



Türkiye Enerji Stratejileri ve Politikaları Araştırma Merkezi

ARAŞTIRMA RAPORU

KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER (SMR)

Teknolojik Gelişim Süreci, Küresel Enerji
Dönüşümündeki Rolü ve Türkiye'nin
Enerji Politikaları Açısından Stratejik Önemi

Yazarlar

Doç. Dr. Anıl Çağlar Erkan
Sude Manka

Yayıncı

TESPAM
Türkiye Enerji Stratejileri ve
Politikaları Araştırma Merkezi



Türkiye Enerji Stratejileri ve Politikaları Araştırma Merkezi

(TESPAM)

Araştırma Raporu

KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER (SMR)

Teknolojik Gelişim Süreci, Küresel Enerji Dönüşümündeki Rolü ve
Türkiye'nin Enerji Politikaları Açısından Stratejik Önemi

Doç. Dr. Anıl Çağlar ERKAN

TESPAM

Sude MANKA

TESPAM

KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER (SMR): Teknolojik Gelişim Süreci, Küresel Enerji Dönüşümündeki Rolü ve Türkiye'nin Enerji Politikaları Açısından Stratejik Önemi

Yazarlar: Doç. Dr. Anıl Çağlar Erkan ve Sude Manka

© 2026 TESPAM — Türkiye Enerji Stratejileri ve Politikaları Araştırma Merkezi. Tüm hakları saklıdır.

Bu yayının hiçbir bölümü, TESPAM'ın yazılı izni olmaksızın herhangi bir form veya araçla — elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka türlü yollarla — çoğaltılamaz, yeniden üretilemez veya iletilemez.

Ancak araştırma, eleştiri veya yorum amacıyla yapılacak kısa alıntılarda ve akademik atıflarda eser kaynağının açıkça belirtilmesi şartıyla bu kısıtlama uygulanmaz.

Yayıncı Bilgileri

TESPAM — Türkiye Enerji Stratejileri ve Politikaları Araştırma Merkezi

Ankara, Türkiye

Web: www.tespam.org

Atıf Biçimi (APA 7)

Erkan, A. Ç., & Manka, S. (2026). Küçük modüler reaktörler (SMR): Teknolojik gelişim süreci, küresel enerji dönüşümündeki rolü ve Türkiye'nin enerji politikaları açısından stratejik önemi. TESPAM.

Kısaltmalar Listesi

ACP100	Advanced China Pressurized Reactor 100
ARDP	Advanced Reactor Demonstration Program
BWRX-300	Boiling Water Reactor Extended (300 MWe)
CAREM	Central Argentina de Elementos Modulares
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
DOE	U.S. Department of Energy
EIA	U.S. Energy Information Administration
GDA	Generic Design Assessment (UK)
HALEU	High-Assay Low-Enriched Uranium
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
KHNP	Korea Hydro & Nuclear Power
LCOE	Levelized Cost of Energy
LEU	Low-Enriched Uranium
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japonya)
MWe	Megawatt elektrik
MWt	Megawatt termal
NDK	Nükleer Düzenleme Kurumu
NEA	Nuclear Energy Agency (OECD)
NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OPG	Ontario Power Generation
RITM-200	Reaktör İntegralny Taylovoye Modulniy (200 MWt sınıfı)
SMR	Small Modular Reactor / Küçük Modüler Reaktör
SMART	System-integrated Modular Advanced Reactor
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
WNA	World Nuclear Association
WNISR	World Nuclear Industry Status Report

İÇİNDEKİLER

Kısaltmalar Listesi.....	i
ÖZET	v
1. KÜRESEL ENERJİ SİSTEMLERİNDE TEKTONİK KIRILMA VE SMR'LERİN YÜKSELİŞİ.....	1
2. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERİN KAVRAMSAL VE TEKNOLOJİK TEMELLERİ.....	2
2.1 SMR Tanımı ve Kavramsal Çerçeve.....	2
2.2 Tarihsel Gelişim Süreci: Denizaltı Reaktörlerinden Ticari Uygulamalara.....	4
2.2.1 Kökenler: Askeri Nükleer Programlar ve Kompakt Reaktör Mühendisliği (1950-1970).....	4
2.2.2 Sivil Nükleer Büyüme Dönemi ve 'Daha Büyük Daha İyidir' Paradigması (1960-1986)	4
2.2.3 Çernobil, Fukushima ve Nükleer Güvenlik Paradigmasının Dönüşümü (1986–2011).....	5
2.2.4 SMR Araştırmalarının Kurumsallaşması ve İvme Kazanması (2010-2020)	6
2.2.5 Ticari Olgunlaşma Eşiği: 2020'ler ve İlk Referans Projeler	7
2.3 Teknik Özellikler	8
2.3.1 Güç Kapasitesi ve Sınıflandırma	8
2.3.2 Modüler Üretim Felsefesi ve Fabrika İmalatının Ekonomik Mantığı.....	9
2.3.3 Pasif Güvenlik Sistemleri: Tasarım Felsefesindeki Köklü Değişim.....	10
2.3.4 İnşaat Süreleri: Modülerliğin Zaman Ekonomisi	10
2.3.5 Yakıt Yapıları ve Döngü Stratejileri.....	11
3. DÜNYADA SMR TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ: ÜLKE STRATEJİLERİ VE ÖNCÜ TASARIMLAR.....	13
3.1 Amerika Birleşik Devletleri.....	13
3.1.1 Politika Çerçevesi ve Kurumsal Yapılanma	13
3.1.2 Piyasa Yapısı ve Girişimci Dinamikler	14
3.2 Rusya Federasyonu.....	15
3.3 Çin Halk Cumhuriyeti.....	16
3.4 Kanada	17
3.5 Birleşik Krallık.....	18
3.6 Fransa	19
3.7 Güney Kore.....	20
3.8 Japonya.....	22
3.9 Öncü SMR Tasarımları: Teknik ve Ticari Uygulanabilirlik Analizi	23
3.9.1 NuScale VOYGR.....	23
3.9.2 GE-Hitachi BWRX-300.....	24
3.9.3 CAREM-25	24
3.9.4 ACP100 Linglong One.....	25
3.9.5 RITM-200.....	26
3.9.6 Rolls-Royce SMR	27
4. SMR TEKNOLOJİLERİNİN ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNDEKİ ROLÜ: ANALİTİK BİR DEĞERLENDİRME	29
4.1 Karbonsuzlaşma ve Net Sıfır Hedefleri: SMR'lerin Rolü Nerede Başlayıp Nerede Bitiyor?.....	29
4.1.1 Düşük Karbonlu Sistemlerde Nükleer Enerjinin Yaşam Döngüsü Karbon Yoğunluğu.....	29
4.2 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu: Rakip mi, Tamamlayıcı mı?.....	30
4.2.1 Aralıklık Sorunu ve Şebeke Dengesi	31
4.3 Hidrojen Ekonomisi ve SMR'lerin Stratejik Konumu.....	32
4.3.1 Nükleer Hidrojen Üretim Yolları.....	33
4.3.2 Nükleer Hidrojenin Jeopolitik Boyutu.....	34

