) ADS ve koruma kabı basınç düşürme sistemi</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Basınçlandırıcıya bir vana ile bağlı olan Otomatik Basınçsızlaştırma Sistemi (ADS) reaktör basıncının belirli bir seviyenin altına düşmesiyle devreye girer ve reaktördeki buharın basınç baskılama havuzuna tahliyesini sağlayıp Pasif Acil Durum Isı Çekme Sistemine sistem basıncını düşürmede yardımcı olur. Bu şekilde reaktör basıncının koruma kabı basıncına eşitlenmesine, basınç koruma kabı basıncının tasarım değeri altında kalmasına ve dolayısıyla reaktör basınç kabı içerisindeki su kütlesinin koruma kabı içerisine akışını azaltmaya yardımcı olur.</li> <li>- Koruma kabı basınç düşürme sistemi ise 6 tane basınç baskılama havuzundan ve bunların gaz tanklarından oluşur. Basınç baskılama havuzları kordan yüksek bir konumda bulunmaktadır. Bu şekilde bir konumlama sayesinde gerçekleşebilecek küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası sırasında, koruma kabı ve basınç kabı basınçlarının eşitlenmesi sonrasında yerçekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemine su sağlar.</li> </ul> <p><i>c) Acil Durum Boronlama Sistemi (EBS)</i></p> <p>Acil Durum Boronlama Sistemi, kontrol çubukları ile reaktörün kapatılmasına alternatif olarak beklenen geçiş durumlarında ve kaza durumlarında birincil döngüye direkt basınç kabı enjeksiyon borusu ile bor enjekte ederek reaktivitenin kontrol edilmesine yardımcı olur.</p> <p><i>d) Yerçekimi İle Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi (LGMS)</i></p> <p>Yer çekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemi (LGMS) basınç kabı ve koruma kabı arasındaki basınç farkının belirli bir seviyenin altına düşmesiyle devreye girerek basınç baskılama havuzunda bulunan suyun direkt basınç kabı enjeksiyon hattı (DVI) ile korun soğutulmasında kullanılmasını sağlar.</p> |



### 5.3. Yakıt

SMR tasarımlarında kullanılan yakıt, genellikle büyük nükleer güç reaktörlerinde kullanılan yakıta benzer olmakla birlikte reaktör tasarımına göre yakıt ve yakıt çevrimleri değişiklik göstermektedir. Son geliştirilen yenilikçi SMR'lar; yakıt geometrisi, yakıt tipi, yakıt zenginleştirme oranları, yakıt ikmal periyotları açısından farklılık göstermektedir. İlk SMR tasarımları; büyük nükleer reaktörlerde kullanılmakta olan standart hafif su reaktörlerinin (LWR) mevcut tasarım boyutlarında değişiklik yapılarak elde edilmiştir. Bu nedenle yakıt tasarımlarda yakıt olarak genellikle %5'e kadar zenginleştirilmiş uranyum kullanılmaktadır.

Geleneksel nükleer reaktörlerde üretilen nötronlar absorpsiyon tepkimeleri vasıtasıyla yakıt ya da yakıt olmayan elementler ve kor kısmındaki sızıntı ile ortamdaki uzaklaştırılır. Sızıntı, fisyon için uygun olan nötronların kaybına yol açtığından korun reaktivitesi azalır. Amerika'da kullanılmakta olan büyük hafif su reaktörleri ile yapılan karşılaştırmada, kor boyutlarının daha küçük olmasından dolayı SMR'larda daha yüksek radyal ve eksenel nötron sızıntısı olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sızıntı oranları yakıt çevrimi performansını olumsuz yönde etkilemektedir [5.12].

SMR'lar büyük nükleer santrallara göre daha kısa boyutlu veya daha az sayıda yakıt kullanırlar. Ayrıca bazı SMR tasarımları kullanılan yakıtı ve nükleer atığı tekrar kullanabilme özelliğine (kapalı çevrim) sahip olduğundan atık yönetimi açısından da büyük avantaj sağlamaktadır. Geleneksel nükleer reaktörlerde yakıt ikmal periyodu 1-2 yılı iken, SMR tasarımlarında bu periyot daha uzun süreyi bulabilmektedir. Yakıt çevrimine göre bu süre değişmekle beraber bazı reaktörlerde 10 yıl ve hatta bazı reaktörlerde 30 yıl yakıt değişimi yapmadan işletmede kalabilen SMR tasarımları mevcuttur. Bu durum, yakıt güvenliğini artırmakta ayrıca yakıta müdahale etmeden ve yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalardan etkilenmeden uzun süre santralin işletmede kalmasını sağlamaktadır. Böylelikle yakıt ikmal sırasında karşılaşılan lojistik problemlerin de önüne geçilmiş olur. Yakıt ikmal periyodunun daha uzun olması, SMR yakıt maliyetlerinin büyük reaktörlere göre bir miktar daha fazla olduğu tahminlerini doğurmuştur. Ancak bu tahminlerin işletme sürecinde değişebileceği düşünülmektedir [5.13]. Yakıt çevrimi seçimi SMR'ın kullanılacağı ülke tarafından seçilmektedir. Soğutma tipine göre SMR'lardaki yakıt tasarımlarına ait bazı özellikler aşağıda açıklanmış ve SMR tasarımlarının soğutucu tipi ve teknolojisine göre yakıt özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir [5.2].

*Yakıt olarak  
genellikle  
%5'e kadar  
zenginleştirilmiş  
uranyum  
kullanılmaktadır.*

**Tablo 5.6:** SMR tasarımlarının soğutucu tipi ve teknolojisine göre yakıt özellikleri

|                                             | Su Soğutmalı Reaktörler                       | HTGR'ler                                                              | Sıvı Metal Soğutmalı ve Hızlı Reaktörler      | Ergimiş Tuz Reaktörler                                                                     | Mikroreaktörler        |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Açık Yakıt Çevrimi                          | CAREM ACP100<br>SMART NuScale<br>CANDU        | HTR-PM<br>GTHTR300<br>PBMR<br>GT-MHR<br>Xe-100<br>SC-HTGR             | EM <sup>2</sup>                               | Integral MSR<br>SmTMSR-400                                                                 | Hepsi                  |
| Kapalı Yakıt Çevrimi                        | SHELF                                         |                                                                       | BREST-300-OD,<br>4S<br>SVBR-100               | FUJI<br>LFTR<br>CA Waste<br>Burner (later<br>generation)<br>MCSFR                          | eVinci®, MoveluX       |
| Yakıt İkmal Periyodu >24 ay                 | SMART<br>HAPPY200<br>ABV-6M<br>RITM-200 SHELF | HTR-PM<br>(online yakıt<br>ikmali),<br>GTHTR300                       | MicroURANUS,<br>W-LFR<br>SEALER<br>EM2        | CA Waste<br>Burner                                                                         |                        |
| Zenginleştirme <%5                          | CAREM<br>NuScale, VBER<br>NUWARD<br>ACPR50S   |                                                                       |                                               | Integral SMR<br>Stable Salt<br>Reactor                                                     | MoveluX                |
| %5 ≤ Zenginleştirme ≤ %15                   |                                               | HTR-PM<br>PBMR<br>GTHTR300                                            | BREST-300-OD<br>4S<br>EM2<br>ARC100 Superstar | ThorCon                                                                                    | Energy Well            |
| Zenginleştirme >%15                         | KLT-40S RITM<br>SHELF<br>ABV-6M               | MHR-T<br>MHR-100<br>GT-MHR<br>SC-HTGR<br>Xe-100                       | SVBR<br>SEALER<br>LFR-TL-X<br>W-LFR           | ThorCon                                                                                    | eVinci®, Aurora<br>MMR |
| Harcanan Yakıtın İşlenmesi                  |                                               |                                                                       | BREST-300-OF<br>4S<br>SVBR                    | SmTMSR-400                                                                                 |                        |
| Toryum Çevrimi ve/ya da Plutonyum Kullanımı |                                               | HTMR-100<br>GTHTR300 GT-<br>MHR<br>SC-HTGR<br><br>Hepsi için olabilir | LFR-AS-200<br>Superstar                       | FUJI<br>LFTR<br>Integral MSR<br>CA Waste<br>Burner<br>ThorCon, Moltex<br>SSR<br>SmTMSR-400 |                        |
| Harcanmış Yakıtın Tekrar Kullanılması       |                                               | GTHTR300                                                              | BREST-300-OD                                  | Moltex SSR<br>ve CA Waste<br>Burner                                                        |                        |

## Su Soğutmalı SMR'lar İçin Yakıt

Su soğutmalı SMR'larda açık yakıt çevrimleri kullanılmaktadır. Genelde mevcut hafif su reaktörlerinde %5'e kadar zenginleştirilmiş U-235 yakıt tasarımı kullanılır. 18, 24, 36 hatta 48 aya varan yakıt ikmal periyotlarına ulaşabilmek için bölgesel ısıtmada kullanılan reaktörlerde yanma 30 GWd/tHM (heavy metal)'e kadar, elektrik üretimi için ise yakıt yanma oranının 40 ila 75 GWd/tHM gibi seviyelere erişmesi sağlanır. Böylece; işletme ve bakım masrafları azalmakta ve aynı zamanda %90'ın üzerinde bir kapasite faktörü sağlanmaktadır. Uzun yakıt periyotları Uzun yakıt periyotları emreamadeliği artırmaktadır ancak bu durum düşük yakıt yanma oranları nedeniyle maliyeti de yükseltmektedir [5.13].

Basınçlı su reaktör (PWR) tipi SMR'larda %4.95'ten daha düşük oranda zenginleştirilmiş yakıt kullanılır ve 18-24 ay aralığında bir yakıt ikmal periyodu bulunur. Her periyotta yakıt demetlerinin yarısı yenilenerek yakıt yanma oranı artırılır ve böylece yakıt ekonomisi optimize edilir. Bu tasarımlarda yakıt ikmal süresinin 18 ila 36 gün arasında olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda doğal sirkülasyonlu integral PWR tasarımı örnek alındığında; 24 aylık bir yakıt ikmal periyodu ve üç aşamalı ikmal şeması uygulandığı görülmektedir. Bu ikmal işlemi sırasında yakıt demetlerinin 1/3'ü reaktör modülünden çıkarılıp, yerine 1/3 oranında yeni demetler yerleştirilir. Burada uygulanan üç aşamalı yakıt ikmal tasarımı, yanma ve yakıt kullanım oranını artırarak daha verimli bir yanma sağlamaktadır. Çıkarılan yakıt demetleri kullanılmış yakıtların yer aldığı yakıt havuzuna konulur.

Basınçlı ağır su reaktörü (PHWR) için CANDU SMR örnek verilebilir. Bu tasarım uzun bir geçmişe sahip ve çoğu ülkede lisanslanmış CANDU tasarımına dayalı olarak geliştirilmiş bir reaktördür. Standart tasarım, doğal uranyuma dayanan az ısı üretimli ve atığı çok düşük olan açık devre yakıt çevrimini kullanmaktadır. Doğal uranyum kullanılması, yakıtın zenginleştirilmesine gerek duyulmaması avantajını sağlar. Ayrıca düşük atık özelliği bu tasarımın dünya gündeminde olan sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için çoğu ülkede avantaj olarak görülebilir. Uygun uyarlamalar ile bu tip reaktörlerde MOX (mix-oxide) ve toryum yakıtları da kullanılabilir.

Kaynar su reaktör (BWR) tipi SMR tasarımları; doğal sirkülasyonlu, açık çevrimli standart BWR tasarımı kullanmaktadır. Yakıt değişimi için %15-25 oranları arasında demetler yenileri ile değiştirilerek eski demetler reaktör havuzunda 6 ila 8 yıl arasında değişen sürelerde bekletilir.

Genelde su soğutmalı SMR tasarımlı santrallarda, kullanılmış yakıt için 6 ila 10 yıla kadar ömrü olan depolama rafli yakıt havuzu kullanılır. Bu süre kullanıcının isteğine bağlı olarak bazı tasarımlarda 30 yıla kadar uzatılabilir. Yakıt havuzlarının güvenliği nihai soğutuculara bağlıdır. Kullanılan yakıt depolama rafları uzun yıllar işletme için

gereken alanı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kullanılmayan kusurlu yakıtlar ile kontrol çubuklarına da alan sağlamış olur.

Basınçlı su reaktör (PWR) tipinde SMR tasarımı olan yüzer nükleer santral KLT40-S Akademik Lomonosov Rusya'nın Pevek şehrinde Aralık 2019 tarihinde ticari işletmeye başlamıştır. Reaktörün kor bölgesi gemilerde uygulanan teknolojilere dayanır ve tasarımda IAEA tarafından düşük zenginleştirmeli "Low Enriched Uranium (LEU)" diye tanımlanan %20'nin altında bir U-235 zenginleştirmeli yakıt kullanılır. Bu tasarımın amacı; ulaşılması zor ve uzak bölgelere ısı ve enerji sağlamaktır. Bu nedenle yakıt ikmali yapılmadan uzun periyotlarda çalışması sağlanacak şekilde bir tasarım geliştirilmiştir. Yakıt ikmali, reaktör kapatıldıktan sonra harcanan yakıtta oluşan ısı belli bir değere düştüğünde 14 günlük bir sürede gerçekleştirilir. Özel bir bakıma ya da ikmal gemilerine gerek duyulmaz.

### ***Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı (HTGR) Tipi SMR'lar İçin Yakıt***

Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı modüler reaktör (mHTGR) tipi tasarımlar kazaya sebep olmayacak türden yakıta odaklı SMR tasarımlarıdır. Bu tip reaktörlerde prizmatik ya da çakıl yataklı (pebble bed) kor tasarımı ile TRISO (Triple Coated Isotropic) kaplı yakıt parçacığı kullanılır. 210 MW güce sahip Çin'in 2 üniteli çakıl yataklı HTR-PM SMR'nin 2021 de devreye girmesi planlanmıştır. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı modüler reaktörlerin yakıt yanma oranları su soğutmalı SMR'lara göre yakıt tipi ve çevrimine göre 80 ila 720 GWd/tHM arasında değişir.  $UO_2$ , MOX, Pu yakmalı ve toryum çevrimleri ile adapte olan açık ve kapalı çevrimlerin ikisi de uygulanabilmektedir.

HTRG'lerin çoğu açık çevrim kullanır. Yüksek termal verim ve yüksek yanma oranı ile mHTGR'ler açık devre yakıt çevrimleri için sürdürülebilirliği sağlamaktadırlar.

### ***Hızlı Nötron Spektrum (Fast Neutron Spectrum) Tipi SMR'lar İçin***

Hızlı nötron spektrum tipi SMR'lar su soğutmalı SMR'lar ile karşılaştırıldığında; hızlı nötron spektrum tipi SMR'ların %14-20 arasında değişen daha yüksek bir U-235 zenginleştirme içerdiği görülmektedir. Bu tasarımlarda 30 yıla uzanan yakıt periyotlarını sağlamak için yakıt yanma oranı 60 ila 80 GWd/tHM aralığında tutulmaktadır.

İnşaatına yakında başlanacak olan kurşun soğutmalı hızlı nötron reaktörü BREST-OD-300'ün 2026 yılında tamamlanması hedeflenmektedir. Proje, doğal saf uranyumun enerji potansiyelinin tamamını kullanarak kapalı nükleer yakıt çevrimine göre tasarlanmıştır. BREST-OD-300 hızlı reaktörünün birinci kor ve birinci kısmı yakıt yüklemesi için yakıt tipi, kompozisyonu VVER de kullanılan ve işlenen yaklaşık 25 yıllık yakıta denk gelen plütonyumla karıştırılmış seyreltilmiş uranyum nitrürdür. İlk aşama tamamlandıktan sonra, reaktör kendi harcamış olduğu yakıtın işlenmiş halini kullanarak kapalı çevrim gerçekleştirecektir.

## **Ergimiş Tuz Reaktörü**

Ergimiş tuz reaktörleri (MSR) katı yakıtlı reaktörlerden farklı bir karakter gösterir. MSR lar kaplama gerektirmediğinden ve katı bir yakıt yapısına sahip olmadığından yakıt, yüksek yakıt yanma oranı ya da mekanik hasarlardan kaynaklı arızalara maruz kalmamaktadır. Yakıt zaten ergimiş haldedir ve bu nedenle yakıtın erimesiyle ilgili bir risk söz konusu değildir.

Ergimiş tuz reaktörlerine, 150 aya varan uzun yakıt periyotlarını amaçlayan çeşitli yakıt çevrimleri adapte edilebilmektedir. Yakıt zenginleştirme düzeyleri genelde %5'ten az olmaktadır. Ancak daha yüksek seviyeler olan %19.7 oranında zenginleştirme ile de tasarım yapılabilir.

## **Mikroreaktörler**

Mikroreaktörlerin yakıt çevrimleri yaklaşımlarıyla ilgili bilgiler kısıtlıdır. %4 ila %19.75 arasında bir yakıt zenginleştirilmesi mevcuttur ve yakıt periyotları 36 aydan başlayarak 20 yıl gibi uzun sürelerle ulaşabilmektedir. Elektrik üretimi 1,5 ila 5 MW arasında değişir. Westinghouse eVinci Mikroreaktör koru, High-Assay Low Enriched Uranium (HALEU), TRISO kaplı Uranium Oxycarbide (UCO) ya da kapsüllenmiş başka bir yakıt kullanır. Yakıt ikmali olmadan 3 yıllık bir işletmeden sonra mikroreaktör kendi orijinal kabında yakıt ikmali ya da depolama için fabrikaya gönderilir.

Mikro Modüler Reaktör (MMR) diye adlandırılan başka bir ürün seramik mikro kapsüllü (FCM) yakıt kullanır. Bu durum; fisyon ürünleri salınımları için ekstra bir bariyer oluşturur ve her bir TRISO taneciklerinin yapısal ve çevresel karakteristiklerini geliştirir. Reaktöre 30 yıllık ömründe sadece bir kere yakıt ikmali yapılır.

## **5.4. Atık**

Nükleer santrallarda enerji üretimin sonucunda radyoaktif atıklar oluşmaktadır. Atıklar, içerdikleri radyoaktivite miktarına göre; muaf atıklar, çok kısa ömürlü radyoaktif atıklar, çok düşük seviyeli radyoaktif atıklar, düşük seviyeli radyoaktif atıklar, orta seviyeli radyoaktif atıklar ve yüksek seviyeli radyoaktif atıklar olarak sınıflandırılmaktadır.

Yüksek seviyeli atıklar, doğrudan bertaraf edilecek (yeniden işlenmeyecek) kullanılmış yakıtlar veya kullanılan yakıtların yeniden işlenmesinden sonra ortaya çıkan yüksek derecede radyoaktif, uzun ömürlü ve ısı yayan elementlerdir [5.14].