4.4 Ağır Sanayinin Karbonsuzlaştırılması: SMR'lerin En Stratejik Değer Önerisi.....	35
4.4.1 Demir-Çelik Endüstrisi	35
4.4.2 Amonyak ve Gübre Üretimi.....	36
4.4.3 Petrokimya, Çimento ve Madencilik Uygulamaları.....	37
4.5 Veri Merkezleri, Yapay Zekâ Ekonomisi ve SMR'lerin Yeni Kurumsal Talebi.....	38
5. SMR TEKNOLOJİLERİNİN JEOPOLİTİĞİ.....	41
5.1 'Nükleer Kilit Etkisi' (Nuclear Lock-in).....	41
5.2 Nükleer Teknoloji İhracatı ve Yumuşak Güç.....	41
5.3 SMR'lerin Kritik Altyapı Güvenliği Boyutu.....	42
5.4 Nükleer Çoğalma Riski: Eleştirel Perspektif ve Gerçekçi Değerlendirme.....	44
6. SMR TEKNOLOJİLERİNİN EKONOMİK ANALİZİ: MALİYET, FİNANSMAN VE TİCARİ UYGULANABİLİRLİK.....	46
6.1 Maliyet Yapısının Anatomisi: Birinci Nesil Tesislerden Ne Öğrenildi?	46
6.1.1 Sermaye Maliyeti: Neden Bu Kadar Belirsiz?.....	46
6.1.2 Düzleştirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) Analizi.....	48
6.2 Finansman Modelleri ve Devlet Desteğinin Belirleyici Rolü.....	49
6.2.1 Neden SMR'ler Salt Piyasa Dinamikleriyle Finanse Edilemez?.....	51
6.2.2 Küresel Finansman Model Taksonomisi.....	53
6.3 SMR Ekonomisine Yönelik Eleştirel Değerlendirme	54
6.4 Ekonomik Kırılma Noktaları: SMR'lerin Rekabetçi Olmaya Başladığı Koşullar.....	56
7. TÜRKİYE'NİN ENERJİ GÜVENLİĞİ PROFİLİ VE SMR TEKNOLOJİLERİNİN STRATEJİK POTANSİYELİ	58
7.1. Türkiye'nin Enerji Güvenliği Profili: Yapısal Kırılganlıkların Anatomisi	58
7.1.1. Enerji İthalat Bağımlılığı ve Makroekonomik Etkileri.....	58
7.1.2. Doğal Gaz Bağımlılığının Derinliği ve Çok Boyutlu Riskleri	59
7.1.3. Yenilenebilir Enerji Dönüşümünün Başarıları ve Yapısal Sınırlılıkları.....	60
7.2. Türkiye'nin Elektrik Talebi Projeksiyonları: Büyümenin Yapısı ve Hızı.....	61
7.2.1. Tarihsel Büyüme Eğilimi ve Yapısal Dinamikler.....	61
7.2.2. 2053 Net Sıfır Hedefi ile Kapasite Gereksinimi Arasındaki Açık.....	62
7.3. SMR'lerin Türkiye'de Potansiyel Uygulama Alanları: Sistematik Analiz	63
7.3.1. Savunma Sanayii ve Kritik Güvenlik Altyapısı	63
7.3.2. Organize Sanayi Bölgeleri ve Endüstriyel Küme Uygulamaları	63
7.3.3. Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da Uzak Bölge ve Madencilik Uygulamaları	64
7.3.4. Yeşil Hidrojen Üretim Altyapısı.....	65
7.3.5. Veri Merkezleri ve Dijital Altyapı	65
7.4. Türkiye'nin Mevcut Nükleer Programı ve SMR'lerin Tamamlayıcı Rolü	66
8. TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK YOL HARİTASI: 2026-2053 POLİTİKA ÇERÇEVESİ	68
8.1 Kısa Vade (2026-2030): Stratejik Temellerin İnşası	68
8.1.1 Ulusal SMR Strateji Belgesi'nin Hazırlanması ve Resmi Onayı.....	69
8.1.2 TENMAK ve NDK'nin Kurumsal Kapasite Dönüşümü	71
8.1.3 Nükleer Mühendislik Kapasitesinin Genişletilmesi	73
8.1.4 Pilot Proje Fizibilite Çalışmaları.....	75
8.1.5 Hukuki Altyapının Yeniden Yapılandırılması	77
8.2 Orta Vadeli Hedefler (2030-2040): İlk Ticari Konuşlandırma ve Tedarik Zinciri	77
8.2.1 Teknoloji Seçimi ve Birinci SMR Tesisinin İnşaatı.....	77
8.2.2 Yerli Tedarik Zincirinin Sistematik Gelişimi.....	78
8.2.3 Uluslararası Ortaklık Mimarisinin Kurulması	79
8.2.4 Finansman Çerçevesinin Oluşturulması	80
8.3 Uzun Vadeli Hedefler (2040-2053): Teknolojik Egemenlik ve Bölgesel Nükleer Merkez	80

8.3.1 Türkiye Orijinli SMR Tasarımına Doğru	80
8.3.2 Bölgesel SMR Merkezi Vizyonu: Gerçekçi Hedefler ve Kritik Koşullar.....	81
9. SONUÇ: BÜYÜK DÖNÜŞÜMÜN EŞİĞİNDE SMR TEKNOLOJİSİ VE TÜRKİYE'NİN STRATEJİK SEÇİMİ	83
9.1 SMR'ler Gerçekten Enerji Dönüşümünün Yeni Paradigması Olabilir mi? Koşullu Bir Evet'in Gerekçeleri	83
9.2 Türkiye Neden SMR Teknolojilerini Stratejik Öncelik Haline Getirmelidir? Üç Temel Gerekçe.....	84
9.3 Türkiye'nin Geç Kalması Durumunda Ortaya Çıkabilecek Riskler: Sessiz Stratejik Erozyon	86
9.4 SMR'ler Türkiye'nin Enerji Güvenliğine Nasıl Katkı Sağlayabilir? Çok Katmanlı Bir Değerlendirme	87
9.5 Türkiye Bölgesel SMR Merkezi Olabilir mi? Potansiyelin Nesnel Sınırları	88
9.6 Kapanış: Tarihin Hızlandığı Bir Anda Türkiye'nin Seçimi.....	89
KAYNAKÇA.....	90

ÖZET

Bu rapor, Küçük Modüler Reaktör (SMR) teknolojilerinin kavramsal, tarihsel ve teknik temellerini; küresel enerji dönüşümü bağlamındaki işlevsel konumunu, jeopolitik rekabet içerisindeki rolünü ve Türkiye'nin enerji güvenliği, teknolojik egemenlik ile stratejik otonomi hedefleri açısından taşıdığı potansiyel değeri çok boyutlu bir yaklaşımla incelemektedir. Çalışmada SMR teknolojileri yalnızca elektrik üretimine yönelik alternatif bir nükleer enerji seçeneği olarak değil, aynı zamanda 21. yüzyılda enerji arz güvenliği, düşük karbonlu kalkınma, teknoloji transferi ve stratejik güç rekabeti açısından önem kazanan kritik bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektedir.

Çalışmanın temel amacı, SMR teknolojilerinin Türkiye'nin enerji güvenliği, teknolojik egemenlik, sanayi kapasitesi ve stratejik otonomi hedefleri açısından sağlayabileceği potansiyel katkıları bütüncül bir perspektifle değerlendirmek ve bu doğrultuda uygulanabilir bir politika yol haritası geliştirmektir. Bu bağlamda raporda, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini güçlendirmesi, dışa bağımlılığı azaltması, nükleer teknoloji alanında kurumsal ve endüstriyel kapasitesini geliştirmesi ve uzun vadede stratejik otonomisini desteklemesi açısından SMR teknolojilerinin taşıdığı önem vurgulanmaktadır.

1. KÜRESEL ENERJİ SİSTEMLERİNDE TEKTONİK KIRILMA VE SMR'LERİN YÜKSELİŞİ

Yirminci yüzyılın son çeyreğinden itibaren küresel enerji sistemleri, yalnızca kapasite artışı ve kaynak çeşitlendirmesi ekseninde değil; aynı zamanda iklim değişikliği, jeopolitik rekabet ve teknolojik inovasyon dinamiklerinin birbiriyle kesiştiği çok katmanlı bir dönüşüm sürecine girmiştir. Fosil yakıt bağımlılığının beraberinde getirdiği karbon yoğunluğu, atmosferik sera gazı birikimini 2023 yılı itibarıyla 420 ppm eşliğinin üzerine taşıyarak *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) raporlarının öngördüğü kritik eşiklere yaklaşılmasına zemin hazırlamıştır (IPCC, 2023). Paris Anlaşması çerçevesinde küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlandırma hedefi, enerji üretim sistemlerinin 2050 yılına kadar net sıfır emisyon düzeyine ulaştırılmasını zorunlu kılmakta; bu durum başta elektrik üretimi olmak üzere sanayi, ulaştırma ve ısıtma sektörlerinin kapsamlı bir yeniden yapılanmaya tabi tutulması anlamına gelmektedir (IEA, 2023).

Bu dönüşüm sürecinin belirleyici aktörleri arasında yenilenebilir enerji teknolojileri öne çıkmakla birlikte, söz konusu teknolojilerin aralıklı üretim yapısı ve yük dengeleme kapasitelerindeki sınırlılıklar, temel yük enerjisi sağlayıcısı olarak nükleer enerjiye olan ilgiyi yeniden canlandırmıştır. Nitekim Uluslararası Enerji Ajansı, net sıfır senaryolarında nükleer enerji kapasitesinin 2050 yılına kadar iki katına çıkarılması gerektiğini vurgulamaktadır (IEA, 2023). Bu bağlamda Küçük Modüler Reaktörler (SMR), geleneksel büyük ölçekli nükleer santrallerin karşılaştığı inşaat süresi uzunluğu, yüksek sermaye maliyeti ve sınırlı yerleşim esnekliği gibi yapısal engellerini aşmak üzere tasarlanmış yeni nesil nükleer teknolojiler olarak küresel enerji gündeminin merkezine yerleşmektedir.

Enerji güvenliği boyutunda ise Rusya'nın 2022 yılında Ukrayna'ya yönelik kapsamlı askeri operasyonu, Avrupa başta olmak üzere küresel enerji piyasalarında derin bir jeopolitik kırılmaya yol açmış; fosil yakıt ithalat bağımlılığının stratejik bir güvenlik açığına dönüşebileceğini somut bir biçimde ortaya koymuştur (Yergin, 2022). Bu gelişme, enerji çeşitlendirmesi ve yerli üretim kapasitesi geliştirme arayışlarını hızlandırırken SMR teknolojilerini hem enerji güvenliği hem de teknolojik egemenlik söylemleri çerçevesinde stratejik bir öncelik haline getirmiştir. Nitekim *World Nuclear Association*'nin verilerine göre 2024 yılı itibarıyla dünya genelinde 80'i aşkın farklı SMR tasarımı çeşitli geliştirme aşamalarında bulunmakta olup bu tasarımlar basınçlı su reaktörlerinden eriyik tuz reaktörlerine, gaz soğutmalı sistemlerden hızlı nötron reaktörlerine uzanan geniş bir teknolojik yelpazeyi kapsamaktadır (WNA, 2024).

Küresel enerji geçişinin üç temel eksenini oluşturan karbonsuzlaşma, enerji güvenliği ve teknolojik dönüşüm dinamikleri, SMR'lerin yükselişini rastlantısal bir teknoloji trendi olarak değil; yapısal bir zorunluluktan kaynaklanan sistemik bir yanıt olarak konumlandırmaktadır. Bu çalışma, söz konusu yapısal bağlamı merkeze alarak SMR teknolojilerinin gelişim sürecini, küresel enerji dönüşümündeki rolünü ve Türkiye'nin enerji politikaları açısından taşıdığı stratejik önemi kapsamlı bir biçimde incelemeyi amaçlamaktadır.

2. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERİN KAVRAMSAL VE TEKNOLOJİK TEMELLERİ

2.1 SMR Tanımı ve Kavramsal Çerçeve

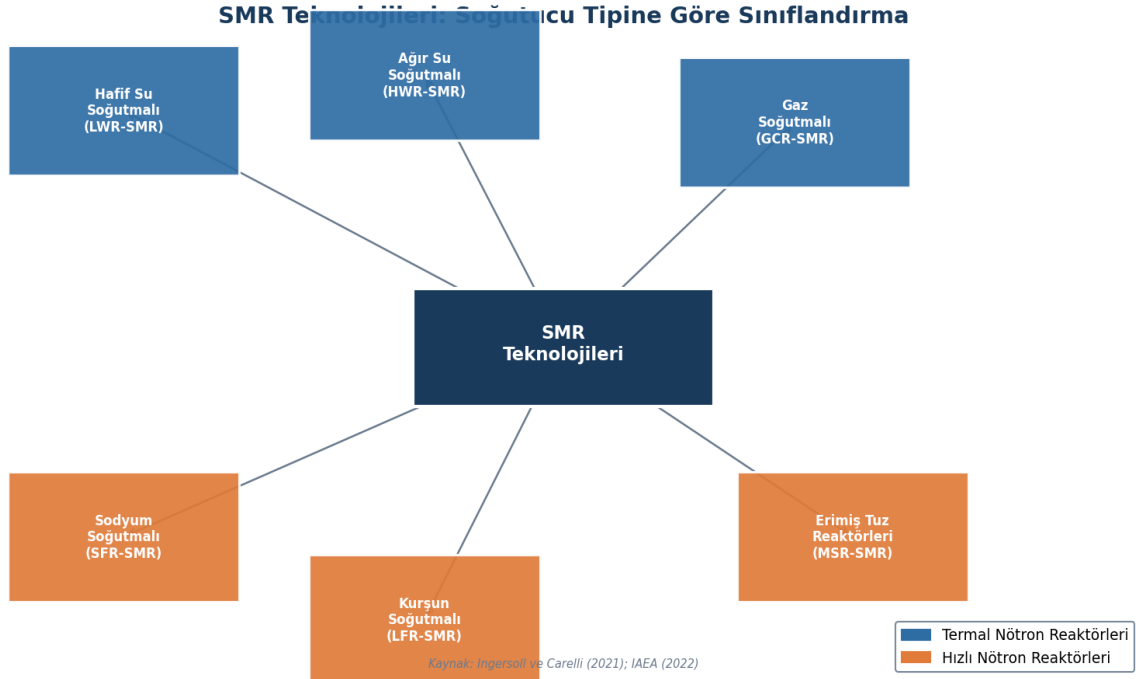
Küçük Modüler Reaktör (Small Modular Reactor) kavramının akademik literatürde tek ve evrensel kabul görmüş bir tanımının bulunmadığını belirtmek gerekir. Bu terminolojik çeşitlilik, hem teknolojinin hâlen gelişim sürecinde olmasından hem de farklı kurumların SMR'leri farklı teknik, ekonomik ve düzenleyici amaçlarla tanımlamasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte en yaygın başvuru çerçevelerinden biri Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın tanımıdır. IAEA'ya göre SMR'ler, genellikle 300 MWe'nin altında elektrik üretim kapasitesine sahip olan ve modüler üretim ile kurulum yöntemlerine uygun biçimde tasarlanan nükleer reaktörlerdir (IAEA, 2020). Bu tanım işlevsel olmakla birlikte, SMR kavramının teknik ve ekonomik açıdan taşıdığı bazı önemli nüansları ayrıca değerlendirmeyi gerektirmektedir.