Kullanılmış yakıtın yönetimi, kullanılan yakıtın ve reaktörün türüne göre, radyasyon güvenliliğinin insan sağlığına, çevreye ve gelecek nesillere tehlike oluşturmadığı sü-

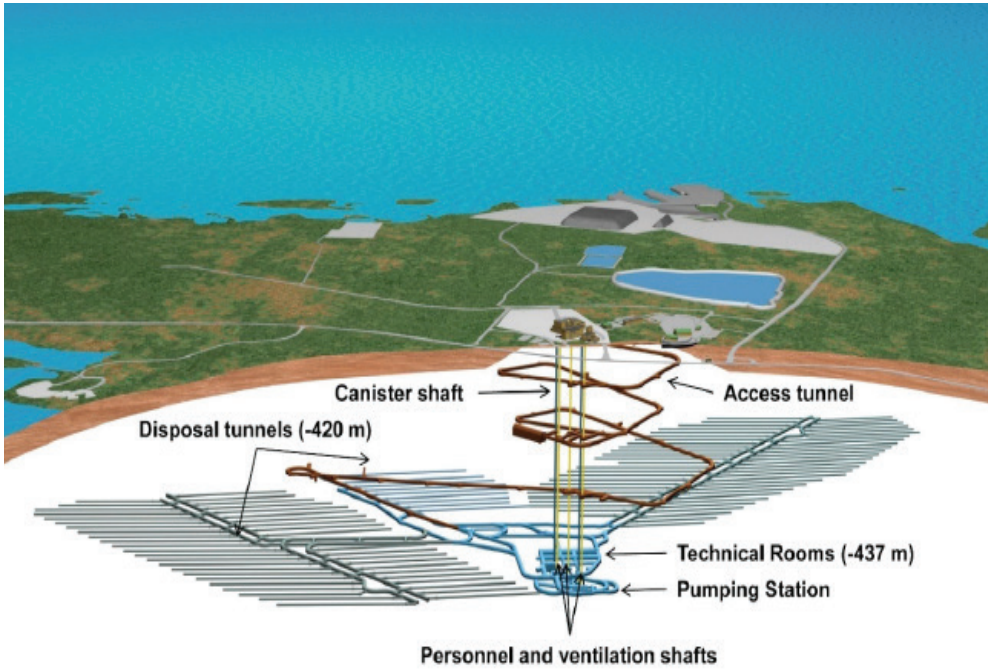


**Şekil 5.3:** İsveç Merkezi Geçici Depolama Tesisi (CLAB) [5.15]

rece değişiklik gösterebilir. Örneğin; Rusya, Fransa, Birleşik Krallık ve Japonya, harcadıkları yakıtları kısmen yeniden işler, yeniden kullanım için uranyum ve plütonyum çıkarır depoda daha az kullanılmış ürün bırakır. Kanada, Finlandiya ve İsveç gibi diğerleri, üretildiği andan itibaren kullanılmış yakıtı depolamayı tercih ederler [5.15].

Finlandiya, İsveç, Fransa ve İsviçre gibi bazı devletler derin jeolojik bertaraf tesisi için yoğun çalışmalar içindedir ve bu konuda ilk olarak Finlandiya şu anda inşa aşamasında olan tesisi 2025 yılı civarında faaliyete geçirmiş olacaktır [5.16].

Yüksek seviyeli atıklar (YSA), radyoaktivite seviyesi yüzünden ısıyı artıran, bu sebeple soğutma ve koruyucu kap gerektiren atıklardır. Bu sebeple kullanılmış yakıtlar reaktör korundan çıkarılınca Şekil 5.3’de görüldüğü üzere reaktörün hemen yanındaki kullanılmış yakıt havuzuna taşınır.

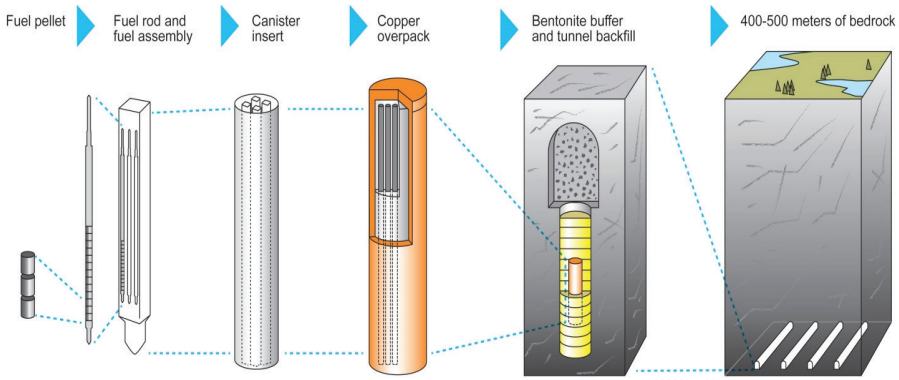


**Şekil 5.4:** Finlandiya Derin Jeolojik Bertaraf Tesisi (Onkalo) [5.15]



Kullanılmış yakıtlar ilk olarak 10 yıl havuzda bekletilir ve ardından özel atık taşıma kapları içerisinde 50 yıl süreyle depolanmak üzere santral sahasındaki kuru depolama tesisine taşınır. Kuru olarak depolanan kullanılmış yakıtlar, bertaraf edilmek üzere özel taşıma kaplarıyla Şekil 5.4'de görüldüğü üzere derin jeolojik bertaraf tesisine (yaklaşık 500- 1000 m derinliğinde) taşınır.

Derin jeolojik bertaraf tesisi, jeolojik yapısı uygun, yer altı sularının ulaşamayacağı kil ve tuz formu gibi yüz binlerce hatta milyonlarca yıl boyunca pratikte değişmeden güvenle depolanabilecek bir sahada, Şekil 5.5'te görüldüğü üzere çoklu bariyer tasarımı olacak şekilde inşa edilir [5.15]. Çoklu bariyer tasarımında bariyerler arasında yalnızca katı atık formu, atık konteyneri, tampon veya dolgu erişim contaları ve ana kaya bulunur.



Şekil 5.5: Çoklu Bariyer Tabanlı Tasarım [5.17]

Küresel olarak, farklı geliştirme aşamalarında yaklaşık 50 SMR tasarımı ve konsepti bulunmaktadır. Arjantin, Çin ve Rusya'da 2022 yılına kadar faaliyete geçmesi planlanan üç SMR tesisi ileri düzey inşaat veya devreye alma aşamasındadır. Bu tip küçük modüler reaktör, geleneksel, büyük nükleer santrallerle aynı yakıtı kullanacağından, kullanılmış yakıtı, büyük reaktörleriyle aynı şekilde yönetilmesi planlanmaktadır.

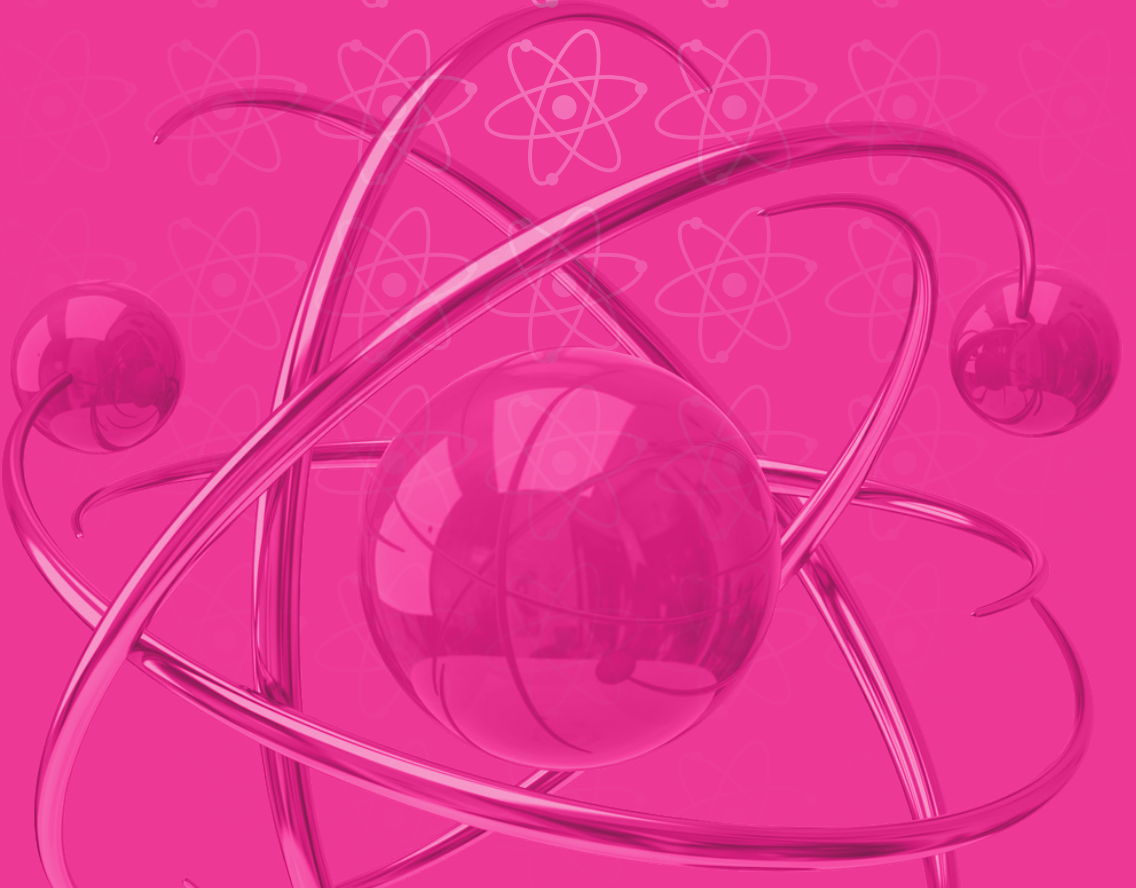
SMR tasarımlarının uranyum zenginleştirilmesi %5-19 arasında olduğundan kullanılan yakıt hacmi artar, fakat yakıt ikmali 3 ila 7 yılda bir, hatta bazılarında yakıt ikmali yaklaşık 30 yıl olması hedeflenmektedir. Bu nedenle kullanılmış yakıt yönetimiyle ilgili işlemlerin daha da azalması beklenmektedir. Bununla birlikte, bu gibi durumlarda bile, uygun şekilde yönetilmesi gereken bir miktar kullanılmış yakıt oluşacağından atık yönetiminde farklı yaklaşımlar gelişebilecektir [5.18].

Örneğin büyük reaktörlerde kullanılan yakıtların havuzlarda depolama süreleri 10 yıl iken, havuzlarda depolama süreleri bazı SMR yakıtları için 20 yıl, bazıları için 100 yıla kadar uzayabilmektedir ve ayrıca Helyum gazı ile soğutma ihtiyacı duyulabilmektedir [5.19, 5.20].

# BÖLÜM

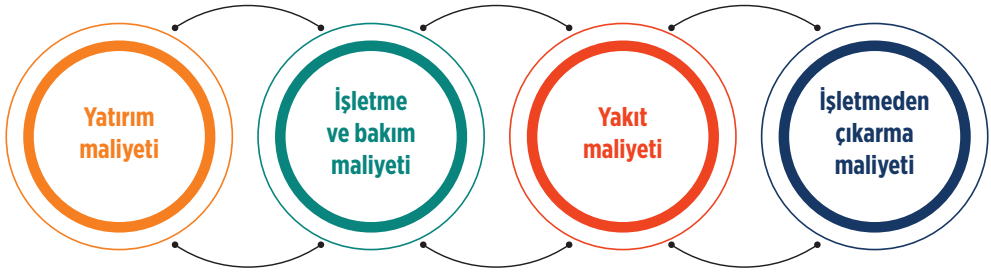
SMR YATIRIM VE  
MALİYET

# 6



## 6. SMR YATIRIM VE MALİYET

Küçük modüler reaktörlerin (SMR'lerin) ekonomisi, sermaye maliyetleri, işletme ve bakım (O&M) maliyetleri ve ayrıca yakıt maliyetleri henüz net bir şekilde bilinmemekle birlikte, SMR tasarımcıları SMR'lerin kWe başına gecelik maliyetlerinin gelişmiş hafif su reaktörlerinin (ALWR) gecelik maliyetinden daha düşük olabileceğini savunmaktadırlar. SMR'lerin standartlaştırılmış basit tasarım ile fabrikada çok sayıda ve seri üretimi, kısa inşaat süreleri, tedarik zincirlerinin optimize edilmesi, kojenerasyona uygunluğuyla esnek saha seçimi ve özellikle özel sektör için cazip yatırım imkânı sunan düşük ilk yatırım maliyetlerine sahip olması gibi temel kriterler büyük ölçekli reaktörlere kıyasla SMR'lere yatırımı günümüzde cazip kılmaya başlamıştır ve bu yöndeki çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Nükleer endüstri, nükleer santral yaşam döngüsü maliyetlerini genellikle şöyle gruplandırır:



Bu değerleri hesaplamak için yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya olarak bilinen iki geniş maliyet tahmini yaklaşımı kullanılabilmektedir. Yukarıdan aşağıya maliyet tahmini yaklaşımında, yeni bir proje halihazırda tamamlanmış benzer projelerle (“proje analogları” olarak adlandırılır) karşılaştırılır. “Proje analoglarında” ihtiyaç duyulan maliyet ve zaman, yeni santral veya bunun parçaları (örneğin bir türbin) için tahmini olarak uyarlanır ve kullanılır. Aşağıdan yukarıya maliyet tahmini yaklaşımında ise, santral faaliyetlere bölünür ve ardından her bir faaliyetin maliyet tahmini yapılır. Tasarımın neredeyse tamamen geliştirildiği inşaatı yakın projeler için ikinci yaklaşım tercih edilirken, bilgi eksikliğinin olduğu erken aşamalarda ilk yaklaşım tercih edilmektedir [6.1].

*SMR'lerin standartlaştırılmış basit tasarım ile fabrikada çok sayıda ve seri üretimi, kısa inşaat süreleri, tedarik zincirlerinin optimize edilmesi, kojenerasyona uygunluğuyla esnek saha seçimi ve özellikle özel sektör için cazip yatırım imkânı sunar.*

### Santrallar, diğer taraftan üç maliyet düzeyi ile sınıflandırılabilir:

1. **Tesis düzeyinde maliyetler (Plant-level costs):** Bir elektrik santralının inşa edilmesi/işletilmesi/işletmeden çıkarılması için doğrudan maliyetler
2. **Şebeke düzeyindeki maliyetler (Grid-level costs):** Ulaşım ve dağıtım şebekelerini geliştirmek, yeni kapasiteyi şebekeye bağlamak, uzun vadeli ve kısa vadeli elektrik arzını sürdürmek için gerekli maliyetler
3. **Toplam sistem maliyetleri:** Paraya çevrilmesi zor ve güç reaktörünün ötesindeki etkiler de dahil olmak üzere daha geniş bir maliyet grubunu temsil eder, örn. CO<sub>2</sub> emisyonu, enerji arz güvenliği üzerindeki etki, ülkenin stratejik konumu vb.

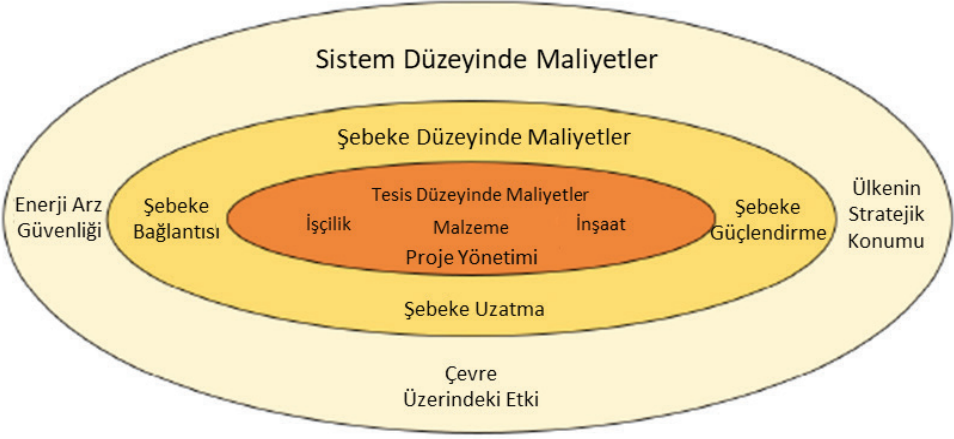
Bir nükleer santrale yatırım yapma kararlılığını belirlemek için çeşitli göstergeler kullanılır. Politika belirleyiciler için en önemli ekonomik göstergelerden biri, nükleer santral tarafından üretilen elektriğin seviyelendirilmiş maliyetidir. Genellikle **“Seviyelendirilmiş Birim Elektrik Maliyeti (Levelized Unit Electricity Cost - LUEC)”** veya **“Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost of Electricity - LCOE)”** olarak adlandırılan bu gösterge, tüm yaşam döngüsü maliyetlerini hesaba katar ve tipik olarak **[\$ (KWh)<sup>-1</sup>]** şeklinde enerji para birimi cinsinden ifade edilir [6.2].

Net Bugünkü Değer (Net Present Value - NPV) ve İç Kârlılık Oranı (Internal Rate of Return-IRR), finansal performansın diğer iki temel göstergesidir. NPV, mutlak kârlılığı [\$] ölçer ve iskonto değerine, yani “mevcut maliyet” ile “gelecekteki gelir”i ağırlıklandırmak için kullanılan faktöre bağlıdır. İndirim değeri genellikle finansman kaynağına bağlıdır ve birçok pratik uygulama için Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti (Weighted Average Cost of Capital - WACC) olarak tasarlanabilir. Düşük bir WACC, nükleer santrallar gibi sermaye yoğun tesisleri teşvik ederek mevcut maliyete ve gelecekteki gelire eş değer ağırlığı verirken, yüksek bir WACC, gazla çalışan elektrik santrali gibi düşük sermaye maliyetli çözümleri teşvik ederek gelecekteki gelirlerden ziyade mevcut maliyete daha fazla ağırlık verir. WACC değeri ne kadar büyük olursa, fayda için kâr o kadar yüksek olur [6.2].

İnşaat ve işletmeyi kapsayan nükleer santral maliyetleri hem küresel olarak *ülkede* hem de en önemlisi *sahada* kaç tane özdeş veya birbirine benzer ünitenin inşa edilmesinin planlandığına bağlıdır. Benzer tesisler birden fazla kez yapıldığında, ekonomi çarpanı elde edilerek maliyet düşüşü sağlanır. Nükleer santralların inşasındaki ekonomi çarpanı bir şekilde, otomotiv endüstrisinde doğan ve daha sonra havacılık, bilişim ve hatta gıda endüstrisi gibi diğer alanlarda benimsenen bir kavram olan “seri üretim” fikrine dayanmaktadır.