SMR kavramını oluşturan “küçük”, “modüler” ve “reaktör” bileşenleri ayrı ayrı ele alınmalıdır. “Küçük” ifadesi, temel olarak reaktörün elektrik üretim kapasitesine atıfta bulunmaktadır. Ancak yalnızca güç çıktısını ölçüt almak analitik açıdan yeterli değildir; çünkü 100 MWe ile 300 MWe arasındaki tasarımlar, teknik yapı, kullanım alanı, finansman modeli ve şebeke entegrasyonu bakımından önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle SMR'leri yalnızca düşük kapasiteli nükleer santraller olarak değil, farklı ölçeklerde ve farklı uygulama alanlarında kullanılabilecek esnek bir teknoloji ailesi olarak değerlendirmek daha doğru olacaktır.

“Modüler” kavramı ise SMR tanımının en yenilikçi ve ayırt edici unsurudur. Modülerlik, reaktörün önemli bileşenlerinin fabrika ortamında üretilerek kurulum sahasına taşınmasını ve sahada daha kısa sürede monte edilmesini ifade etmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel nükleer santrallerde baskın olan saha merkezli inşaat modelinden önemli bir ayrışmayı temsil etmektedir (OECD NEA, 2021). Fabrika üretimine dayalı bu model; kalite güvencesi, maliyet öngörülebilirliği, standartlaşma ve seri üretimden kaynaklanan öğrenme eğrisi açısından nükleer sektöre yeni bir ekonomik mantık sunmaktadır (Carelli ve Garrone, 2022). Bununla birlikte bu avantajların gerçekleşmesi, yeterli sipariş hacmine, tedarik zinciri olgunluğuna ve düzenleyici istikrara bağlıdır.

“Reaktör” bileşeni ise SMR'lerin temel enerji dönüşüm mekanizmasının nükleer fizyon olduğunu göstermektedir. Bu nedenle SMR'ler, boyut ve kurulum modeli bakımından geleneksel büyük reaktörlerden farklılaşsa da yakıt döngüsü, atık yönetimi, nükleer güvenlik, düzenleyici denetim ve proliferasyon riski açısından nükleer enerji sisteminin temel meseleleriyle süreklilik taşımaktadır. Dolayısıyla SMR'leri yalnızca daha küçük ve daha esnek enerji üretim birimleri olarak değil, nükleer teknolojinin bütün güvenlik, yakıt ve yönetim boyutlarını içeren karmaşık sistemler olarak değerlendirmek gerekmektedir (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası [TSKB], 2022).

SMR ailesi içinde yer alan tasarımlar; nötron spektrumu, soğutucu tipi, yakıt formu, çalışma sıcaklığı ve öngörülen kullanım amacı bakımından oldukça geniş bir teknolojik çeşitlilik sergilemektedir. Bu nedenle tek tip bir “SMR teknolojisi”nden söz etmek hem teknik gerçeklik hem de politika analizi açısından kavramsal olarak indirgemeci bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (IAEA, 2022; NEA, 2021).



Şekil 1 SMR Teknolojileri: Soğutucu Tipine Göre Sınıflandırma (Kaynak: Ingersoll ve Carelli, 2021; IAEA, 2022)

SMR tasarımlarının heterojen yapısı, bu reaktörlerin yalnızca ölçek bakımından değil, aynı zamanda reaktör fiziği, termal-hidrolik davranış ve yakıt çevrimi açısından da farklı teknoloji ailelerine ayrıldığını göstermektedir. Bu çeşitlilik, her SMR alt grubunun maliyet yapısını, güvenlik yaklaşımını, lisanslama gerekliliklerini, yakıt tedarik zincirini, potansiyel kullanım alanlarını ve dolayısıyla jeopolitik etkilerini farklılaştırmaktadır (Ingersoll ve Carelli, 2021; World Nuclear Association, 2025).

Literatürde SMR sınıflandırmaları genellikle soğutucu türü ve nötron spektrumuna göre yapılmaktadır. Bu çerçevede Ingersoll ve Carelli (2021), SMR teknolojilerini soğutucu tipine göre altı ana kategori altında sınıflandırmaktadır: hafif su soğutmalı SMR'ler (Light Water Reactor SMR – LWR-SMR), ağır su soğutmalı SMR'ler (Heavy Water Reactor SMR – HWR-SMR), gaz soğutmalı SMR'ler (Gas-Cooled Reactor SMR – GCR-SMR), sodyum soğutmalı hızlı reaktörler (Sodium Fast Reactor SMR – SFR-SMR), kurşun soğutmalı hızlı reaktörler (Lead-cooled Fast Reactor SMR – LFR-SMR) ve erimiş tuz reaktörleri (Molten Salt Reactor SMR – MSR-SMR). Bu sınıflandırma, SMR teknolojilerinin yalnızca modülerlik ve ölçek avantajı üzerinden değil, aynı zamanda reaktör fiziği ve termodinamik performans farklılıkları üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle farklı soğutucu ve yakıt kombinasyonları, reaktörlerin çalışma sıcaklıklarını, verimlilik düzeylerini ve güvenlik sistemlerinin tasarımını doğrudan etkilemektedir (IAEA, 2022). Bununla birlikte SMR teknolojilerinin çeşitliliği, düzenleyici çerçeveler açısından da önemli bir karmaşıklık yaratmaktadır. Farklı tasarım aileleri için ayrı lisanslama süreçlerinin gerekmesi, küresel ölçekte standartlaşma sorununu gündeme getirmekte ve bu durum SMR'lerin hızlı ölçeklenmesini sınırlayan önemli bir kurumsal faktör olarak değerlendirilmektedir (OECD NEA, 2021). Dolayısıyla SMR teknolojileri, tekil bir teknoloji sınıfı olmaktan ziyade, farklı teknik mimariler, farklı güvenlik paradigmaları ve farklı yakıt döngüsü bağımlılıkları içeren geniş bir reaktör ailesi olarak ele alınmalıdır. Bu heterojen yapı,

SMR'lerin hem enerji dönüşümünde esneklik sağlayan bir araç hem de farklı jeopolitik ve tedarik zinciri bağımlılıkları üreten stratejik bir teknoloji kümesi olmasına neden olmaktadır.

2.2 Tarihsel Gelişim Süreci: Denizaltı Reaktörlerinden Ticari Uygulamalara

2.2.1 Kökenler: Askeri Nükleer Programlar ve Kompakt Reaktör Mühendisliği (1950-1970)

SMR teknolojilerinin kavramsal ve mühendislik köklerini anlayabilmek için 1940'ların sonu ve 1950'lerin başında gelişen askeri nükleer programlara bakmak gerekmektedir. İkinci Dünya Savaşı sonrasında ABD Donanması, uzun süre yakıt ikmali yapmadan görev yapabilecek, kompakt, güvenilir ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir güç kaynağına ihtiyaç duymuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda başlatılan Naval Reactors programının başına getirilen Amiral Hyman G. Rickover, nükleer reaktör mühendisliğinde sonraki on yılları etkileyecek disiplin, güvenlik kültürü ve kalite standartlarının oluşmasında belirleyici rol oynamıştır (Duncan, 1990).

Rickover'ın liderliğinde geliştirilen S1W prototip reaktörü, 1953 yılında Idaho'da kritikliğe ulaşmış ve denizaltı reaktörü teknolojisinin uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Bu prototipten elde edilen deneyim, 1954'te denize indirilen ve 1955'te nükleer güçle seyir yapan USS Nautilus denizaltısında kullanılan S2W reaktör tasarımına temel oluşturmuştur (Hewlett ve Duncan, 1974). Bu gelişme; kompakt boyut, yüksek güvenilirlik, uzun yakıt döngüsü ve kapalı çevrim işletme kabiliyeti açısından nükleer mühendislik tarihinde önemli bir dönüm noktasıdır.

ABD deniz reaktörü programı, daha sonraki kompakt reaktör tasarımları açısından da önemli teknik birikimler üretmiştir. S5G ve S8G gibi tasarımlar, doğal sirkülasyonla soğutma ve düşük gürültülü işletme gibi özelliklerin uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu deneyimler, günümüz SMR tasarımlarında öne çıkan pasif güvenlik, kompakt çekirdek yapısı, yüksek güvenilirlik ve uzun yakıt çevrimi gibi mühendislik ilkelerinin tarihsel temelini oluşturmuştur (Diorio C., 2016).

Aynı dönemde Sovyetler Birliği de kendi denizaltı ve deniz reaktörü programlarını geliştirmiştir. Sovyet deniz reaktörü deneyimi, ilerleyen yıllarda Rusya'nın buz kıran reaktörleri ve yüzer nükleer güç santrali projeleri için önemli bir altyapı sağlamıştır. Böylece hem ABD hem de Sovyet deneyimi, küçük ölçekli ve kompakt nükleer güç sistemlerinin yalnızca teorik değil, pratik olarak da uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Askeri programların yanı sıra, uzak bölgelerde nükleer enerji kullanımına yönelik erken sivil/yarı-sivil uygulamalar da kompakt reaktör mühendisliği açısından önem taşımaktadır. ABD Army Nuclear Power Program kapsamında geliştirilen PM-3A reaktörü, 1962–1972 yılları arasında Antarktika'daki McMurdo İstasyonu'nda işletilmiş ve izole bölgelerde nükleer enerji kullanımının erken örneklerinden biri olmuştur (Ortiz, 2023; Scoville, 1963). Bu deneyim, günümüzde mikro reaktörler ve uzak bölge SMR uygulamaları için tarihsel bir referans niteliği taşımaktadır.

2.2.2 Sivil Nükleer Büyüme Dönemi ve 'Daha Büyük Daha İyidir' Paradigması (1960-1986)

1960'lardan 1970'lerin ortalarına uzanan dönem, sivil nükleer sanayinin hızlı büyüme dönemi olarak değerlendirilebilir. Bu dönemde hâkim teknoloji geliştirme anlayışı, ölçek ekonomilerinin santral kapasitesini artırarak sağlanabileceği varsayımına dayanmıştır. Başka bir ifadeyle, “daha büyük, daha ucuz” yaklaşımı nükleer sektörün temel yatırım mantığı hâline gelmiştir (Grubler,

2010). Bu çerçevede reaktör kapasiteleri zaman içinde 100 MWe ölçeğinden 500 MWe'ye, ardından 1000 MWe ve üzeri seviyelere çıkmıştır (STM ThinkTech, 2022).

Ancak bu büyüme paradigması beklenen ekonomik sonuçları her zaman üretmemiştir. Grubler'in (2010) çalışması, özellikle büyük nükleer programlarda reaktör ölçeği arttıkça mühendislik karmaşıklığının, lisanslama süreçlerinin, saha inşaatı risklerinin ve proje gecikmelerinin de arttığını göstermektedir. Bu durum, nükleer sektörde klasik ölçek ekonomisi beklentisinin her zaman gerçekleşmediğini ve bazı durumlarda “tersine öğrenme” veya “tersine ölçek ekonomisi” olarak yorumlanabilecek sonuçlar doğurduğunu ortaya koymaktadır.

Bu dönemde küçük, kompakt veya modüler reaktörlere yönelik ilgi sınırlı kalmıştır. Sivil nükleer enerji politikalarının ana odağı, büyük şehirler ve sanayi merkezleri için yüksek kapasiteli santraller inşa etmek olmuştur. Küçük ölçekli nükleer enerji ise çoğu zaman niş bir uygulama alanı olarak görülmüş; küçük şebekeler, uzak bölgeler veya gelişmekte olan ülkeler için zaman zaman değerlendirilse de ana akım nükleer yatırım modeline dönüşmemiştir.

Bununla birlikte küçük ve orta güçlü nükleer santrallere yönelik ilgi tamamen ortadan kalkmamıştır. IAEA'nın “Küçük ve Orta Güçlü Nükleer Santraller” üzerine yürüttüğü çalışmalar, bu dönemde kompakt reaktör fikrinin sınırlı fakat süreklilik taşıyan bir araştırma alanı olarak varlığını sürdürdüğünü göstermektedir (IAEA, 1991). Bu birikim, 1990'lar ve 2000'lerden itibaren yeniden gündeme gelecek olan SMR tartışmaları için kurumsal ve teknik bir zemin oluşturmuştur.

2.2.3 Çernobil, Fukushima ve Nükleer Güvenlik Paradigmasının Dönüşümü (1986–2011)

1986 Çernobil kazası, nükleer enerjiye yönelik küresel kamuoyu algısını derinden sarsmış; aynı zamanda nükleer mühendislik alanında güvenlik felsefesinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. RBMK tipi Çernobil reaktörünün pozitif boşluk katsayısı, kontrol çubuklarının tasarım sorunları, yeterli muhafaza yapısının bulunmaması ve zayıf güvenlik kültürü; nükleer kazaların yalnızca teknik arızalardan değil, tasarım, işletme ve kurumsal denetim eksikliklerinin birleşiminden kaynaklanabileceğini göstermiştir (Plokhly, 2018). Bu deneyim, aktif müdahaleye aşırı bağımlı güvenlik yaklaşımlarının sınırlarını ortaya koymuş ve daha güçlü pasif güvenlik sistemleri, kendiliğinden güvenli tasarım ilkeleri ve operatör hatasına bağımlılığı azaltan mühendislik çözümleri yönünde önemli bir dönüşümü tetiklemiştir.

Bu dönüşümün SMR araştırmaları açısından en önemli sonucu, küçük ölçekli reaktörlerde pasif güvenlik ilkelerinin uygulanma potansiyelinin daha görünür hâle gelmesidir. Büyük nükleer santrallerde atık ısının yüksek miktarı, pasif soğutma sistemlerinin tasarımını karmaşılaştırırken; küçük reaktörlerde daha düşük ısı güç, termal atalet ve yüzey-hacim oranı avantajı doğal sirkülasyon ve pasif ısı atımı gibi çözümleri daha uygulanabilir kılabilmiştir (Ingersoll ve Carelli, 2021). Bu kavramsal içgörü, 1990'larda ABD, Japonya, Hindistan ve diğer bazı ülkelerde küçük reaktör tasarımlarına yönelik araştırmaları desteklemiştir. Ancak bu çalışmaların büyük bölümü, piyasa ilgisinin sınırlı kalması, ekonomik cazibenin zayıf görülmesi ve kurumsal önceliklerin büyük santral projelerine yönelmesi nedeniyle ticari uygulamaya dönüşmemiştir.