Nükleer santrallar için ekonomi çarpanı iki temel faktör sebebiyle elde edilir: öğrenme süreci ve eş zamanlı konumlandırma ekonomisi. Öte yandan, tekno-ekonomik

analizler, birim elektrik başına ortalama yatırım ve işletme maliyetlerinin, artan tesis büyüklüğü ile azaldığını göstermektedir (*Ölçek ekonomisi*) [6.3].

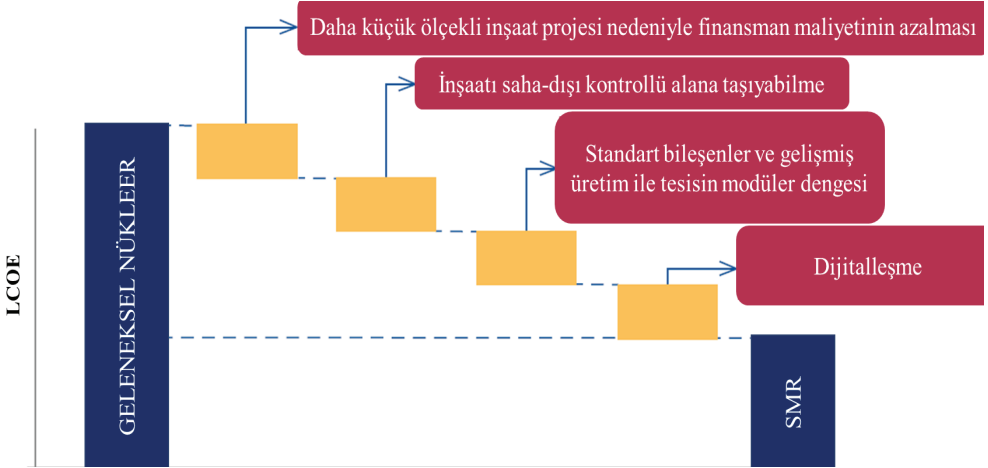


Şekil 6.1: Maliyet düzeyleri [6.4]

SMR'lerin büyük ölçekli reaktörlere (LR) karşı *rekabet gücünü* ve SMR'lerin *ölçek ekonomisini* ekonomi çarpanı ile nasıl dengeleyebileceğini tartışan birçok makale mevcuttur. Ölçek ekonomisi ilkesi bütün parametrelerin eşit olması temeline dayandığından, büyük ölçekli reaktörlerin yatırım analizlerini SMR'lere doğrudan aktarmak doğru değildir. Bu ilke ile SMR'lerin boyut dışında büyük ölçekli reaktörlerle aynı olduğu varsayımı yapılır.

Büyük ve küçük ünitelerin tasarımları çok benzerse, daha büyük bir ünitenin birim sermaye maliyeti, daha küçük bir tasarımdan önemli ölçüde daha ucuz olacaktır. Buna karşılık, SMR'ler, daha küçük yenilikçi reaktörler için benzersiz bir şekilde mevcut olan ve büyük ölçekli reaktörler tarafından yalnızca çok sınırlı bir ölçüde çoğaltılabilen çeşitli faydalar sergiler. En önemlileri şunlardır: Modülerleştirme, eş zamanlı konumlandırma, yerleşim yerlerine yakın kurulabilme, teknoloji transferinin daha kolay olması, öğrenme ve inşaat süresinin kısa olması, öngörülen daha kısa lisanslama süreci, öngörülen daha kolay kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık yönetimi, daha az iletim altyapısı gereksinimi vb.

SMR'lerin geleneksel nükleer reaktörlere kıyasla rekabet gücünü ortaya koyma ve artırmada en temel etken SMR sipariş hacminin büyüklüğüdür. Buda, SMR üretim tesislerine yapılacak yatırımı doğrudan etkileyecek bir faktördür. Ayrıca daha düşük LCOE elde edilmesi noktasında Şekil 6.2'de kısaca belirtildiği gibi SMR'lerin sunduğu birçok avantajda mevcuttur. Şimdi sırasıyla temel SMR ekonomik değişkenleri ele alınacaktır.



Şekil 6.2: SMR, geleneksel nükleer ile karşılaştırıldığında nasıl daha düşük bir LCOE elde edebilir? [6.5]

## 6.1. Maliyetler

SMR yatırım maliyetlerinin de kapsamı, ALWR'lerde olduğu gibi, mühendislik-satın alma- inşaat (EPC) maliyetleri, öz sermaye maliyetleri ve çeşitli lisanslama maliyetlerinden oluşmaktadır. Gecelik maliyet, beklenmedik haller ve finansman maliyetlerinin hepsi toplam sermaye yatırım maliyetini verir.

Ölçek ekonomileri SMR'ler için elverişsiz olsa da, ünitelerin fabrika montajlı üretiminin ve daha kısa inşaat sürelerinin, kWe başına inşaat maliyetini azaltabileceği düşünülmektedir. Tahminler, bu faktörlerin kombinasyonunun toplam gecelik maliyetlere ve kWe başına gecelik maliyetlere ALWR'lerden daha düşük olacak şekilde etkiyeceğini göstermektedir.

Daha düşük mutlak maliyetleri, daha kısa inşaat süreleri ve fabrika üretimine bağlı genel inşaat risklerinin daha düşük olması sebebiyle, SMR'ler için finansmanın ALWR'lere göre daha kolay olması beklenmektedir. Özellikle, finansman koşulları (örneğin sermaye maliyetleri) ilk ünite için de aynı olsa bile, başarılı bir şekilde inşa edilmesi ve işletilmesi sonraki üniteler için finansman koşullarını kolaylaştıracaktır. Bu tür *kademeli kapasite artışı*, uzun vadeli ve sermaye yoğun projelerin doğuracağı finansal riskin daha iyi yönetilmesine olanak tanır.

Proje yapısı ve yönetimi ise üretilen kWe başına düşen sermaye maliyetlerini düşürme potansiyeli taşıyan bir diğer önemli faktördür. Son on yılda ALWR'ler için MWh başına ortalama sermaye maliyetlerindeki artış, çoğunlukla satıcı/tedarikçi anlaşmaları ve risk yönetiminden (maliyeti %70 artırarak), yükselen emtia fiyatlarından (%25 daha fazlası eklenerek) ve artan öz sermaye maliyetlerinden (yaklaşık %17,5) kaynaklanmaktadır [6.6]. Bu faktörler ALWR'lerin maliyetlerini iki katından



fazla artırmıştır. Parçalanmış tedarik zinciri ve beklenmedik durumların ve marjların gözlenmesi, maliyetlerin büyük ölçüde artmasına neden olmuştur.

ALWR'lere kıyasla, SMR'lerin tedarikçiler tarafından daha entegre bir tedarik zincirine ve nükleer ada içinde daha az sayıda alt yüklenici katmanına yer vermesi beklenir. Bu tür düzenlemeler, beklenmedik durumların katmanlaşmasını ve çoğalmasını azaltma potansiyeline sahiptir.

Mevcut tahminler, optimize edilmiş tedarik zincirleriyle ilgili potansiyel tasarruflar ve daha düşük finansman maliyetleri nedeniyle, üretilen kWe başına düşen yatırım maliyetinin SMR'ler için ALWR'lere göre daha düşük olabileceğini göstermektedir. Elbette bu, modüllerin üretimi için tesis(ler)in başarılı bir şekilde lisanslanmasına ve kurulmasına, seri üretim boyutuna, sipariş hacmine ve bir sonraki bölümde yer verilecek olan faktörlere de büyük ölçüde bağlı olacaktır.

### ***İşletme ve Bakım ile Yakıt Maliyetleri***

İşletme ve bakım maliyetleri; işletme, bakım, yönetim, malzeme temini, lisans ücretleri ve personel maaşları ile ilgili maliyetleri içerir.

İşletme ve bakım maliyetlerinin sabit bir bileşeni olan güvenlik maliyeti tesisin büyüklüğünden bağımsızdır. İşletme ve Bakım bileşeni ALWR'ler için tipik olarak 10-20 USD/MWh aralığındadır [6.7]. Bu maliyetler ALWR'ler için SMR'lerin güç seviyelerine indirgenirse, MWh başına İşletme ve Bakım maliyeti, SMR'ler için ALWR'lerden daha yüksek olabilir. Ancak, birden fazla SMR ünitesine sahip çok üniteli tesisler için, MWh başına İşletme ve Bakım maliyetlerinin, yasal gerekliliklerdeki değişikliklerle birlikte düşmesi beklenmektedir.

Bununla birlikte, birçok SMR, tesis işletimi için işletme ve bakım maliyetlerinin düşürülmesini sağlayabilecek yenilikçi çözümler önermektedir. Birkaç reaktör için tek bir kontrol odası kurmak, yerinde yakıt ikmali yapmak yerine reaktörlerin değiştirilmesi (örneğin yüzen nükleer santraller için) gibi çözümler bunlardan bazılarıdır. Bu tür faktörlerden bağımsız olarak, çok üniteli bir tesisin işletilmesi, personel sayısını optimize ederek İşletme ve Bakım maliyetlerinde azalmaya olanak tanır. Örneğin, bir ALWR için yakıt ikmali ve bakım çalışmaları yapmak üzere her 1-2 yılda bir dışarıdan ekipler kiralamak yerine, bir SMR filosunu işleten kuruluş personeli optimize edebilir ve her bir SMR ünitesinde teker teker yakıt ikmali ya da bakım çalışması yapabilir. Bu şekilde yedek güç maliyetleri de azaltılmış olur.

Değişken maliyetin yakıt bileşeni; uranyum maliyetleri, dönüştürme ve zenginleştirme hizmetleri, yakıt üretimi ve yakıt döngüsünün sonraki (back-end) maliyeti dahil olmak üzere yeni yakıtın fiyatına bağlıdır. ALWR'ler için yakıt maliyet bileşeni, yakıt

girdilerinin fiyatının ve ortalama yanan yakıtın bir fonksiyonu olmak üzere 6,5-13 USD/MWh aralığındadır [6.8].

Yenilikçi SMR'lerin yakıt maliyetlerine ilişkin tahminlerde bulunmak, özellikle birçoğunun tasarımının henüz sonuçlanmadığı göz önüne alındığında zordur. Daha küçük ortalama yakıt yanma oranı ve yakıt üretim maliyeti dikkate alındığında, MWh başına yakıt maliyeti, entegre hafif su SMR'leri için Gelişmiş LWR'lere göre daha yüksek olabilir [6.6].

### **İşletmeden Çıkarma Maliyetleri**

Nükleer santrallerin işletmeden çıkarılması karmaşık, uzun ve pahalı bir süreçtir. Bununla birlikte, SMR'leri işletmeden çıkarma maliyeti hem bilimsel hem de endüstriyel literatürde analiz edilen en düşük yaşam döngüsü maliyeti bileşenidir. Fabrika üretimli SMR'ler için devreden çıkarma aşaması, monte edilmiş bir şekilde fabrikaya geri taşınabildikleri için teknik olarak daha kolay görünmektedir. Hizmet dışı bırakılmış nükleer santral bileşenlerinin fabrikada sökülmesinin ve geri dönüştürülmesinin, yerinde faaliyete kıyasla daha ucuz olması beklenmektedir. Ancak, işletmeden çıkarma maliyet tahminleri araştırmalara göre farklılık göstermektedir. Yapılan bir çalışmada, bir veya iki büyük ölçekli reaktör (1340MWe) ile dört veya sekiz SMR (IRIS reaktörü, 335 MWe) hemen ve gecikmeli işletmeden çıkarma durumları açısından karşılaştırılmıştır [6.3]. Analiz göstermektedir ki, ölçek ekonomisi tek etken olarak ele alındığında SMR'lerin işletmeden çıkarma maliyeti  $(\$/\text{MWe})^{-1}$  üç kat daha fazladır. Ancak, saha paylaşımı ve farklı teknolojik çözümler gibi diğer faktörlerin dikkate alınması durumunda aradaki farkın azaldığı gösterilmiştir.

### **Elektrik Üretim Maliyeti**

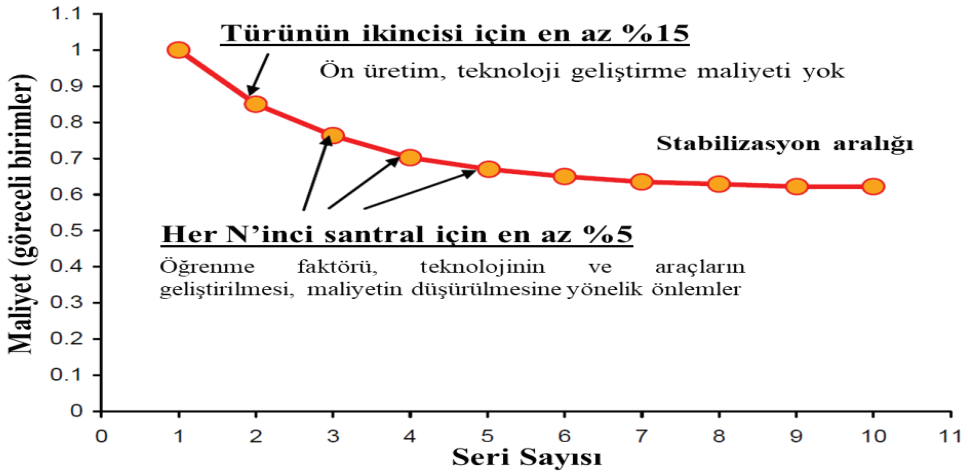
SMR üretim maliyetlerinin bileşenlerine ilişkin belirsizlikler mevcuttur. Ancak, beklenen rekabet avantajları gerçekleşirse hem mutlak hem de kWe başına toplam inşaat maliyetleri açısından SMR'leri inşa etmek büyük reaktörlerden daha uygun fiyatlara denk gelebilecektir. Türünün ilk örneği (FOAK) SMR'ler için kWe başına gecelik maliyet tahminleri, ALWR NOAK maliyetlerinden daha yüksek olabilir, ancak SMR inşaatı olgunlaştıkça daha az belirsizlikler ve daha kısa inşaat süreleri nedeniyle düşüşler sağlanabilir.

## **6.2. Yatırım**

Büyük ölçekli reaktörlere göre yatırım riskinin azaltılması, SMR'lerin önemli bir avantajıdır. SMR'ler, büyük ölçekli reaktörlere göre daha düşük ön yatırım, inşa-

at sırasında daha düşük risk altındaki sermaye ve daha düşük finansal tehlike ile karakterize edilir ve yatırım riskinin azaltılmasına olanak tanır. Dolayısıyla SMR'ler, genellikle ulusal devlet kurumları veya halihazırda birden fazla nükleer santrallara sahip şirketler tarafından yapılan ve yapılmakta olan nükleer santralların finansal riskini azaltmak için bir çözüm olabileceğinden büyük ölçekli reaktörlere göre yatırım artışlarını çekme olasılığını doğuracaktır. Aynı zamanda birden fazla ünitenin aynı sahada art arda eklenmesiyle karakterize edilen SMR'lerde tamamlanmış ünitelerden elde edilen gelir ile birbirini izleyen ünitelerin inşası finanse edilir ve bu durum yatırımcıda güven sağlamak için yardımcı bir husustur. SMR'lerin ilk yatırım maliyetinin daha yüksek olmasına rağmen faaliyette olan önceki üniteler tarafından oluşturulan marjdan faydalanmaları sayesinde SMR'ler büyük ölçekli reaktörlerden daha düşük bir öz sermaye ile karakterize edilirler. Bununla birlikte, teknoloji fizibilitesinin bazı yönlerinin kanıtlanması gerektiği ve ticari dağıtımın uzun ve karmaşık olabileceği göz önüne alındığında, çok az yatırımcı bu erken aşama risklerini almaya eğilimlidir.

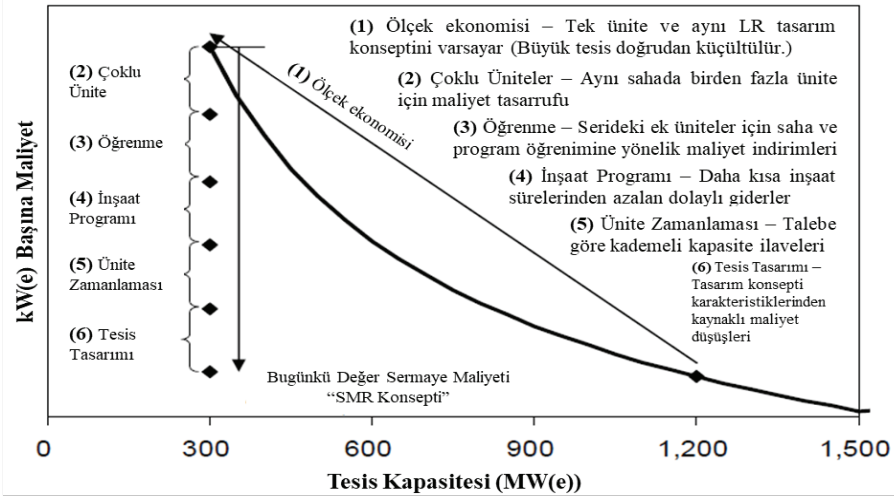
Nükleer santrallarda maliyet etkin bir tablo elde edebilmek için seri üretimin önemi büyüktür. Bu sayede ekipman imalat ve kurulum maliyetlerinde önemli ölçüde azalma sağlanabilecektir. Bu yolla elde edilecek olan maliyet azaltma eğrisi Şekil 6.3'te görülebilmektedir. Türünün ilk örneği (FOAK) olan bir nükleer santral örneğinde ilk santral maliyeti 1 olarak alınmış ve ikinci santralde %15 ve sonrasında ilk 5-6 santrale kadar her bir santralde en az %5 oranında bir maliyet azalması görüleceği belirtilmiştir. Yaklaşık olarak 8-10 santral inşasından sonra ekipman imalat ve kurulum maliyetlerinin ilk santral maliyetlerine kıyasla %40 seviyesinde azalabileceği görülmektedir.



Şekil 6.3: Nükleer santrallarda seri üretim ile ekipman imalat ve kurulum maliyetlerinde sağlanan azalma [6.9]

Büyük ölçekli reaktör ile küçük ölçekli reaktör yatırımcılarının kW(e) başına yaptıkları nispi maliyet karşılaştırması altı temel faktörün ilişkilendirildiği “bugünkü değer sermaye maliyet yaklaşımı” modeli (PVCC Model) ile yapılmaktadır. Bu altı faktör; ölçek ekonomisi, çoklu ünite, öğrenme, inşaat programı(takvimi), ünite zamanlaması ve tesis tasarımı unsurlarını içermektedir. Tesis kapasitesi ve kW(e) başına kurulum maliyeti eğrisinin bu altı faktör temelinde nasıl şekillendiği Şekil 6.4'te gösterilmektedir.