2011 Fukushima Daiichi kazası ise nükleer sektör üzerinde çift yönlü bir etki yaratmıştır. Bir yandan Almanya ve İsviçre gibi ülkelerde nükleer enerjiden çıkış politikalarını hızlandırmış, Japonya'da ise reaktörlerin büyük bölümünün geçici olarak devre dışı bırakılmasına yol açmıştır.

Öte yandan kazanın teknik analizi; istasyon kararması, uzun süreli soğutma kaybı, dış olaylara karşı dayanıklılık ve acil durum yönetimi gibi başlıkların nükleer güvenlik açısından ne kadar kritik olduğunu göstermiştir (IAEA, 2012). Bu deneyim, pasif güvenlik özelliklerine sahip yeni nesil reaktörlerin ve SMR tasarımlarının daha fazla ilgi görmesine katkı sağlamıştır.

Fukushima sonrası dönemde SMR'ler, yalnızca küçük ölçekleri nedeniyle değil; pasif güvenlik sistemleri, yer altı veya daha kompakt yerleşim imkânları, düşük çekirdek envanteri ve daha uzun müdahale süreleri gibi özellikler nedeniyle de yeniden değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu özellikler, SMR'lerin tüm güvenlik sorunlarını kendiliğinden çözdüğü anlamına gelmemektedir. Aksine, her tasarımın güvenlik performansı; lisanslama süreci, saha koşulları, yakıt yapısı, acil durum planlaması ve düzenleyici denetim kapasitesiyle birlikte değerlendirilmelidir. Dolayısıyla Çernobil ve Fukushima deneyimleri, SMR gündemini hem güvenlik vaadi hem de sıkı denetim gerekliliği bakımından şekillendiren iki tarihsel dönüm noktası olarak okunmalıdır.

2.2.4 SMR Araştırmalarının Kurumsallaşması ve İvme Kazanması (2010-2020)

2010'ların başı, SMR araştırmalarının sınırlı akademik ve sektörel ilgiden çıkarak ulusal enerji politikalarının daha görünür bir parçası hâline geldiği dönemdir. Bu süreçte en belirleyici kurumsal adımlardan biri, ABD Enerji Bakanlığı'nın 2012 yılında başlattığı SMR Lisanslama Teknik Destek Programı olmuştur. Bu program kapsamında DOE, maliyet paylaşımı esasına dayalı olarak NuScale Power ve BWX Technologies gibi şirketlerin lisanslama çalışmalarına destek sağlamış; NuScale tasarımı ilerleyen yıllarda ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından onaylanan ilk SMR tasarımlarından biri hâline gelmiştir (DOE, 2023). Bu gelişme, devletin ticari nükleer teknoloji geliştirme sürecinde yalnızca düzenleyici değil, aynı zamanda finansman ve teknoloji politikası aktörü olarak da yeniden öne çıktığını göstermektedir.

Aynı dönemde Rusya, SMR tartışmalarını pratik uygulama alanına taşıyan en somut örneklerden birini geliştirmiştir. Akademik Lomonosov yüzer nükleer güç santrali, iki adet KLT-40S reaktörüyle tasarlanmış; 2018'de deniz testlerini tamamlamış ve 2019'da Çukotka bölgesindeki Pevek yerleşimine elektrik ve ısı sağlamaya başlamıştır (Rosatom, 2019). Bu proje, kara konuşlu ticari SMR tasarımlarından farklı bir kategoriye ait olmakla birlikte, küçük ölçekli nükleer güç sistemlerinin uzak bölgelerde uygulanabilirliğine ilişkin önemli bir saha deneyimi sunmuştur.

Avrupa'da ise Birleşik Krallık'ın Rolls-Royce SMR programına verdiği destek, SMR'lerin ulusal enerji güvenliği ve sanayi stratejisiyle ilişkilendirilmeye başlandığını göstermektedir. Rolls-Royce liderliğindeki konsorsiyumun kurulması ve Birleşik Krallık hükümetinin bu programa finansman desteği sağlaması, SMR teknolojilerinin yalnızca elektrik üretimi açısından değil, yerli sanayi, ihracat ve yüksek teknoloji kapasitesi bakımından da stratejik bir araç olarak görüldüğünü ortaya koymuştur (BEIS, 2021).

2010–2020 dönemi bu nedenle SMR tarihinde bir geçiş aşaması olarak değerlendirilebilir. Bu dönemde SMR'ler henüz yaygın ticari kullanıma ulaşmamış; ancak araştırma, lisanslama, kamu finansmanı ve ilk saha uygulamaları bakımından kurumsal bir ivme kazanmıştır. ABD'de lisanslama desteği, Rusya'da yüzer nükleer güç uygulaması ve Birleşik Krallık'ta sanayi odaklı SMR programı; 2020 sonrası dönemde hızlanacak küresel SMR yarışının temel zeminini oluşturmuştur.

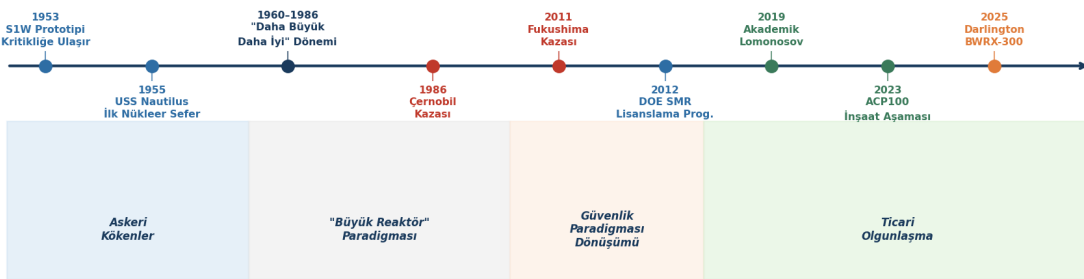
2.2.5 Ticari Olgunlaşma Eşiği: 2020'ler ve İlk Referans Projeler

2020'lerin başından 2026'ya uzanan dönem, SMR araştırmalarının uzun süreli teknoloji vaatlerinden ilk somut referans projelere geçiş sürecini temsil etmektedir. Çin'in Hainan Adası'ndaki ACP100/Linglong One projesi, kara konuşlu ticari SMR uygulamaları açısından en ileri örneklerden biri olarak öne çıkmaktadır. Proje, inşaat süreci ve entegrasyon çalışmalarıyla SMR teknolojilerinin artık yalnızca kavramsal tasarım aşamasında değil, gerçek saha uygulamaları üzerinden değerlendirildiğini göstermektedir (CNNC, 2023).