Bir büyük ölçekli reaktör tesisi ile aynı toplam tesis kapasitesini elde edebilmek için birden fazla SMR gerektiğinden, çoklu ünite ve öğrenme eğrisi maliyet tasarrufları nedeniyle ilkinden sonraki ünitelerin gecelik maliyetine tasarruf sağlar. İlk birimde bazı sabit ve tekrarlanamayan maliyetler olduğundan, ek birimlerin her birinin gecelik maliyeti ilk birimden daha düşük olacaktır. Tek bir sahada birden fazla birimin konuşlandırılmasının diğer avantajları ise altyapının paylaşılması ve saha malzemesinin ve insan kaynaklarının daha iyi kullanılmasıdır. Bu tasarruflar, tek bir sahada veya daha büyük bir inşaat programı dahilindeki birden fazla sahada inşa edilen çoklu ünitelerin ortalama maliyetini düşürür. Yapılan çalışmalarda bir sahada 4-5 ünitenin birbiri ardı sıra kurulmasının maliyetleri %15-%25 aralığında düşüreceği tahmin edilmektedir [6.10, 6.11].



Şekil 6.4: SMR'lar ve büyük ölçekli reaktörlerin karşılaştırmalı maliyetlerini etkileyen faktörlerin genel görünümü [6.10]

Daha küçük güç seviyelerinde mümkün olan tesis tasarım konseptleriyle daha uygun maliyetli tasarımlar elde edilebildiği ölçüde, gecelik maliyetler daha da düşürülebilir. Bu maliyet tasarrufları (i) daha basit, daha az ve daha az karmaşık bileşenler (entegre ekipman tasarımı); (ii) alternatif güvenlik sistemi yaklaşımları ve (iii) daha yüksek derecede modülerleştirme ve fabrika üretimi ile sağlanabilir.

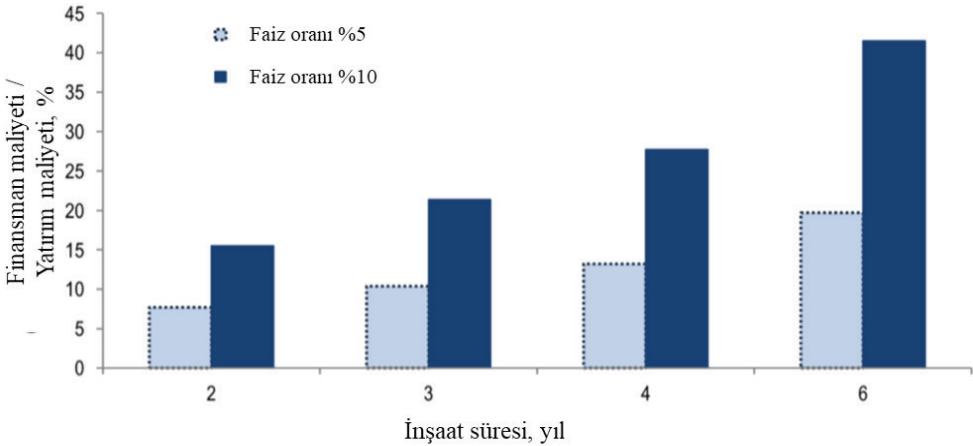
SMR'lerdeki bileşenler ve sistemler daha büyük reaktör tasarımlarının küçültülmüş versiyonları olur ise, kW(e) başına oluşacak maliyetler büyük ölçekli reaktörlere göre daha yüksek olacak şekillerde sonuçlanır. Bir diğer deyişle, nükleer santrallerde kurulu güç arttıkça gecelik maliyetlerin düştüğü bilinmektedir.

Bu hesaplama için kullanılan formül aşağıda basitçe ifade edilmiştir:

$$(\text{Gecelik Sermaye Maliyeti})_{\text{SMR}} = (\text{Gecelik Sermaye Maliyeti})_{\text{LR}} \times \left( \frac{\text{Boyut}_{\text{SMR}}}{\text{Boyut}_{\text{LR}}} \right)^{n-1}$$

**n:** 300 - 1300 MW reaktörler için ölçeklendirme faktörü [0.4-0.7]

“n” ile ifade edilen ölçeklendirme faktörünün sınır değerleri dikkate alınarak bir hesaplama yapıldığında görülmektedir ki SMR'lerde yaklaşık olarak %75 ile %150 arasında bir maliyet artışı meydana gelecektir. Buna karşın, SMR tasarımları daha büyük reaktör tasarımlarında gerekli olan belirli bileşenler ve sistemler için gerekliliği ortadan kaldırayabileceği gibi kalan bileşenlerin ve sistemlerin çoğu önemli ölçüde farklı tasarım konseptlerine ve yaklaşımlarına dayanabilecektir. Buda maliyetlerdeki artışı önleyebilecek bir durum olabilir.



**Şekil 6.5:** İnşaat süresi ve faiz oranının bir fonksiyonu olarak finansman maliyeti [6.12]

Santral inşa süreleri de projenin finansman maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha kısa inşa takvimleri ile daha küçük fiziksel tesis boyutları inşa edilebilir. Belirli bir işletmeye başlama tarihine sahip kısa programlar, düşük dolaylı giderler

nedeniyle daha düşük toplam sermaye yatırım maliyetleri ile sonuçlanabilir. Zaman çizelgesindeki artış özellikle işçilik maliyetlerini, bina altyapıları için kira ücretlerini (örneğin özel vinçler), inşaat süresince faizi etkilemektedir. Bu sebeple rapor genelinde de bahsedilen çeşitli karakteristik avantajlara sahip küçük boyutlu SMR'ler daha kısa inşaat süreleri ile daha düşük inşaat maliyetleri gerektirirler. Ayrıca, tamamlanma öncesi riskler de azaltılmış olur. Şekil 6.5'te %5 ve %10 faiz oranı için oluşturulmuş inşaat süresi ve faiz oranının bir fonksiyonu olarak finansman maliyeti grafiği yer almaktadır. İnşaat süresinin 6 yıldan 3 yıla düşmesi ile maliyetin yaklaşık olarak %10-%20 düştüğü gözlemlenmiştir.

SMR inşaat süresi ne kadar kısa olursa, yatırımın net bugünkü değeri (NPV) o kadar yüksek olur. SMR'ler için mevcut programlar, FOAK için tipik olarak üç yılı ve ardından NOAK için iki yılı hedeflemektedir. Uygun bir zaman çerçevesi üzerine inşa edilmiş birden fazla SMR ile bir güç gereksinimini karşılamak, sermaye harcamalarını zamana yayabilecektir.

### **Genel Değerlendirme**

Büyük ölçekli reaktörlere yatırımın ekonomik riski çok daha büyüktür. Büyük reaktörlerin uzun teslim süreleri göz önüne alındığında, büyük ölçekli reaktörleri benimseyen yatırımcılar uzun vadeli planlama yoluyla elektrik fiyatı ve talebindeki yukarı-aşağı dalgalanmalar ile yerel talep artışı veya azalması durumlarıyla başa çıkmak zorundadır. Tesis kurulumunda zamansal ve mekânsal esneklik sağlayan, daha kısa teslim süreleriyle ölçeklenebilir, modüler ve küçük boyutlu olan SMR'ler, yatırımcıların değişen piyasa koşullarının erken sinyallerine daha hızlı ve rahat adapte olmalarına olanak tanır. Yatırımcılar böylelikle büyük ölçekli reaktör yatırımından daha az piyasa belirsizliğine maruz kalırlar.

Belirli bir kurulu güç için, bir SMR tarafından sağlanan güç, bir büyük ölçekli reaktör tarafından sağlanan gücün yalnızca bir kısmını karşıladığından, SMR'ler büyük ölçekli reaktörlerden çok daha fazla sayıda üretilmelidirler. Bu nedenle, sistem ve bileşenlerin yüksek miktarda toplu sipariş sürecine sahip olmak mümkün olur. Bu özellik, SMR'lerin seri üretim ekonomisi ve daha standart bir tedarik süreci elde etmelerini sağlar.

Bir SMR'nin birim maliyeti elbette daha büyük bir tesisin maliyetinin çok küçük bir kısmına denk gelmektedir (birkaç milyar dolar yerine birkaç yüz milyon dolar gibi). Bu azalma, sınırlı kaynaklara sahip bir kuruluş veya ülke için kritik bir faktör olmaktadır. Bu nedenle, raporda da birçok kez ifade edildiği gibi, belirli bir boyut için çoklu SMR'lerin finansal maliyetleri büyük ölçekli reaktörlerden daha düşük olabilmektedir. Tüm bu etkenler yatırımcıların dikkatini büyük ölçekli reaktörlerden çok SMR'ler üzerinde yoğunlaştırmasını ve nükleer sektöre girmelerini sağlamaktadır.





# BÖLÜM

TÜRKİYE NÜKLEER  
SANTRAL SÜRECİ



## 7. TÜRKİYE NÜKLEER SANTRAL SÜRECİ

*Bu bölümde tarihçe, Akkuyu Nükleer Santralleri faaliyetleri, SMR çalışmaları ve genel olarak mevzuat yapısı yer almaktadır<sup>1</sup>.*

### 7.1. Türkiye’de Nükleer Santral Tarihçe

Türkiye’de nükleer enerjiden elektrik üretimine yönelik faaliyetleri ve gösterilen çabaları sürecin tarihçesine detaylı bir şekilde bakılarak ortaya konmuştur.

Türkiye’de nükleer enerji ile ilgili ilk çalışmalar 1955 yılında “Atom Enerjisinin Barışçıl Amaçlarla Kullanılması” amacıyla toplanan 1. Cenevre Konferansı’ndan hemen sonra başlamıştır. 1956 yılında Türkiye ile ABD arasında, “Barış için Atom” isimli program çerçevesinde Nükleer Enerjinin Barışçıl Amaçlarla Kullanılmasına Dair İşbirliği Anlaşması imzalanmıştır. Bu anlaşmada; ABD Atom Enerjisi Komisyonu’nun “ödünç” olarak vereceği izotoplarla barışçıl tıbbi ve teknik amaçlara yönelik bir reaktör tesis edilmesi yer almaktadır. 10 Eylül 1956 tarihinde NATO üyeleri arasında nükleer alanda işbirliğine ilişkin bir anlaşma imzalanmasını müteakip 6821 sayılı Kanun ile atom enerjisinin ilmi, iktisadi, teknik ve idari çalışmalarını teşvik, koordine ve denetleme işlemleri ile görevli Atom Enerjisi Komisyonu Genel Sekreterliği (AEK) kurulmuştur. AEK’in kurulması ile Türkiye 1957 yılında Birleşmiş Milletler’in bir kuruluşu olan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı’nın (IAEA) üyesi olmuştur.

1961 yılında kuruluşu tamamlanan Çekmece Nükleer Araştırma Eğitim Merkezince (ÇNAEM), 1 MW gücünde eğitim ve temel araştırmalar için yararlanılan bir deney reaktörü işletmeye alınmıştır. Ayrıca yine AEK’na bağlı olarak Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ANAEM), Lalahan Hayvan Sağlığı Nükleer Araştırma Enstitüsü (LHNAE), Ankara Nükleer Tarım ve Araştırma Merkezi (ANTAM) gibi kuruluşlarda nükleer alandaki temel bilimsel eğitim ve araştırma çalışmaları başlatılmıştır.

*Türkiye’de nükleer enerji ile ilgili ilk çalışmalar 1955 yılında “Atom Enerjisinin Barışçıl Amaçlarla Kullanılması” amacıyla toplanan 1. Cenevre Konferansı’ndan hemen sonra başlamıştır.*

<sup>1</sup> Bu bölüm ETKB, TEK, TEAŞ, EÜAŞ ve TETAŞ Kurum-Kuruluşların hazırladığı faaliyet raporlarına bağlı olarak ilgili dökümanlardan faydalanılarak hazırlanmıştır.

İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1968 – 1972) uyarınca, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ile Elektrik İşleri Etüt İdaresinin (EİEİ) yabancı bir müşavirlik grubuna hazırlattığı fizibilite raporuna göre, 300-400 MWe gücünde 1977 yılında işletmeye girecek şekilde “ağır-su” tipi bir nükleer santral kurulması öngörülmüştür. Ancak, yer seçiminde karşılaşılan güçlükler ve 1970- 71 yıllarındaki ekonomik ve politik gelişmeler nedeniyle bu projeye devam edilememiştir.

1970’li yılların başlarında, nükleer santral sahası için fizibilite ve yer araştırmaları gerçekleştirilmiştir.1970 yılı sonlarında elektrik sektörü yeniden düzenlenerek Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) kurulmuş ve o zamana kadar EİEİ ve Etibank tarafından yürütülen elektrik işleri tek elde toplanmıştır. TEK’e bağlı olarak kurulan Nükleer Enerji Dairesi 1972 yılı başında çalışmaya başlamıştır.

Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planında (1973 – 1977), daha büyük güçte bir santralin ve bunun yanı sıra eğitim amaçlı bir prototip santralin yapımı yer almasına rağmen 1974 yılında büyük güçteki bir nükleer santralin kuruluşunu geciktireceği gerekçeyle, eğitim amaçlı prototip nükleer santralin kuruluşundan vazgeçilmiştir.

Santral yeri seçimine ilişkin bilimsel/teknik kriterler ve güvenlik faktörleri çerçevesinde, Mersin - Silifke’nin 35-40 km batısındaki Akkuyu mevki, ilk nükleer santralin kuruluş yeri olarak tespit edilmiştir. Akkuyu Sahası için TEK tarafından saha lisans çalışmaları gerçekleştirilmiş ve yapılan yer etütlerine ve araştırmalarına dayanarak, Akkuyu için “Yer Raporu” hazırlanmıştır. Bu rapor, dönemin lisanslama otoritesi olan Başbakanlık AEK’na sunulmuştur. AEK, Akkuyu Sahası için 1976 yılında “Yer Lisansı” vermiştir.

Akkuyu yer lisansının alınmasının ardından 1977 yılında, 600 MW nominal kapasiteli, türbin ve nükleer ada için ayrı ayrı olmak üzere paket ihale usulü yöntemiyle ihaleye çıkmıştır. PWR, BWR, PHWR reaktör tiplerinde teklifler alınmış ve 1978 yılında teklifler değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda BWR teklifi uygun bulunmuş ve sözleşme görüşmeleri yapılmıştır. Ancak, 1979 yılında değerlendirilmenin sonuçlandırılmadığı beyan edilmiştir.

Nükleer santral yapılacak sahanın tespiti ve ilgili araştırmalar çok uzun zaman aldığından 1980 yılı başlarında ikinci bir santral yeri olarak Sinop yakınlarındaki İnceburun mevki seçilmiş ve burada ön araştırmalar yapılmıştır.

Türkiye’deki nükleer santrallerin barışçıl anlaşmalara yönelik işletildiğinin bir göstergesi olarak 1981 yılında ise IAEA ile Güvence (Safeguard) Anlaşması imzalanarak IAEA uzmanlarının kontrolü kabul edilmiştir. Aynı yıl ÇNAEM’de TR-2 araştırma reaktörü kurulmuştur. 9 Temmuz 1982 yılında 2690 sayılı Kanun ile AEK statüsü değişmiş ve lisanslama otoritesi olarak görevlendirilen Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) kurulmuştur.



1983 yılında üç adet nükleer santral kurulumu için karar verilmiş ve tüm ihale, mühendislik, imalat, tesis, işletme, yakıt temini ve kullanılmış yakıtların depolanmasını yürütmek üzere Nükleer Elektrik Santralleri Kurumu'nun (NELSAK) kurulduğu açıklanmıştır<sup>2</sup>. Bu açıklama ile Akkuyu Nükleer Santralının yapımı için 1983 yılında açılan ihale TEK tarafından düzenlenmiş ve santralın yap-işlet-devret modeli ile yapılması öngörülmüştür. Ancak finansman sorunları yüzünden ihale sonuçlandırılmamış ve görüşmeler kesilmiştir.

Ukrayna'da (eski SSCB) Nisan 1986'da meydana gelen Çernobil Nükleer Kazasının yarattığı olumsuz ortam nedeniyle, Türkiye'de nükleer santral çalışmaları askıya alınmıştır.

Aradan geçen uzun süreden sonra Ocak 1993 tarihinde Akkuyu Nükleer Santrali, Resmi Gazete'de yayınlanarak tekrar yatırım programına alınmıştır. Bu kararla Şubat 1995'de o tarihe kadar olan çalışmaları düzenlemek ve güncel hale getirmek üzere G. Kore'nin KAERI ve Türkiye'den GAMB firmaları ile bir sözleşme imzalanmıştır.

Akkuyu Nükleer Santrali yapımı bir kez daha gündeme alınarak TEAŞ Nükleer Santraller Dairesi tarafından 17 Aralık 1996'da ihaleye çıkmıştır.

Tekliflerin değerlendirilmesi ve sözleşme görüşmeleri müşavirlik hizmetleri için Haziran 1997'de davet usulü ile uluslararası ihaleye çıkmıştır. 15 Ekim 1997 tarihinde Akkuyu Nükleer Santrali için, aşağıda listelenen 3 konsorsiyumdan teklif alınmıştır;

- > NPI Konsorsiyumu (Fransa-Almanya)
- > WESTINGHOUSE Konsorsiyumu (ABD-Japonya)
- > CANDU Konsorsiyumu (Kanada-Japonya)

Tekliflerin değerlendirilmesi ve sözleşme görüşmeleri müşavirlik hizmetleri için Şubat 1998 tarihinde İspanyol "Empresarios Agrupados Internacional S.A." danışmanlık firması ile sözleşme imzalanmış ve Mart 1998'de tekliflerin değerlendirilmesine başlanmıştır. Ancak çeşitli sebeplerden dolayı 25 Temmuz 2000'de Bakanlar Kurulu Kararı ile ihale iptal edilmiş ve ikinci defa kurulmuş olan TEAŞ Nükleer Santraller Dairesi Başkanlığı kapatılmıştır.

2002 yılı sonlarında, Başbakanlığa bağlı lisanslama otoritesi TAEK, ETKB'ye bağlanmıştır. 2004 yılında ETKB, nükleer santral kurulması ile ilgili TAEK'in görevlendirildiğini beyan etmesinden sonra inşasına 2007 yılında başlanacak ve ilk ünitesi

2 Kurulmuşsa da hiçbir zaman işlerlik kazandırılmamış olan NELSAK 1993 yılında 3743 sayılı yasayla kaldırılmıştır.

2012 yılında devreye girecek şekilde toplam 5000 MWe'lik üç nükleer reaktör yapılacağı açıklanmıştır.