Kanada'da Ontario Power Generation'ın GE Hitachi BWRX-300 tasarımını Darlington sahasında konuşlandırmaya yönelik süreci ilerletmesi, Batı dünyasında SMR teknolojileri açısından en önemli referans projelerden birini oluşturmaktadır (Ontario Power Generation [OPG], 2025; GE Vernova, 2025). ABD'de Kairos Power, TerraPower ve benzeri ileri reaktör girişimlerinin gösterim projeleri üzerinde çalışması, ABD Enerji Bakanlığı destekli ticari ölçekli SMR geliştirme stratejisinin bir parçası olarak değerlendirilmektedir (U.S. Department of Energy, 2024; Reuters, 2025). Birleşik Krallık'ın Rolls-Royce SMR programını ulusal enerji güvenliği ve sanayi stratejisiyle ilişkilendirmesi, Avrupa'da devlet destekli SMR ölçeklendirme yaklaşımının kurumsallaştığını göstermektedir (UK Department for Energy Security and Net Zero, 2024; Reuters, 2025). 2020'lerin ortasında SMR alanındaki kurumsal ve ticari hareketliliğin belirgin biçimde arttığı, farklı ülkelerde eş zamanlı lisanslama, yatırım ve tedarik zinciri oluşturma süreçlerinden anlaşılmaktadır (IAEA, 2025).

Bununla birlikte bu olgunlaşma süreci, yalnızca olumlu örneklerden oluşmamaktadır. NuScale'in Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) ile yürüttüğü projenin 2023 yılında iptal edilmesi, ilk ticari SMR projelerinde maliyet, talep belirsizliği ve finansman risklerinin ne kadar belirleyici olabileceğini ortaya koymuştur (Haas vd., 2023). Bu deneyim, SMR ekonomisinin varsayılan öğrenme eğrisiyle kendiliğinden başarıya ulaşmayacağını; maliyet kontrolü, sipariş hacmi, düzenleyici öngörülebilirlik, tedarik zinciri olgunluğu ve devlet desteğinin belirleyici olacağını göstermektedir.

SMR Teknolojilerinin Tarihsel Gelişim Süreci (1950-2026)



Şekil 2 SMR Teknolojilerinin Tarihsel Gelişim Süreci, 1950–2026 (Kaynak: Duncan, 1990; IAEA, 2020; Rosatom, 2019; OPG, 2025)

Dolayısıyla 2020'ler, SMR teknolojileri açısından bir "ticari kanıtlanma" dönemidir. Bu dönemde bazı projeler ilk referans tesislere dönüşürken, bazıları maliyet ve finansman sorunları nedeniyle

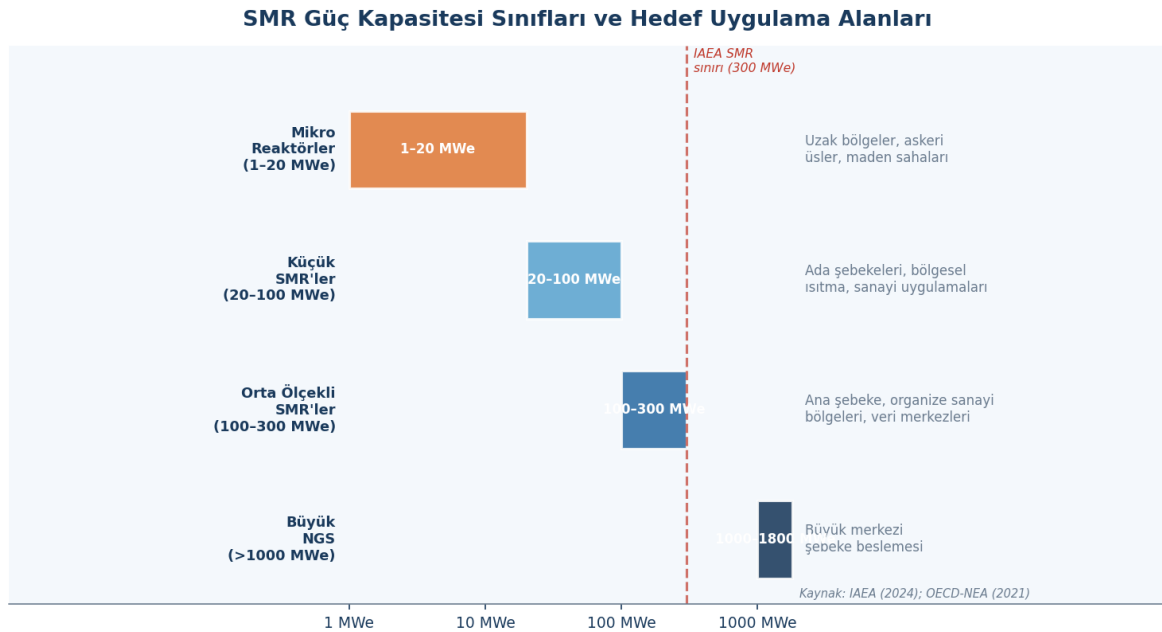
gerilemiştir. Bu durum, SMR'lerin ne koşulsuz bir başarı hikâyesi ne de başarısızlığı kanıtlanmış bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Asıl belirleyici olan, ilk referans projelerden elde edilecek maliyet, inşaat süresi, lisanslama ve işletme performansı verileridir.

2.3 Teknik Özellikler

2.3.1 Güç Kapasitesi ve Sınıflandırma

SMR ailesinin kurulu güç aralığı, bu teknolojilerin tek ve homojen bir kategori olarak değerlendirilmesini güçleştirecek ölçüde geniştir. En küçük tasarımlar 1–10 MWe aralığında yer alan mikro reaktörlerdir. Ticari enerji sistemi uygulamaları açısından daha fazla öne çıkan SMR tasarımları ise genellikle 50–300 MWe aralığında konumlanmaktadır (IAEA, 2024; OECD-NEA, 2021). Bu geniş kapasite yelpazesi, SMR'lerin farklı elektrik sistemleri, sanayi uygulamaları ve bölgesel ihtiyaçlar için farklı biçimlerde tasarlanabildiğini göstermektedir.

Güç kapasitesine dayalı sınıflandırma yararlı olmakla birlikte tek başına yeterli değildir. Çünkü aynı kapasite aralığında yer alan iki SMR tasarımı; soğutucu tipi, yakıt yapısı, pasif güvenlik derecesi, modülerlik seviyesi, saha gereksinimi ve lisanslama yaklaşımı bakımından önemli farklılıklar gösterebilir (WNA, 2025; U.S. Department of Energy, 2024). Benzer şekilde 300 MWe'ye yakın bazı tasarımlar, ölçek ve sistem entegrasyonu açısından geleneksel orta ölçekli nükleer santrallere daha yakın özellikler taşıyabilir (IAEA, 2024). Bu nedenle SMR sınıflandırmasında yalnızca elektrik üretim kapasitesi değil, tasarım mimarisi ve kullanım amacı da dikkate alınmalıdır.



Şekil 3 SMR Güç Kapasitesi Sınıfları ve Hedef Uygulama Alanları (Kaynak: IAEA, 2024; OECD-NEA, 2021)

Kapasite kategorilerine göre SMR'lerin hedeflediği uygulama alanları farklılaşmaktadır. 1–20 MWe aralığındaki mikro reaktörler daha çok uzak bölgeler, askeri üsler, izole maden sahaları ve özel endüstriyel uygulamalar için tasarlanmaktadır (U.S. Department of Energy, 2024; IAEA, 2024). 20–100 MWe aralığındaki küçük SMR'ler ada şebekeleri, küçük elektrik sistemleri, bölgesel ısıtma ve endüstriyel proses ısısı uygulamalarında değerlendirilebilir (OECD-NEA, 2021). 100–

300 MWe aralığındaki orta ölçekli SMR'ler ise ana elektrik şebekesine katkı, büyük organize sanayi bölgeleri, veri merkezleri ve entegre enerji sistemleri için daha uygun görülmektedir (IAEA, 2024; WNA, 2025).