TAEK, 2005 yılında saha belirleme çalışmalarını yürüttüğünü beyan etmiş ve ilerleyen süreçte 2006 yılında TBMM KİT komisyonunda, TAEK tarafından 43 kritere bakılarak nükleer santral kurulumu için sekiz adet yerin incelendiği ve sonuçta Sinop'ta nükleer teknoloji merkezi ve hemen yakınında nükleer reaktörlerin kurulmasına karar verildiği belirtilmiştir.

ETKB, 13 Nisan 2006 tarihinde, önde gelen 14 özel sektör firma temsilcisinin katılımıyla bir nükleer santral zirvesi düzenlemiştir. Kasım 2006'da Meclis'e sunulan "Nükleer Güç Santrallerinin Kurulması ve İşletilmesi ile Enerji Satışına İlişkin Kanun Tasarısı" 20 Kasım 2007 tarihinde 5710 sayılı Kanun olarak Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu Kanun ile mülga TETAŞ, 24 Mart 2008 tarihinde, nominal gücü 4000 MWe olan Akkuyu'da kurulacak nükleer santrali kurup işletecek ve TETAŞ'a elektrik enerjisi satacak şirketin belirlenmesi için yarışma usulü ihale ilan etmiştir. İhaleye yalnızca Rus Atomstroyexport Inter Rao – Park Teknik (Ciner) konsorsiyumu teklif vermiştir. Teklifin çok yüksek bulunması üzerine, konsorsiyum fiyatını revize etmesine rağmen bir sonuç elde edilememiştir. Ancak yapılan ikili görüşmelerle, devletlerarası bir anlaşma düzenlenerek, Akkuyu sahasına bir nükleer santralının Rusya devleti tarafından kurulması ve işletilmesine karar verilmiştir.

12 Mayıs 2010 tarihinde T.C. Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında Türkiye Cumhuriyeti'nde "Akkuyu Sahasında Bir Nükleer Güç Santrali Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma" imzalanmıştır. Bu anlaşma 27 Ağustos 2010 tarihinde Bakanlar Kurulunca onaylanarak 6 Ekim 2010 tarih ve 27721 sayılı olarak Resmi Gazete'de yayımlanmıştır [7.1]. Anlaşmaya göre Mersin Gülnar ilçesi, Akkuyu Sahası'nda 4800 MW toplam kurulu güce sahip dört adet basınçlı su reaktörü tipinde santral inşa edilecektir. Anlaşma doğrultusunda santralin tasarımı, yapımı, bakımı, işletmeye alımı ve işletmeden çıkarılması gibi yükümlülükleri üstlenecek olan Akkuyu Nükleer Anonim Şirketi 13 Aralık 2010'da kurulmuştur. Bu şirket ürettiği elektriği 15 yılı alım garantili olmak üzere mülga TETAŞ'a satacaktır.

Türkiye'de Akkuyu nükleer santralının görüşmeleri ile aynı dönemde ikinci bir nükleer santralin kurulması amacıyla ETKB, Sinop sahası üzerine görüşmelere başlamıştır. Kamunu EÜAŞ aracılığıyla ortak olacağı proje için Japonya, G. Kore, Çin, Fransa ile görüşmeler yürütülmüştür. 2013 yılında Mitsubishi-Itochu-Engie firmalarının oluşturduğu Japon-Fransız Konsorsiyumu ile EÜAŞ ortak olacak şekilde Sinop sahasında 1100 MW'lık 4 ünitelik bir santral yapılması üzerine hükümetlerarası anlaşma yapılmıştır [7.2]. Bu anlaşmaya istinaden EÜAŞ ve Japon-Fransız Konsorsiyumu ortak olarak santral fizibilite çalışmasını yapmıştır. Ancak tamamlanan fizibilite



çalışması sonucunda santral yapımının özellikle finansman açısından uygun olmadığı kabul edilerek proje yapımı sonraki bir sürece bırakılmıştır.

Ülkemizde, 1950’li yıllardan bu yana nükleer enerjiden barışçıl amaçlarla faydalanmak üzere çalışmalar yürütülmüş ve kurumsal altyapı ve yasal çerçevenin geliştirilmesi yönünde ilerlemeler kaydedilmiştir. 2010 yılında Türkiye’de nükleer santral kurulması için Türkiye Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu arasında imzalanan hükümetlerarası anlaşma çerçevesinde inşaatı devam eden Akkuyu Nükleer Santrali’nin 2023 yılında ilk ünitesinin devreye alınması planlanmaktadır.

## 7.2. Akkuyu Nükleer Santrali

Akkuyu Nükleer Santral Projesi, 12.05.2010 tarihinde imzalanan “Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında Türkiye Cumhuriyeti’nde Akkuyu Sahası’nda Bir Nükleer Güç Santralının Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma” çerçevesinde yürütülmektedir.

Akkuyu Nükleer Santrali inşaat sahasındaki yürütülen inşaat çalışmaları ve tüm faaliyetler, Türkiye Cumhuriyeti’nin mevzuatına ve IAEA’nın nükleer santrallerine yönelik tavsiyelerine uygun olarak yürütülmektedir. ETKB, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Tarım ve Orman Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Mersin Büyükşehir Belediyesi, Gülnar Belediyesi, Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK), TAEK, Akkuyu Nükleer Santral projesi izin, onay ve lisanslama konularında yetkili ve görevli kamu kurum ve kuruluşlarıdır.

Proje kapsamında, 4800 MW toplam kurulu güce sahip VVER 1200 tipi 4 adet nükleer reaktör kurulacaktır. Projeyi hayata geçirmek amacıyla Akkuyu Nükleer A.Ş. (Proje Şirketi) 2010 yılında kurulmuş olup söz konusu şirket 2011 yılında mülga TAEK tarafından kurucu olarak tanınmıştır.

Akkuyu sahası için mülga TAEK tarafından 1976 yılında yer lisansı verilmiştir ve saha 2011 yılında Proje Şirketine tahsis edilmiştir. Tahsis sonrasında, mülga TAEK mevcut yer lisansına temel teşkil eden yer raporunun güncellenmesini talep etmiş ve güncellenmiş yer raporu Aralık 2013’te onaylanmıştır. İlaveten proje için 01.12.2014 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Çevre Etki Değerlendirme (ÇED) Olumlu kararı da verilmiştir.



*Şekil 7.1: Akkuyu Nükleer Santral inşaat faaliyetleri*



*Şekil 7.2: Akkuyu Nükleer Santral sahası*

Akkuyu Nükleer Santrali ile ilgili önemli tarihler aşağıda kronolojik olarak sıralanmıştır:

|                                                                             |                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>2010 Mayıs</b>                                                           | Hükümetlerarası anlaşma imzalanmıştır.                                                                                     |
| <b>2011 Şubat</b>                                                           | TAEK Proje Şirketini kurucu olarak tanındı.                                                                                |
| <b>2013 Aralık</b>                                                          | Güncellenmiş Yer Raporu onaylandı.                                                                                         |
| <b>2014 Aralık</b>                                                          | Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından ÇED Olumlu kararı verildi.                                                        |
| <b>2015 Nisan</b>                                                           | Kıyı kısmı için imar planı kesinleşmiş ve hidroteknik yapıların temel atma töreni gerçekleştirildi.                        |
| <b>2015 Aralık</b>                                                          | TAEK, Proje Şirketi'ne tedarik izni verildi.                                                                               |
| <b>2017 Şubat</b>                                                           | Saha Parametreleri Raporu TAEK tarafından onaylandı.                                                                       |
| <b>2017 Mayıs</b>                                                           | Akkuyu Sahası'nın kara kısmı için yürütülen imar planı kesinleşti.                                                         |
| <b>2017 Haziran</b>                                                         | Üretim Lisansı verildi.                                                                                                    |
| <b>2017 Aralık</b>                                                          | Mülga TETAŞ ile ESA anlaşması imzalandı.                                                                                   |
| <b>2018 Nisan</b>                                                           | İlk ünitenin temeli atıldı.                                                                                                |
| <b>2019 Şubat</b>                                                           | TEİAŞ ile Akkuyu Nükleer AŞ arasında 400kV'lık iletim hatları için Elektrik İletim Sistemine Bağlantı Anlaşması imzalandı. |
| <b>2019 Temmuz</b>                                                          | İlk ünitenin kor tutucu ekipmanı sahaya ulaştı.                                                                            |
| <b>2019 Ağustos</b>                                                         | İkinci ünite için de inşaat lisansı verildi.<br>İkinci üniteye ait kor tutucu ekipmanı sahaya ulaştı.                      |
| <b>2020 Nisan</b>                                                           | İkinci ünite için temel atıldı.                                                                                            |
| <b>2020 Eylül</b>                                                           | İlk ünitenin buhar üreteçleri ve Kasım 2020'de ilk ünitenin reaktör kabı sahaya ulaştı.                                    |
| <b>2020 Kasım</b>                                                           | Üçüncü ünite için inşaat lisansı verildi.                                                                                  |
| <b>2021 Mart</b>                                                            | Üçüncü ünite temeli atıldı.                                                                                                |
| <b>2021 Ekim</b>                                                            | Dördüncü ünite inşaat lisansı verildi.                                                                                     |
| <b>2023'te santralin ilk ünitesinin işletmeye alınması planlanmaktadır.</b> |                                                                                                                            |

### 7.3. SMR ve Yeni Nesil Reaktör Teknolojileri açısından Türkiye'deki Gelişmeler

Türkiye'deki kamu kurumları ve özel şirketler tarafından, SMR alanında dünyada yürütülen ilgili faaliyetler yakından takip edilmektedir. Bu kapsamda ETKB, EÜAŞ ICC, TÜBİTAK, FİGES AŞ ve Sanayi Odaları çalışmalarında bulunmaktadır. Aşağıda bu çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir.

#### ***Türkiye'nin GIF Başvuru Süreci***

TÜBİTAK Bilim Kurulu'nun 4 Kasım 2017 tarihli 271 sayılı toplantısında GIF'e (Generation IV International Forum - IV. Nesil Nükleer Sistemler Uluslararası Forumu) üyelik başvurusuna karar verilmiştir. GIF toplantıları Ocak 2000 tarihinde ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) Nükleer Enerji, Bilim ve Teknoloji Ofisi, IV. Nesil Nükleer Enerji Sistemlerinin geliştirilmesinde uluslararası işbirliği tartışmalarına başlatmak amacıyla dokuz ülkeden bir grup üst düzey hükümet temsilcisinin toplanmasıyla başlatılmıştır. Türkiye'de, GIF'e üyelik başvurusu çalışmalarının TÜBİTAK sorumluluğunda gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

TÜBİTAK-MAM tarafından, 3-4 Aralık 2017 tarihlerinde Gebze'de gerçekleştirilen geniş katımlı, "Ergimiş Tuz Reaktörü (ETR) Teknoloji Geliştirme Çalıştayı" sonuç bildirgesinde, Türkiye'nin, IV. nesil tarafından belirlenen yenilikçi reaktör sistemlerinden ETR üzerine yoğunlaşması gerektiği kararı açıklanmıştır. Hedeflenen ETR, toryum yakıt çevrimli olacak ve yakıt taşıyıcı ve soğutucu olarak ergimiş tuz kullanacak ve tercihen hızlı nötron spektrumu kullanacaktır. Hızlı spektrum ETR yanında termal spektrum seçeneğinin de incelemelere esas alınması kararlaştırılmış olup Türkiye kendi reaktör ve nükleer yakıt teknolojisini edinme ve geliştirmeyi 2023 hedefleri arasına koymuştur. Bu bağlamda kurulacak olan nükleer reaktörlere parça, malzeme ve hizmet tedarikinin olabildiğince yerli kaynaklardan karşılanması ve yeterli işgücünün yetiştirilmesi hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra olabildiğince bağımsız yeni ve yenilikçi, toryumlu yakıt çevrimini de içeren, bütün aşama ve adımları Türkiye'nin altyapısına rahatlıkla uyum sağlamış bir nükleer yakıt çevrimi teknolojisine sahip yeni ve yenilikçi reaktöre kavuşmak en temel amaçlardan biri olarak ortaya çıkmaktadır.

#### ***EUAS IICC ve Rolls-Royce***

Elektrik Üretim AŞ'nin yurt dışında faaliyet gösteren şirketi EUAS International ICC ile İngiliz Rolls-Royce'un liderliğini yaptığı konsorsiyum, SMR'ların teknik, ekonomik ve hukuki uygulanabilirliği ile birlikte üretim imkanlarını değerlendirmek üzere bir mutabakat zaptı imzalamıştır. Mutabakat zaptı; konsorsiyuma ait SMR'ın kurulması için teknik, lisanslama, ticari ve yatırım ile ilgili hususların yanı sıra muhtemel inşa



süreçlerinin ve Türkiye ile küresel pazar potansiyelinin incelenmesi konularını içermektedir. İngiliz Rolls-Royce'un liderliğini yaptığı Konsorsiyumun içinde, Rolls-Royce, Assystem, BAM Nuttall, Laing O'Rourke, National Nuclear Laboratory (NNL), Atkins, Jacobs, The Welding Institute (TWI) ve Nuclear AMRC şirketleri yer almaktadır.

### ***Avrupa Birliği – TÜBİTAK ve FİGES A.Ş.***

2001 yılında Avrupa Komisyonu'nun IV. Nesil reaktör teknolojisinin geliştirilmesini ve karbon salımını önlemek üzere enerji üretiminde kullanılmasını teşvik eden kararını takiben Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR), AB ülkeleri ve EURATOM'un önem verdiği nükleer teknoloji projeleri hâline gelmiştir. Bunun sonucunda, arka arkaya yürürlüğe konulan ve birçok Avrupa ülkesinin ve Rusya'nın katıldığı AB Çerçeve projeleriyle (MOST, LICORN, ALISIA, SUMO ve EVOL) 3000 MWth (1300 MWe) gücünde nihai bir tasarıma gelinerek EVOL reaktörü (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System) ortaya çıkmıştır.

Hızlı nötronları ve toryum kapalı yakıt çevrimini kullanan bu ETR'nin nükleer güvenlik bakımından detay çalışmalarının tamamlanması için gene AB ülkelerinin katıldığı bir EURATOM projesi olan SAMOFAR (A Paradigm Shift in Reactor Safety with the Molten Salt Fast Reactor) 2015'te başlamıştır. Türkiye'den FİGES AŞ ve TÜBİTAK'ın da gözlemci statüsünde katıldığı bu projede FİGES AŞ söz konusu EVOL reaktörünün ısı değiştiricilerinin hesaplarını ve tasarımlarını yapmak üzere görev almıştır.

SAMOFAR projesi tamamlandıktan sonra da IV. Nesil reaktör çalışmalarına devam eden FİGES AŞ, halen milli ETR konsept geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir. Öz kaynaklı Ar-Ge faaliyetleri kapsamında nötronik, ısı-hidrolik ve sistem tasarımı alanlarında çalışmalar yürütülmektedir. FİGES AŞ bünyesinde geliştirilen ETR'nin elektrik üretiminin yanı sıra proses ısısı, hidrojen, tatlı su veya dizele alternatif yakıt üretimi gibi avantajları da mevcuttur.

### ***Ankara Sanayi Odası***

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB) Kümelenme Destek Programı kapsamında NÜKSAK Nükleer Sanayi Kümelenmesi Projesi, Ankara Sanayi Odası (ASO) bünyesinde kurulan NÜKSAK İktisadi İşletmesi ile 2017 yılından bu yana sürdürülmektedir.

Bahse konu Proje nükleer sektörde sanayinin ilk deneyimlerini kazandığı ve yine ASO koordinasyonunda 2015 – 2017 yıllarında Ticaret Bakanlığı Uluslararası Rekabetçiliğin Geliştirilmesi (UR-GE) desteği ile gerçekleştirilen NuclIndusTRy Nükleer Endüstri'de Yerli Katkı Projesi'nin bir sonraki adımı olup ulusal küme olarak adlandırılmaktadır.

SMR, ETR ve Toryum yakıtlı IV. nesil nükleer reaktörler hakkında kamuoyu farkındalığının yaratılması için ASO tarafından düzenli aralıklarla çevrim içi toplantılar

düzenlenmekte ve ülkemizdeki yetkinlikler akademi ve sanayi bakış açısından ilgili paydaşlara sunulmaktadır. Toplantıların ilki 2021 yılı Mayıs ayında “Türkiye Toryum Yakıtlı IV. Nesil Nükleer Reaktör Yapmak İçin Yola Çıkıyor” başlığı ile gerçekleştirilmiştir. Toplantılara milletvekilleri, bakan yardımcıları, bürokratlar, siyasi parti temsilcileri, akademisyenler ve çok sayıda sanayici katılım sağlamaktadır.

#### 7.4. Türkiye’de Nükleer Santrallarda Mevzuat Durumu

Dünyada işletilen nükleer santrallarda genel olarak, nükleer güvenliğin tam olarak sağlanmasından birinci derecede santralin işleticisi sorumludur. Buna karşın, lisanslama ve denetim faaliyetlerini yürütmek üzere nükleer santral bulunan her ülkede bir nükleer düzenleyici kurum yer almaktadır ve görev, yetki ve sorumlulukları bu çerçevede tanımlanmaktadır.

**Düzenleyici kurumlar temel olarak aşağıdaki faaliyetleri yürütmektedirler.**

- » **Nükleer güvenliğin sağlanması için uyulması gereken mevzuatı geliştirmek**
- » **Mevzuat hükümlerine uygun olarak nükleer santralların lisanslamasını yapmak**
- » **Lisanslama sırasında işletici tarafından sunulan belgeleri gözden geçirmek ve değerlendirmek**
- » **Lisans verdiği tesis ve faaliyetin mevzuat hükümlerine ve lisans koşullarına uygun yürütüldüğünü teyit etmek amacıyla denetimler yapmak**
- » **Yapılan denetimler sonucunda uygunsuzluk tespit etmesi durumunda yaptırımlar uygulamaktır.**

Türkiye’de nükleer düzenlemelerden sorumlu olarak 1956 yılında kurulan Atom Enerjisi Komisyonu, 1982 yılında 2690 sayılı Türkiye Atom Enerjisi Kurumunun Müfettişleri ve Bazı Düzenlemeler Yapılması Hakkında Kanunu ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) adını alarak faaliyetlerine devam etmiştir. 9 Temmuz 2018 tarih ve 702 sayılı Nükleer Düzenleme Kurumunun Teşkilat ve Görevleri ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun Hükmünde Kararname ile Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) kurulmuş olup nükleer lisanslama ve denetim yetkisi bağımsız düzenleyici ve denetleyici kurum olarak kurulan NDK’ya devredilmiştir.

NDK, nükleer düzenleme kapsamında, nükleer santrallar için üç aşamalı bir lisanslama çalışması yürütmektedir. Yer lisansı, inşaat lisansı ve işletme lisansından oluşan bu aşamalar Nükleer Tesislere Lisans Verilmesine İlişkin Tüzük’te detaylandırılmıştır.

Nükleer santralların işletimi sırasında ortaya çıkabilecek olan iyonlaştırıcı radyasyondan kaynaklanan risklerin sınır aşan özelliği dolayısıyla çeşitli uluslararası enstrümanlar ve organizasyonlar yardımıyla ulusal nükleer düzenleyici sistem desteklenmektedir.



Nükleer santraller ile ilgili düzenlemeler ve denetlemeler ile ilgili yukarıda sayılı Kanunlar ve Kanun Hükmünde Kararnameler (KHK) dışında bu Kanunlar ve KHK'lara dayanılarak yayınlanmış olan yönetmelikler, tüzükler, yönergeler, usul ve esaslar ile kılavuzlar da bulunmaktadır. Bahse konu bu mevzuata da NDK üzerinden erişim sağlamak mümkündür.

**NDK'nın düzenleyici ve denetleyici faaliyetlerini yerine getirirken sorumlu olduğu kanunlar ise aşağıda sıralanmıştır.**

- » **2 Temmuz 2018 tarih ve 702 Sayılı Nükleer Düzenleme Kurumu'nun Teşkilat ve Görevleri ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun Hükmünde Kararname,**
- » **9 Temmuz 2018 tarih ve 703 Sayılı Anayasada Yapılan Değişikliklere Uyum Sağlanması Amacıyla Bazı Kanun ve KHK'lerde Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun Hükmünde Kararname,**
- » **15 Temmuz 2018 tarih ve 4 Sayılı Bakanlıklara Bağlı, İlgili, İlişkili Kurum ve Kuruluşlar ile Diğer Kurum ve Kuruluşların Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi,**
- » **2690 Sayılı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun Muafiyetleri ve Bazı Düzenlemeler Yapılması Hakkında Kanun,**
- » **9 Temmuz 1982 Tarih ve 2690 Sayılı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Kanunu.**

Cumhurbaşkanlığı Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı 1 sayılı Kararnamesi'nde ETKB hizmet birimleri arasında sayılan Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğü ise, nükleer santral projelerinin uygulanması ile ilgili olarak mevzuat, insan kaynakları, eğitim, sanayi ve teknoloji gibi alanlarda gerekli altyapının hazırlanması için kurumlar arası koordinasyonu sağlamakla görevlidir.



# KAYNAKLAR

## BÖLÜM 1

- 1.1 TENMAK, fisyon nedir, <https://www.tenmak.gov.tr/sik-sorulan-sorular/136-nukleer-enerji-ve-nukleer-reaktorler-sss/932-fisyon-nedir-fisyondan-elektrik-enerjisi-nasil-elde-edilir.html>, erişim tarihi Haziran 2021
- 1.2 Doç. Dr. M.A. AKTACIR, Nükleer Enerji ders notları, Harran Üniversitesi, 2018, <https://slideplayer.biz.tr/slide/13962727/> erişim tarihi Haziran 2021
- 1.3 Nükleer Enerji Dünyası, Uranyum, [http://www.nukleer.web.tr/yakit\\_cevrimi/maden.html](http://www.nukleer.web.tr/yakit_cevrimi/maden.html), erişim tarihi Haziran 2021.
- 1.4 TENMAK, Nükleer Yakıt Çevrimi, [https://www.tenmak.gov.tr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=837&catid=135&Itemid=125&lang=tr](https://www.tenmak.gov.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=837&catid=135&Itemid=125&lang=tr) erişim tarihi Haziran 2021
- 1.5 Foro Nuclear, manufacture of a fuel assembly, <https://www.foronuclear.org/en/resources/infographics/manufacture-of-a-fuel-assembly/>, erişim tarihi Haziran 2021
- 1.6 Nükleer Enerji Dünyası, Radyasyon Nedir?, [http://www.nukleer.web.tr/temel\\_konular/radyasyonnedir.html](http://www.nukleer.web.tr/temel_konular/radyasyonnedir.html) erişim tarihi Haziran 2021.
- 1.7 J.R. Lamarsh ve A.J. Baratta, "Power Reactors and Nuclear Steam Supply Systems" in Introduction to Nuclear Engineering, 3rd ed., 2001.
- 1.8 Ji Xing\*, D. Song, Y. Wu, HPRI000: Advanced Pressurized Water Reactor with Active and Passive Safety, Engineering, s.79-87. Mart 2016.
- 1.9 NRC, Pressurized Water Reactor (PWR) Systems, <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>, erişim tarihi Haziran 2021.
- 1.10 World Nuclear Association, Nuclear Power Reactors, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>, erişim tarihi Haziran 2021
- 1.11 Mitsubishi Energy Systems, Frequently Asked Questions, <https://mnes-us.com/index.php/media-center/songs/faq> erişim tarihi Temmuz 2021.
- 1.12 KROHNE US, Nuclear Industry, <https://us.krohne.com/en/industries/nuclear-industry/>, erişim tarihi Eylül 2021
- 1.13 S. Bays, A. Abou Jaoude, G. Borlodon, "Reactor Fundamentals Handbook", ABD Idaho National Laboratory, Nisan 2019
- 1.14 MHI, "Pressurized Water Reactor Major Systems", <https://power.mhi.com/products/steamturbines/lineup/nuclear-power>, erişim tarihi Haziran 2021.
- 1.15 MHI, MHI Receives Order for Two Steam Turbine Generators, <https://www.mhi.com/news/200709281198.html> erişim tarihi Ekim 2021.
- 1.16 World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, erişim tarihi Haziran 2021.
- 1.17 B. Goldschmidt, The Atomic Complex: A Worldwide Political History of Nuclear Energy (American Nuclear Society, 1982
- 1.18 BRITANNICA, Wilhelm Rontgen, <https://www.britannica.com/biography/Wilhelm-Rontgen>, Erişim Tarihi Haziran 2021
- 1.19 Nükleer Akademi, Atomun Tarihçesi, <http://nukleerakademi.org/atomun-tarihcesi/>, erişim tarihi Mayıs 2021
- 1.20 Science Photo, Henry Becquerel, Pierre Curie ve Marie Curie <https://www.sciencephoto.com/media/997440/view/pierre-and-marie-curie-french-scientists>, erişim tarihi Eylül 2021
- 1.21 Nobel Prize, Nötronun Keşfi, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1908/rutherford/biographical/>, erişim tarihi Eylül 2021
- 1.22 The history of Nuclear Energy, US department of energy office of nuclear energy, sy.7

- 1.23 Portions of the text for this page were taken and adapted from William Moss and Roger Eckhardt, "The Human Plutonium Injection Experiments," Los Alamos Science 23 (1995): 177-233
- 1.24 Scientists observing the world's first self-sustaining nuclear chain reaction, in the Chicago Pile No. 1, December 2, 1942. Photograph of an original painting by Gary Sheehan, 1957.
- 1.25 Atomic Heritage, First Nuclear Reactor, <https://www.atomicheritage.org/history/chicago-pile-1> ,erişim tarihi Eylül 2021
- 1.26 World Nuclear Association, Manhattan Project, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>, erişim tarihi Temmuz 2021
- 1.27 V. Brindha, "The First Nuclear Power Plant of Earth: June 27, 1954," Discovery 4, No. 12,50 (June 2013)
- 1.28 IAEA, PRIS, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> erişim tarihi Haziran 2021
- 1.29 World Nuclear Association, Plans For New Reactors Worldwide, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>, erişim tarihi Eylül 2021

## BÖLÜM 2

- 2.1 Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, "Nükleer Santraller", Ankara, Aralık, 2010
- 2.2 M. Frogheri, A. Alemberti, L. Mansani, "Ansaldo Research Activities on Critical and Sub-critical Lead Reactors", International Topical Meeting on Safety of Nuclear Installations, Dubrovnik, Croatia, 30.9. – 3.10. 2008
- 2.3 World Nuclear Association, WNA, "Generation IV Nuclear Reactors", <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>, Aralık 2020, erişim tarihi 24.09.2021.
- 2.4 Prof. I. Pioro, Prof. P. Kirillov, "Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World", ResearchGate, Ocak 2013
- 2.5 S. Bays, A. Abou Jaoude, G. Borlolan, "Reactor Fundamentals Handbook", ABD Idaho National Laboratory, Nisan 2019
- 2.6 World Nuclear Association, Nuclear Power Reactors, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>, erişim tarihi Haziran 2021
- 2.7 I. Hore-Lacy, "Nuclear Energy in the 21st Century", World Nuclear University Press, Londra, 2006.
- 2.8 NRC, Nuclear Reactors, <https://nrc-am.com/blog/nuclear-reactors/>, erişim tarihi Haziran 2021
- 2.9 Nükleer Akademi, Nükleer Yakıt, <http://nukleerakademi.org/nukleer-enerji/nukleer-yakit/>, erişim tarihi Haziran 2021.
- 2.10 World Nuclear, RBMK Reactors, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbm-reactors.aspx>, erişim tarihi Haziran 2021.
- 2.11 IAEA, WWER-1000 Reactor Simulator, <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/34/083/34083100.pdf>, erişim tarihi Haziran 2021
- 2.12 IAEA, PRIS, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> erişim tarihi Haziran 2021

## BÖLÜM 3

- 3.1. IAEA, Small Modular Reactors (SMR), <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>, Nuclear, E. Series, T. Roadmap, S. Modular, and R. Deployment, "Technology roadmap for small modular reactor deployment
- 3.2. ABD Department of Energy, First U.S. Small Modular Boiling Water Reactor Under Development, <https://www.energy.gov/ne/articles/first-us-small-modular-boiling-water-reactor-under-development>, erişim tarihi Haziran 2021

- 3.3. World Nuclear Association, Design Maturity and Regulatory Expectations for Small Modular Reactors
- 3.4. World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors - <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> erişim tarihi Temmuz 2021
- 3.5. Illustration of a light water small modular nucle, <https://www.flickr.com/photos/usgao/20848048201> erişim tarihi Eylül 2021
- 3.6. Schematic of a NuScale power module, researchgate.net, [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-NuScale-power-module\\_fig1\\_289665894](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-NuScale-power-module_fig1_289665894)
- 3.7. Current and future nuclear power reactors and plants, I. Piro, R. Duffey, Managing Global Warming (pp.117-197), Ocak, 2019
- 3.8. Ü. Çolak, Nükleer Yakıt ve Reaktör Malzemeleri; Yeni Gelişmeler Ve Eğilimler, X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, 6-9 Ekim 2009
- 3.9. D. Hittner, Prismatic HTGR, <http://indico.ictp.it/event/8725/session/2/contribution/7/material/slides/0.pdf>, erişim tarihi Temmuz 2021
- 3.10. ScienceDirect Topics, High Temperature Gas Reactors - an overview, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/high-temperature-gas-reactors>, Temmuz, 2021
- 3.11. World-nuclear-news, "Chinas-HTR-PM reactor achieves first-criticality", <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinas-HTR-PM-reactor-achieves-first-criticality> erişim tarihi 13 Eylül 2021
- 3.12. IAEA, Fast Reactors, <https://www.iaea.org/topics/fast-reactors>, erişim tarihi Haziran 2021
- 3.13. V. Çapalı, M. Şekerci, A. Kaplan, "Hızlı nötron reaktörlerinde yakıt malzemesi olarak kullanılan 235,238U ve 239Pu izotoplarına yönelik tesir kesiti hesaplamaları için nükleer seviye yoğunluğu parametresinin incelenmesi", BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 19(3) Özel Sayı, 1-6, 2017
- 3.14. Britannica, Sodium-cooled Fast Reactor, <https://www.britannica.com/technology/sodium-cooled-fast-reactor> erişim tarihi Temmuz 2021.
- 3.15. Gen IV International Forum , "GIF 2020 Annual Report" [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_178290/gif-2020-annual-report](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_178290/gif-2020-annual-report), erişim tarihi Haziran 2021
- 3.16. A. Weinberg, R.C. Briant (1957) "Molten Fluorides as Power Reactor Fuels" Nuc. Sci. Eng, 2, 797-803.
- 3.17. Haubenreich, P. Engel, J. 1970, "Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment", Nuclear Applications & Technology, Vol. 8, 197
- 3.18. IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments" A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf), erişim tarihi Mayıs 2021
- 3.19. J.A. Lane, H.G. MacPherson, F. Maslan (1958) "Fluid Fuel Reactors".
- 3.20. Joe Turner (2013) "Opportunities and Challenges for Thorium in Commercial MSRs" International Thorium Energy Conference, CERN.
- 3.21. J. Durham (2013) "The Road to Enablement for Thorium-fuelled Molten Salt Reactors" International Thorium Energy Conference, CERN.
- 3.22. P. Madden, M. Salanne and M. Levesque (2013) "Thorium molten salts, theory and practice" Euratom Project, 13 Groups.
- 3.23. Hans Blix (2013 ) 'Thorium nuclear power and non-proliferation' Conference at CERN.
- 3.24. Jan Uhlíř and Vlastimil Juříček (2013) "Current Czech R&D In Thorium MSR Technology" Research Centre Řež, Czech Republic.
- 3.25. Idaho National Laboratory, Microreactors, <https://inl.gov/trending-topic/microreactors/>, erişim tarihi Haziran 2021
- 3.26. World Nuclear Association, Research Reactors, <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/research-reactors.aspx>, erişim tarihi Temmuz 2021

- 3.27. C.H. Pyeon (2013) "JapanThorium-Loaded Accelerator-Driven System Experiments in Kyoto University Research Reactor Institute" International Thorium Energy Conference, CERN.
- 3.28. S.B. Degweker, P. Singh, P.Satyamurthy and A. Sinha (2013) "Accelerator Driven Systems for Thorium Utilisation in India" International Thorium Energy Conference, CERN.
- 3.29. Rubbia, Carlo. (2013) "A future for Thorium Power?" International Thorium Energy Conference, CERN.
- 3.30. ABD Office of Nuclear Energy, What is a Radioisotope Power Systems?, <https://www.energy.gov/ne/articles/what-radioisotope-power-system>, erişim tarihi Eylül 2021.
- 3.31. D. Thompson, Thermoelectric Properties of Silicon Germanium: An In-depth Study to the Reduction of Lattice Thermal Conductivity, Thesis for: Ph.D. Physic, Ocak 2021.
- 3.32. Wikipedia, RTG, Beta-M, <https://en.wikipedia.org/wiki/Beta-M>, erişim tarihi Ekim 2021
- 3.33. World-nuclear-news, "Chinas-HTR-PM reactor achieves first-criticality", <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinas-HTR-PM-reactor-achieves-first-criticality> erişim tarihi 13 Eylül 2021

## BÖLÜM 4

### ABD

- 4.1. IAEA, PRIS (Power Reactor Information System), <https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=US>, erişim tarihi Kasım 2021
- 4.2. Office of Nuclear Energy, Advanced Small Modular Reactors (SMRs), <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>, erişim tarihi Eylül 2021
- 4.3. World Nuclear News (WNN), US State Department launches SMR support programme, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-State-Department-launches-SMR-support-programme>, erişim tarihi Nisan 2021
- 4.4. OECD NEA Nuclear Legislation in OECD and NEA Countries Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities -United States, <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/usa.pdf>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.5. Office of Nuclear Energy, NRC Approves First U.S. Small Modular Reactor Design, <https://www.energy.gov/ne/articles/nrc-approves-first-us-small-modular-reactor-design>, erişim tarihi Eylül 2021
- 4.6. OECD Small Modular Reactor: Challenges and Opportunities, <https://www.oecd.org/publications/small-modular-reactors-18fbb76c-en.htm>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.7. US NRC, Small Modular Reactors (LWR designs), <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.8. IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS) 2020 Edition, [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf), erişim tarihi Haziran 2021
- 4.9. MIT Open Learning Library, Nuclear Waste Management, Nuclear Energy Economics and Policy Analysis, <https://openlearninglibrary.mit.edu/courses>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.10. NUSCALE, Powering the Next Generation of Nuclear, <https://www.nuscalepower.com/>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.11. D. Ingersoll, Z.J. Houghton, R. Bromm, C. Desportes, "NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water", Desalination 340, 2014.

### ARJANTİN

- 4.12. IAEA, Country Nuclear Power Profiles, Argentina 2021, <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Argentina/Argentina.htm>, erişim tarihi Ekim 2021
- 4.13. World Nuclear Association, Nuclear Power in Argentina, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/argentina.aspx>, erişim tarihi Eylül 2021

- 4.14. C. Marcel, D. Delmastro, “a small innovative modular nuclear reactor: the CAREM-25 reactor” Mayıs 2013, 16th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES 2013)
- 4.15. S. Tashakor, E. Zarifi, M. Naminazari, Progress in Nuclear Energy, Volume 99, 2017, sayfa 185-1952017, Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor
- 4.16. NuclearNewswire, Argentina carries torch for SMR construction, 2014, <https://www.ans.org/news/article-1515/carem-25-carries-torch-for-smr-construction/#sthash.13C7kSV7.dpbs>, erişim tarihi Eylül 2021

## **ÇİN**

- 4.17. IAEA, PRIS, <https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN>, erişim tarihi 4 Ekim 2021
- 4.18. World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors; 2020, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, erişim tarihi 16 May 2021
- 4.19. IAEA, Advanced Reactors Information System (ARIS), <https://aris.iaea.org/sites/SMR.html>, erişim tarihi 9 May 2021.
- 4.20. ZHANG/Zuoyi, Chief Scientist HTR-PM project, Director of INET of Tsinghua University. The Status of HTR-PM, a 200MWe High Temperature Gas-cooled Reactor demonstration plant constructed in China. Abu Dhabi; 30 October to 2017. (Panel on Innovations and Advances in Nuclear Technologies) [erişim tarihi 30 May 2021]
- 4.21. IAEA, Status report 96- High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module (HTR-PM); 2011, erişim tarihi 30 May 2021.
- 4.22. China National Nuclear Corporation, Specific Design Consideration of ACP100 for Application in the Middle East and North Africa Region, Tunus, 2017, erişim tarihi 31 May 2021.
- 4.23. Nuclear Power Institute of China, CNNC's ACP100 SMR: Technique Features and Progress in China, IAEA Headquarters Vienna-Austria; 2016, erişim tarihi 1 Haziran 2021.

## **FRANSA**

- 4.24. IAEA, PRIS <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FR>, erişim tarihi 5 May 2021.
- 4.25. IAEA, NUWARD (EDF lead consortium) ,2019, [https://aris.iaea.org/PDF/F-SMR\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/F-SMR_2020.pdf). Status Report –2019, erişim tarihi 5 May 2021.
- 4.26. IAEA, ASTRID, <https://aris.iaea.org/PDF/ASTRID.pdf>, erişim tarihi 9 Mayıs 2021.
- 4.27. F. Varaine, G. Rodriguez, J.M. Hamy, S. Kubo, H. Mochida, U. Yukinori, J.P.Helle, A.Remy, T. Chauveau, J.Mazel, et al. ASTRID project, general overview and status progress: GIF Symposium - the 4th GIF Symposium at the 8th edition of Atoms for the Future; Submitted on 2020 [erişim tarihi 10 Mayıs 2021]
- 4.28. IMT Science and Technology news, ASTRID: A Nuclear Project Goes Up in Smoke, erişim tarihi 9 Mayıs 2021.

## **G. KORE**

- 4.29. IAEA, Country nuclear power profiles, Republic of Korea 2021, <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/KoreaRepublicof/KoreaRepublicof.htm> erişim tarihi Eylül 2021
- 4.30. OECD, Nuclear Legislation in OECD and NEA Countries, Republic of Korea, <https://www.oecd-neo.org/law/legislation/korea.pdf>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.31. Small Nuclear Power Reactors, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, erişim tarihi Mayıs 2021
- 4.32. SMART reaktör temsili tasarımı, Reactor system configuration of SMART (Reproduced courtesy of KAERI) [36], researchgate.net, [https://www.researchgate.net/figure/4-Reactor-system-configuration-of-SMART-Reproduced-courtesy-of-KAERI-36\\_fig21\\_321110776](https://www.researchgate.net/figure/4-Reactor-system-configuration-of-SMART-Reproduced-courtesy-of-KAERI-36_fig21_321110776), erişim tarihi Haziran 2021
- 4.33. IAEA webinar, B. J. Lee NSSS Design & Development Division KEPSCO E&C, BANDI-60: Technology Features and Deployment Pathway, erişim tarihi Mayıs 2021
- 4.34. KEPSCO Engineering & Construction Company, Inc. (kepco-enc.com), <https://www.kepco-enc.com/eng/contents.do?key=1542>, erişim tarihi Haziran 2021



## İNGİLTERE

- 4.35. World Nuclear Association, Nuclear Power in the UK <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>, erişim tarihi Ekim 2021
- 4.36. R. Deakin, "A UK Nuclear Solution for Net Zero," 24 November 2020. [Online]. Available: <https://innovateuk.blog.gov.uk/2020/11/24/a-uk-nuclear-solution-for-net-zero/>.
- 4.37. Rolls-Royce, "UK government invests £215 million into small nuclear reactors," 19 November 2020. [Online]. Available: <https://www.ukri.org/news/uk-government-invests-215-million-into-small-nuclear-reactors/>. [Accessed 24 May 2021].
- 4.38. D. Dalton, "UK/Rolls-Royce SMR Consortium Joins European Industry Group Foratom," Nucnet, 16 March 2021. [Online]. Available: <https://www.nucnet.org/news/rolls-royce-smr-consortium-joins-european-industry-group-foratom-3-2-2021>.
- 4.39. NUCNET, Rolls Royce/Company Says Target Cost For UK SMR Is £1.8 Billion, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> erişim tarihi Eylül 2021
- 4.40. Neutron Bytes, <https://neutronbytes.com/2019/11/09/rolls-royce-reveals-440-mw-commercial-reactor-design/> erişim tarihi Ağustos 2021
- 4.41. Rolls-Royce, "Small Modular Reactors - once in a lifetime opportunity for the UK," Rolls-Royce, 2017.
- 4.42. S. Nathan, "UK government unveils £200m nuclear sector deal," Mark Allen Engineering, 28 Haziran 2018, <https://www.theengineer.co.uk/nuclear-industry-sector-deal/>.
- 4.43. UK Parliament, "Written evidence submitted by Urenco and U-Battery Ltd. (PEG0213)," 2020
- 4.44. U-Battery Local Modular Energy, "Markets," 2021. [Online]. Available: <https://www.u-battery.com/markets>.

## JAPONYA

- 4.45. D. T. Ingersoll, M. D. Carelli, "Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, Second Edition, Woodhead Publishing Series in Energy.
- 4.46. Sciencedirect, High temperatures reactors, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/high-temperature-reactors> erişim tarihi Eylül 2021
- 4.47. IAEA, Status Report – 4S (Toshiba Energy Systems & Solutions Corp./Japan) DATE (2019/October/28, [https://aris.iaea.org/PDF/Toshiba-4S\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/Toshiba-4S_2020.pdf)
- 4.48. IAEA, Status Report – BWRX-300 (GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy) USA DATE (2019/9/30), [https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/BWRX-300_2020.pdf)
- 4.49. IAEA, Status Report – MoveuX (Toshiba Energy Systems & Solutions) Japan (2019/9/30, [https://aris.iaea.org/PDF/MoveuX\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/MoveuX_2020.pdf)

## KANADA

- 4.50. SNC Lavalin, [https://www.sncclavalin.com/-/media/Files/S/SNC-Lavalin/download-centre/en/brochure/our-candu-smr\\_en.pdf](https://www.sncclavalin.com/-/media/Files/S/SNC-Lavalin/download-centre/en/brochure/our-candu-smr_en.pdf) erişim tarihi Eylül 2021

## RUSYA

- 4.51. IAEA, Country Nuclear Power Profiles, Russian Federation, <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Russia/Russia.htm>, erişim tarihi Haziran 2021
- 4.52. Green Car Congress, Rosatom Overseas and CNNC New Energy to partner on floating nuclear power plants, <https://www.greencarcongress.com/2014/08/20140803-rusatom.html> erişim tarihi, Ağustos 2021
- 4.53. The Lyncean Group of San Diego (Lynceans), "Manufacturing the Reactor Vessel for an RITM-200 PWR for Russia's new LK-60 Class of Polar Icebreakers", <https://lynceans.org/all-posts/manufacturing-the-reactor-vessel-for-an-ritm-200-pwr-for-russias-new-lk-60-class-of-polar-icebreakers/>
- 4.54. RITM-200 reactor ready to be installed into the hull of a new "Arktika" nuclear icebreaker, [https://www.reddit.com/r/TechnologyPorn/comments/4pig5v/ritm200\\_reactor\\_ready\\_to\\_be\\_installed\\_into\\_the/](https://www.reddit.com/r/TechnologyPorn/comments/4pig5v/ritm200_reactor_ready_to_be_installed_into_the/)

- 4.55. I. Kessides, V. Kuznetsov, Small Modular Reactors for Enhancing Energy Security in Developing Countries, Sustainability, 2012, [https://www.researchgate.net/publication/278188044\\_Small\\_Modular\\_Reactors\\_for\\_Enhancing\\_Energy\\_Security\\_in\\_Developing\\_Countries](https://www.researchgate.net/publication/278188044_Small_Modular_Reactors_for_Enhancing_Energy_Security_in_Developing_Countries), erişim tarihi Haziran 2021.
- 4.56. A.V.Zrodnikova, G.I.Toshinskya, O.G.Komleva, V.S.Stepanovb, N.N.Klimovb, "SVBR- 100 module-type fast reactor of the IV generation for regional power industry, Journal of Nuclear Materials, Volume 415, 31 August 2011, Sayfa 237-244,
- 4.57. Modeling the core of a lead-cooled reactor, Kasım 2020, Journal of Physics Conference Series, V. Chudinova, S. P. Nikonov
- 4.58. IAEA, Status report 66 - VBER-300 (VBER-300), <https://aris.iaea.org/PDF/VBER-300.pdf>, erişim tarihi Eylül 2021
- 4.59. IAEA, V. Artisiuk, Technical Meeting on Technology Assessment of Small Modular Reactors for Near Term Deployment SMR Technology Development in Russia and Capacity Building Supports for Embarking Countries, 2 – 5 Ekim 2017 Tunus.

## BÖLÜM 5

- 5.1. IAEA, Advanced Large Water Cooled Reactors, A Supplemet to the IAEA's ARIS IAEA, September 2015, [https://aris.iaea.org/Publications/IAEA\\_WRC\\_Booklet.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/IAEA_WRC_Booklet.pdf), erişim tarihi Haziran 2021
- 5.2. IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS) 2020 Edition, [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf), erişim tarihi Haziran 2021
- 5.3. Foronuclear, Characteristics and advantages of Small Modular Reactors, <https://www.foronuclear.org/en/updates/in-depth/characteristics-and-advantages-of-smr/>, erişim tarihi Haziran 2021
- 5.4. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects, Giorgio Locatelli, Chris Bingham, Mauro Mancini, January 2014, <https://international.anl.gov/training/materials/BL/Literature/Giorgio%20Locatelli%20Papers/Small%20modular%20reactors%20A%20comprehensive%20overview.pdf>, erişim tarihi Haziran 2021
- 5.5. R.L. Black, in Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, 2015
- 5.6. IAEA Nuclear Energy Series, Technical Reports, Design Features to Achieve Defence in Depth in Small and Medium Sized Reactors
- 5.7. World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors, <https://www.world-nuclear.org> erişim tarihi Haziran 2021
- 5.8. SMART Power Company, SMART Project, <http://smart-nuclear.com>, erişim tarihi Haziran 2021
- 5.9. Westinghouse Electric Company, Small Modular Reactor by Westinghouse <https://www.westinghousenuclear.com>, erişim tarihi Haziran 2021
- 5.10. Rolls Royce, The UK SMR, <https://www.rolls-royce.com>, erişim tarihi Haziran 2021
- 5.11. H. Çelikkaya, IRIS Küçük Modüler Reaktörünün (SMR) RELAP5/SCDAPSIM Sistem Kodu İle Modellenmesi, (Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- 5.12. R. Hernandez, Fuel Cycle Performance of Thermal And Fast Spectrum Small Modular Reactors, A Thesis in Nuclear Engineering
- 5.13. C.P. Pannier, R. Skoda, Comparison of Small Modular Reactor and Large Nuclear Reactor Fuel Cost Energy Power Eng. (2014), pp. 82-94
- 5.14. IAEA, General Safety Guide 1 - Classification of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.
- 5.15. IAEA, No. NW-T-1.14, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, 2018.

- 5.16. STIMSON, Spent Nuclear Fuel Storage and and Disposal, <https://www.stimson.org/2020/spent-nuclear-fuel-storage-and-disposal/>, erişim tarihi Ağustos 2021.
- 5.17. POSIVA, Engineered Barriers, <https://www.posiva.fi/en/index/finaldisposal/releasebarriers.html>, erişim tarihi Ağustos 2021.
- 5.18. IAEA, Small Modular Reactors a Challenges for Spent Fuel Management, <https://www.iaea.org/newscenter/news/small-modular-reactors-a-challenge-for-spent-fuel-management>, erişim tarihi Ağustos 2021.
- 5.19. OECD, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true), erişim tarihi Ağustos 2021 .
- 5.20. D. Mathers, Small Modular Reactors & waste management issues, International Framework For Nuclear Energy Cooperation – Infrastructure development working group meeting, Mayıs2014, [https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2016-02/waste\\_management\\_issues\\_for\\_smrs\\_dan\\_mathers.pdf](https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2016-02/waste_management_issues_for_smrs_dan_mathers.pdf), erişim tarihi Ağustos 2021).

---

## BÖLÜM 6

- 6.1. A Trendowics and R. Jeffery, “Software Project Effort Estimation,” 2014, pp. 125-152.
- 6.2. B. M. Giorgio Locatelli, “Chapter 8: Small Modular Nuclear Reactors,” 2019.
- 6.3. G. Locatelli and M. Mancini, “Competitiveness of small-medium, new generation reactors: A comparative study on decommissioning,” J.Eng.Gas Turbines Power, vol. 132, no. 10, 2010.
- 6.4. OECD, “Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems,” 2012.
- 6.5. Rolls-Royce, “UK SMR: A National Endeavour,” 2017.
- 6.6. NEA, “Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment,” OECD, 2016
- 6.7. NEA/IEA, “Projected Cost of Generating Electricity: 2015 Edition,” OECD, Paris, 2015.
- 6.8. NEA/IEA, “Projected Costs of Generating Electricity: 2010 Edition,” OECD, Paris, 2010.
- 6.9. IAEA, “Approach for Assessing the Economic Competitiveness of Small and Medium Sized Reactors, NP-T-3.7,” Vienna, 2013.
- 6.10. V. Kuznetsov and N. Barkatullah, “Approaches to Assess Competitiveness of small and Medium Sized Reactors,” IAEA-CN-164-IS01.
- 6.11. M. Carelli, P. Garrone, G. Locatelli, M. Mancini, C. Mycoff, P. Trucco and M. Ricotti, “Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors,” Progress in Nuclear Energy, 2010
- 6.12. G. Maronati, B. Petrovic, J. J. V. Wyk and C. C. W. Matthew Kelley, “EVAL: a methodological approach to identify NPP Total Capital Investment Cost drivers and sensitivities,” Progress in Nuclear Energy, vol. 104, pp. 190-202, April 2018.

---

## BÖLÜM 7

- 7.1. Resmi Gazete, 2010/918 Karar Sayılı “Milletlerarası Andlaşma”, 6 Ekim 2010 tarih ve 27721 sayılı
  - 7.2. Resmi Gazete, 2015/7697 Karar Sayılı “Milletlerarası Andlaşma”, 23 Mayıs 2015 tarih ve 29364 sayılı
-



**Dr. İZZET ALAGÖZ**

***EÜAŞ Genel Müdürü  
TESAB Yönetim Kurulu Başkanı***

Lisans Eğitimini ODTÜ Gaziantep Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde, yüksek lisans eğitimini, Del Tech Community College (ABD)'de Master of Business Administration ve Mustafa Kemal Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde, doktora eğitimini ise Ege Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Teknolojileri alanında tamamladı. 19 Mayıs Üniversitesi'nde 5 yıl Öğretim Görevlisi olarak çalıştı. Endüstriyel otomasyon, PLC, DCS sistemleri geliştirme ve uygulama projeleri gerçekleştirdi. Yurtiçinde ve yurtdışında General Electric, ABT Enerji, Initec Enerji, Emerson Electric gibi kuruluşlarda üst düzey görevler üstlendi. 3850 MW elektrik santrali montaj ve devreye alma, 4400 MW santral DCS sistemleri kurulum ve rehabilitasyon çalışmaları projelerini yönetti. Elektrik santralleri, su arıtma tesisleri, ilaç fabrikaları ve çeşitli endüstriyel otomasyon uygulamalarının yer aldığı özel sektör kuruluşlarında Genel Müdürlük ve Yönetim Kurulu Başkanlığı görevlerinde bulundu. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi (DEK-TMK) Genel Sekreterliği ve MÜSİAD Enerji Sektör Kurulu Başkanlığı görevlerini yürüttü. 2018 yılından bu yana EÜAŞ Genel Müdürlüğü ve Yönetim Kurulu Başkanlığı, TESAB Yönetim Kurulu Başkanlığı ve DEK-TMK Yönetim Kurulu üyeliği görevlerini yürütmektedir.

## GÜLCAN KOCA

### *Makina Mühendisi*

Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde, yüksek lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri bölümünde tamamlamıştır. Ayrıca Ankara Üniversitesi Banka ve Ticaret Hukuku Araştırma Enstitüsü Bölümünde Enerji Hukuku alanında ikinci yüksek lisans derecesi bulunmaktadır. Halen Gazi Üniv. Enerji Sistemleri Bölümünde doktora çalışmasına devam etmektedir. 1999 yılından beri Elektrik Üretim A.Ş.'de görev alarak termik ve nükleer santral alanlarında tecrübe edinmiştir. Nükleer santral çalışmalarını yürüten EUAS ICC şirketinde de uzman olarak görev almıştır. Ayrıca TESAB Eurelectric faaliyetlerinde gönüllü görev almıştır. Halen EÜAŞ Termik Santraller Dairesinde çalışmaktadır.



## MUZAFFER BAŞARAN

### *Makina Mühendisi*

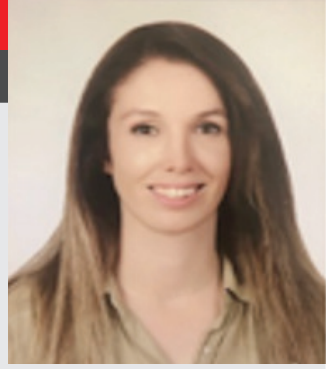
Lisans ve yüksek lisans eğitimini İngiltere Newcastle Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. 1975'de işe başladığı TEK Genel Müdürlüğünde, Santraller Proje ve Tesis Daire Başkanlığında başmühendis, Afşin-Elbistan A Termik Santralında tesis grup müdürü ve Kemerköy Santralında tesis grup müdürü ve genel müdür olarak görev almıştır. Ekim 2001'de Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdür Yardımcılığı ve Yönetim Kurulu üyeliği görevlerini yürütmüştür. 2006 tarihinde emekli olduktan sonra H. Ö. Sabancı Holding A.Ş. Enerji Grup Başkanlığı Danışmanı olarak ve 2012'de Hattat Grubunda Santraller Yatırım Koordinatörü olarak görev almıştır. Şubat 2013'ten itibaren TEYO Yatırım ve Dış Ticaret A. Ş. Genel Müdürlüğü görevini yürütmektedir. İyi derecede İngilizce ve orta düzeyde Almanca bilmektedir.



## İLKİM SANİYE KARAPINAR

### *Nükleer Enerji Mühendisi*

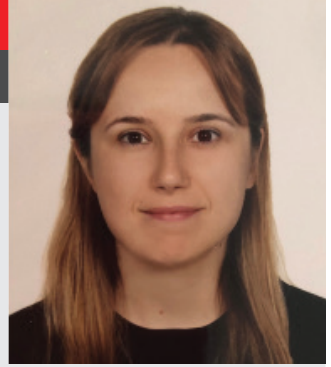
Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2009 yılında tamamladı. 2009-2010 yıllarında İstanbul PGM Proje Gözetim Mühendislik Şirketinde görev aldı. 2011 yılında EÜAŞ Nükleer Santraller Daire Başkanlığında Sinop Nükleer Santral Projesi fizibilite çalışmasında görev almıştır. 2018-2019 yıllarında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğünde Akkuyu Nükleer Santral Projesi çalışmalarında görev almıştır. 2019 yılında EÜAŞ Enerji Verimliliği Daire Başkanlığı, Ar-Ge Müdürlüğünde çalışmaya devam etmektedir.



## GÖKÇE KÜÇÜKASLAN

### *Nükleer Enerji Mühendisi*

Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2007 yılında tamamladı. 2008-2009 yılları arasında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde araştırma asistanı olarak çalışmıştır. 2010 yılında EÜAŞ Nükleer Santraller Daire Başkanlığı Sinop Nükleer Santral Projesi fizibilite çalışmalarına katılım sağlamıştır. 2017-2020 yılları arasında EUAS IICC şirketinde nükleer santrallerde yerleştirme ve fizibilite raporu değerlendirme çalışma gruplarında görev aldı. 2020 yılından beri Termik Santraller Daire Başkanlığı Proje Tesis Müdürlüğünde çalışmaktadır.



## MERVE YAĞMUR YARDIMCI

### *Yüksek Fizikçi*

Lisans eğitimini ODTÜ Fizik Bölümü'nde 2014 yılında, yüksek lisans (MSc.) eğitimini "Optoelektronik Fizik" üzerine 2017 yılında tamamladı. MEB-YLSY programı 2017 bursiyerliğine hak kazanarak, resmi burslu statüde İngiltere Birmingham Üniversitesi'nde "İşletmeden Çıkarma ve Nükleer Atık Yönetimi" üzerine ikinci yüksek lisans eğitimini 2019'da tamamladı. Geri dönüşü ile Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santraller Daire Başkanlığı'nda fizikçi kadrosunda göreve başladı. Bu kurumdaki 2 aylık hizmetinin ardından Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğü emrinde görevlendirilmiş olup halen burada görevine devam etmektedir. İleri seviye İngilizce ve orta seviye Almanca bilmektedir.

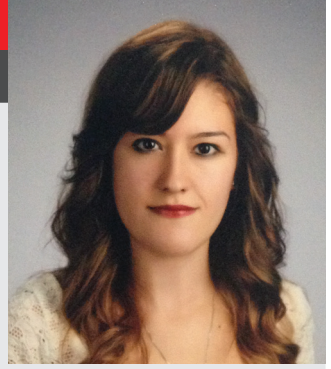




## BEHİCE MELİS KILIÇ

### *Nükleer Enerji Mühendisi*

Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2014 yılında tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini EMINE (Avrupa Nükleer Enerji Yüksek Lisans Programı) kapsamında KTH Kraliyet Teknoloji Üniversitesi (İsveç) ve Paris-Saclay Üniversitesi'nde (Fransa) "Nükleer Santrallerin İşletilmesi" üzerine 2020 yılında tamamladı. Yüksek lisans çalışmasını "Radyasyondan Korunma ve Sağlık Fiziği" konusunda CEA'da (Fransız Alternatif Enerjiler ve Atom Enerjisi Komisyonu) gerçekleştirdi. MEB-YLSY eğitim dönüşü, EÜAŞ Termik Santraller Daire Başkanlığında Nükleer Santraller Müdürlüğünde göreve başlamış olup halen devam etmektedir. İngilizce profesyonel çalışma yetkinliği olup orta seviye Fransızca bilmektedir.



## UMUT DÖNER

### *Elektrik Mühendisi*

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi ve Gazi Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2003 yılından itibaren TEDAŞ, Başkent EDAŞ, EÜAŞ ve EÜAŞ IICC'de çalıştı. 2020 yılından itibaren EÜAŞ Termik Santraller Daire Başkanlığı'nda çalışmaktadır.



## NESRİN GÜNAY

### *Makina Mühendisi*

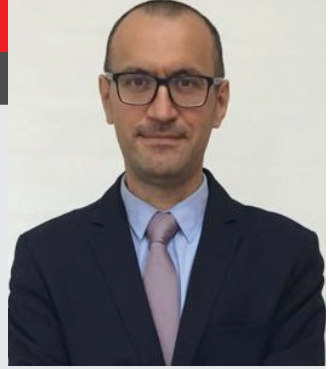
Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde 2007 yılında tamamladı. 2009'da EÜAŞ Elektrik Piyasası Hizmetleri Daire Başkanlığında göreve başlamıştır. 2015 yılında Nükleer Santral Daire Başkanlığında teknik şef olarak Sinop Nükleer Santral Projesinde görev almıştır. 2017 yılından itibaren EÜAŞ Bakım Yönetimi Daire Başkanlığında çalışmaktadır.



## **FAHRETTİN HOCAOĞLU**

### ***Nükleer Enerji Mühendisi***

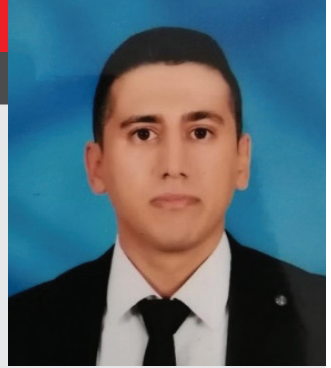
Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2005 yılında tamamladı. Sinop Üniversitesi Nükleer Enerji Sistemleri Anabilim Dalında yüksek lisans yapmıştır. Endüstriyel Tıp Isı Değiştiricileri imalatında ve Isıtma/Soğutma alanlarında Ar-Ge Mühendisi ve İmalat Müdürü olarak görev yapmıştır. EÜAŞ Sinop Nükleer Santral Projesi fizibilite çalışmaları kapsamında Sinop Koordinasyon Merkezi Müdürlüğünde ve sonrasında yine EUAS International ICC firması bünyesinde çalışmıştır. Halen Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğünde (ETKB/NEPUD) görev yapmaktadır.



## **CAFER ERGİN**

### ***Nükleer Enerji Mühendisi***

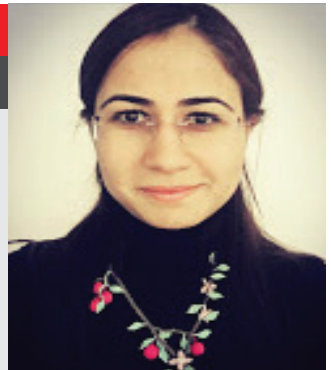
Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2019 yılında tamamladı. Yüksek Lisans Eğitimi İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Radyasyon Bilim ve Teknolojisi alanında yapmaktadır. 2020 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nda Uzman yardımcısı olarak göreve başlamış olup halen devam etmektedir.



## **KÜBRA AYDIN**

### ***Nükleer Enerji Mühendisi***

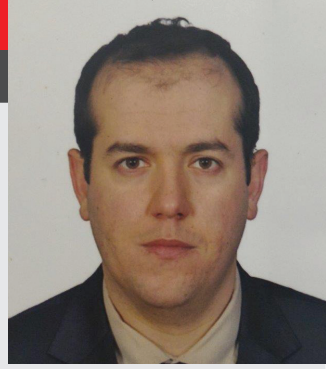
Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2011 yılında tamamladı. Yüksek Lisans Eğitimi 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknolojileri Yüksek Lisans Programında tamamladı. 2013 yılından EÜAŞ Nükleer Santraller Daire Başkanlığında, Sinop Nükleer Santral Projesinde göreve başlamıştır. 2017-2020 yıllarında EUAS International ICC şirketinde Sinop Nükleer Santral Projesi fizibilite çalışmasında görev almıştır. 2020 yılından itibaren görevlendirildiği EÜAŞ Termik Santraller Daire Başkanlığında çalışmalarına devam etmektedir. 2021 yılında başladığı Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Doktora Programında çalışmalarına devam etmektedir.



## ÖZKAN ÖZTÜRK

### *Nükleer Enerji Mühendisi*

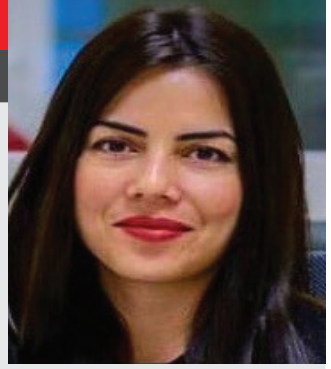
Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği bölümünde 2009 yılında tamamladı. 2011 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nda Nükleer Enerji Mühendisi olarak göreve başladı. Türkiye'de nükleer enerji projelerinin geliştirilmesi ve uygulanmasında gerekli alt yapının oluşturulmasında görev aldı. Süreç içerisinde Müsteşar Yardımcısı ve Genel Müdür danışmanlığı görevlerinde bulundu. Halen Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğünde, Akkuyu Nükleer Santral projesinin yürütülmesinde görev almaktadır. İngilizce ve orta seviyede Rusça bilmektedir.



## CANGÜL AKTÜRK

### *Fizikçi*

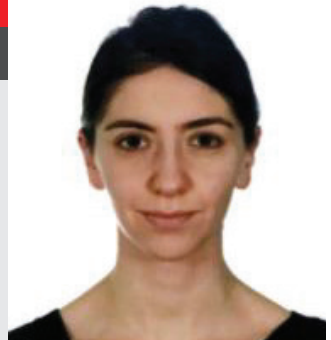
Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde 2009 yılında tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği bölümünde 2013 yılında tamamladı. MEB-YLSY programı 2018 bursiyerliğine hak kazanarak, resmi burslu statüde Paris Saclay Üniversitesi'nde "İşletmeden Çıkarma ve Nükleer Atık Yönetimi" üzerine ikinci yüksek lisans eğitimini 2021 yılında tamamladı. Bu eğitim dönüşü Nükleer Düzenleme Kurumu Radyasyondan Korunma Dairesi Başkanlığında Uzman Yardımcısı olarak görevlendirilmiş olup halen görevine devam etmektedir. Aynı zamanda Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliğinde doktora çalışmalarına devam etmektedir.



## SERAY KÜPÇÜOĞLU

### *Elektrik-Elektronik Mühendisi*

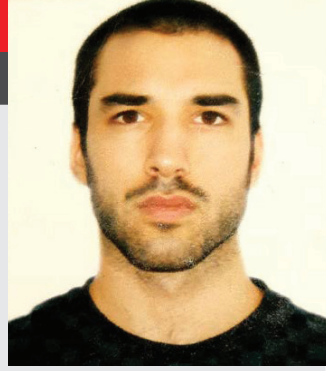
Lisans eğitimini 2019 yılında Türk Hava Kurumu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. Yüksek lisans eğitimini 2019-2021 yılları arasında, Akkuyu Nükleer Güç Santrali kapsamında, Saint-Petersburg Politeknik Üniversitesinde Elektrik Mühendisliği üzerine yaptı. 2021 yılının Eylül ayında Akkuyu Nükleer Güç Santralında Elektrik Bölümü uzmanı olarak göreve başlamış olup halen devam etmektedir.

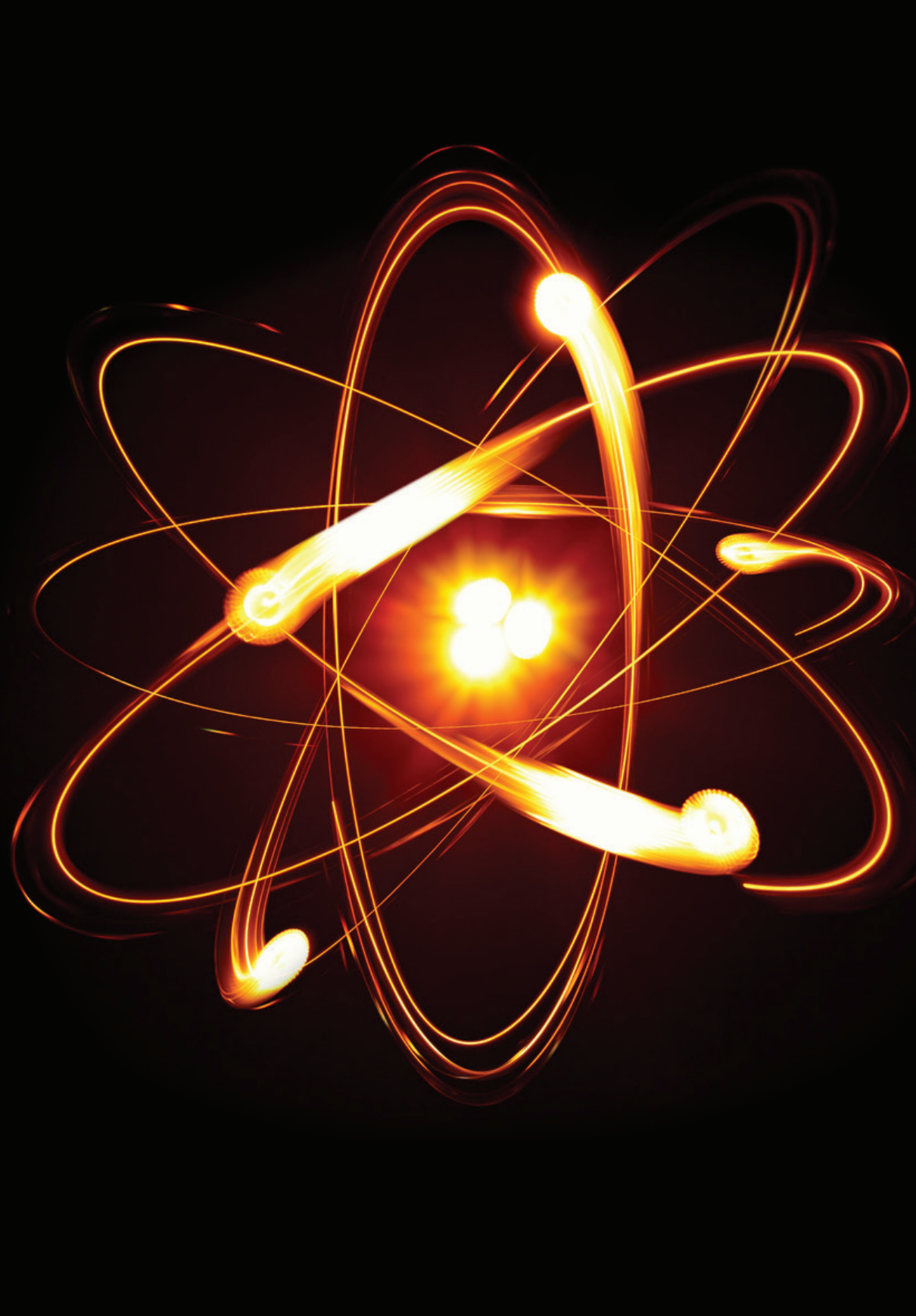


## MEHMET ÖZYILDIRIM

### *Makine Mühendisi*

Lisans eğitimini 2019 yılında Saint-Petersburg Politeknik Üniversitesi Enerji ve Makine Mühendisliği bölümünde tamamladı. Yüksek lisans eğitimini 2019-2021 yılları arasında, Akkuyu Nükleer Santrali kapsamında, Saint-Petersburg Politeknik Üniversitesinde Güç Santralleri Mühendisliği üzerine yaptı. 2021 yılının Eylül ayında Akkuyu Nükleer Güç Santralinde türbin bölümünde çalışmaya başlamıştır.









Bu yayının bütün hakları saklıdır.

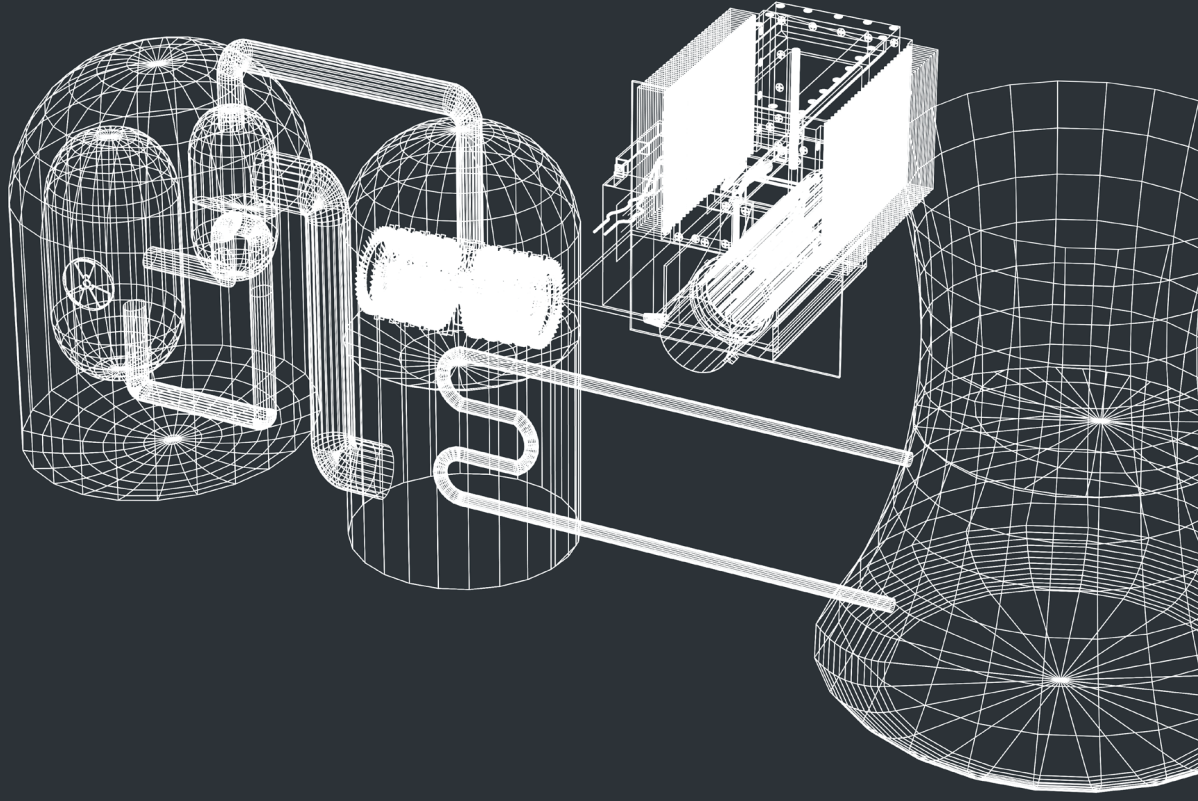
© 2021, TESAB

Bu yayının hiçbir kısmı herhangi bir formda izin alınmadan  
satılamaz ya da satılmak için çoğaltılamaz.

Ancak kaynak belirtme koşuluyla, izin alınmaksızın bu yayından  
alıntı yapılabilir.







Türkiye Elektrik Sanayi Birliği 20.06.2005 tarih ve 2005/9060 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile elektrik enerjisi sektöründe faaliyet göstermek üzere kurulmuş Sivil Toplum Kuruluşudur. Ülkemizi EURELECTRIC ve CIGRE'de temsil etmektedir. Misyonu; bu kuruluşların çalışmalarına katılım sağlamak ve bu platformda edinilen tecrübe ve bilgileri üyeleri ile paylaşmaktır.