Bu çeşitlilik, SMR'lerin tek bir pazar segmentine indirgenemeyecek kadar geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak aynı çeşitlilik, teknoloji değerlendirmelerini ve ekonomik karşılaştırmaları da zorlaştırmaktadır. Bu nedenle SMR analizlerinde her tasarımın kapasitesi, teknolojik olgunluğu, lisanslama durumu, yakıt ihtiyacı, maliyet profili ve hedef uygulama alanı ayrı ayrı değerlendirilmelidir (OECD NEA, 2021).

2.3.2 Modüler Üretim Felsefesi ve Fabrika İmalatının Ekonomik Mantığı

Modülerlik, SMR ailesinin en ayırt edici mühendislik özelliklerinden birini oluşturmaktadır; ancak bu kavramın pratikte ne ölçüde ekonomik değer yaratacağı hâlen tartışmalı bir konudur. En temel anlamıyla modülerlik, reaktör sisteminin önemli bir bölümünün ya da tamamının fabrika ortamında, standartlaştırılmış üretim süreçleriyle imal edilmesi ve daha sonra kurulum sahasına taşınarak monte edilmesi anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel büyük ölçekli nükleer santral inşaatlarında görülen saha odaklı üretim, karmaşık montaj süreçleri ve yüksek nitelikli işgücüne bağımlılık gibi unsurlardan kaynaklanan maliyet ve süre belirsizliklerini azaltma potansiyeline sahiptir (Carelli ve Garrone, 2022).

Fabrika imalatı yaklaşımının ekonomik mantığı, havacılık, savunma sanayii ve gemi inşaatı gibi karmaşık mühendislik alanlarında uzun süredir gözlenen “öğrenme eğrisi” dinamiğine dayanmaktadır. Bu teoriye göre üretim miktarı arttıkça, standartlaşma, işgücü deneyimi, tedarik zinciri olgunlaşması ve süreç optimizasyonu sayesinde birim üretim maliyetleri azalma eğilimi göstermektedir. SMR teknolojilerine uyarlandığında bu yaklaşım, kümülatif modül üretimi arttıkça birim maliyetlerin düşeceği ve seri üretim yoluyla daha rekabetçi maliyet seviyelerine ulaşabileceği varsayımına dayanmaktadır. OECD NEA'nın (2021) modelleme çalışmaları, 5. SMR modülünden 50. modüle geçildiğinde birim maliyetlerde yaklaşık %30–50 oranında düşüş sağlanabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu maliyet avantajının kendiliğinden ortaya çıkması beklenmemelidir. Standart tasarımların lisanslama süreçlerini tamamlaması, yeterli ve sürekli bir pazar talebinin oluşması, tedarik zincirinin seri üretime uyum sağlaması ve düzenleyici kurumların tekrar eden tasarımlar için öngörülebilir bir değerlendirme çerçevesi geliştirmesi gerekmektedir. Dolayısıyla modüler üretimin ekonomik başarısı yalnızca teknik tasarıma değil, aynı zamanda pazar büyüklüğü, lisanslama kapasitesi ve sanayi altyapısı arasındaki koordinasyona bağlıdır.

Modülerliğin önemli bir diğer boyutu ise kapasite esnekliğidir. Geleneksel büyük ölçekli nükleer santraller genellikle tek seferde yüksek kurulu güçle inşa edilmekte ve bu kapasite uzun yıllar boyunca sabit kalmaktadır. Buna karşılık çok üniteli SMR yaklaşımı, bir tesisin başlangıçta bir veya birkaç modülle işletmeye alınmasına, elektrik talebi arttıkça ilave modüller eklenerek kapasitenin kademeli biçimde büyütülmesine olanak tanımaktadır. Bu yapı, ilk yatırım yükünü azaltmakta, finansman riskini zamana yaymakta ve özellikle talep artışının belirsiz olduğu piyasalarda yatırım kararlarını daha esnek hâle getirmektedir (IAEA, 2020). Bu nedenle SMR'lerin modüler kapasite artışı modeli, küçük elektrik sistemlerine sahip ülkeler, uzak bölgeler, sanayi kümeleri ve hızlı fakat dalgalı talep büyümesi yaşayan ekonomiler açısından stratejik bir avantaj sunmaktadır. Türkiye gibi elektrik talebi artmaya devam eden, ancak talep büyüme hızında

dönemsel belirsizlikler bulunan ülkeler için bu esneklik, SMR teknolojilerinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve planlama açısından da dikkate değer bir seçenek hâline gelmesini sağlamaktadır.

2.3.3 Pasif Güvenlik Sistemleri: Tasarım Felsefesindeki Köklü Değişim

Pasif güvenlik, modern SMR tasarımlarının en kritik ve en tanımlayıcı özelliklerinden birini oluşturmaktadır. Bu özellik yalnızca teknik bir mühendislik tercihi değil, aynı zamanda nükleer enerjiye yönelik toplumsal güven sorununa verilen bilinçli bir tasarım yanıtıdır. Geleneksel büyük ölçekli nükleer güç santrallerinde soğutma ve güvenlik sistemlerinin önemli bir bölümü; pompalar, vanalar, dizel jeneratörler ve harici elektrik güç kaynakları gibi aktif mekanik ve elektriksel bileşenlere dayanmaktadır. Fukushima Daiichi kazasında görüldüğü üzere, harici güç kaynaklarının ve acil durum soğutma sistemlerinin devre dışı kalması, reaktör kalbinin yeterli biçimde soğutulmamasına ve ciddi çekirdek hasarına yol açabilmektedir (IAEA, 2012). Pasif güvenlik felsefesi ise bu kırılganlığı azaltmak amacıyla yerçekimi, doğal sirkülasyon, doğal konveksiyon, termal genleşme ve basınç farkı gibi dış müdahale gerektirmeyen fiziksel mekanizmalardan yararlanmayı hedeflemektedir (IAEA, t.y.).

SMR tasarımlarında pasif güvenlik sistemlerinin mümkün kıldığı en önemli yeniliklerden biri, “müdahalesiz güvenli kalma süresi” ya da literatürdeki karşılığıyla *grace period* kavramıdır. Bu kavram, reaktörün elektrik kesintisi, operatör müdahalesinin gecikmesi veya acil durum koşullarında belirli bir süre boyunca insan müdahalesine gerek duymadan güvenli durumda kalabilmesini ifade etmektedir (IAEA, 2016). Çeşitli SMR tasarım belgelerinde bu sürenin 72 saate kadar uzayabildiği belirtilmektedir (Ingersoll ve Carelli, 2021). Böylece pasif güvenlik sistemleri, kaza senaryolarında operatörlere ve acil müdahale ekiplerine daha geniş bir zaman penceresi sunmakta; özellikle teknik uzmanlığın, altyapının veya acil müdahale kapasitesinin sınırlı olduğu bölgelerde SMR konuşlandırmaları için önemli bir güvenlik gerekçesi oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, pasif güvenlik sistemlerinin mutlak ve sorunsuz bir çözüm olarak değerlendirilmemesi gerekmektedir. Nükleer güvenlik alanındaki eleştirel yaklaşımlar; pasif soğutma kapasitesinin belirli süre ve koşullarla sınırlı olabileceğini, bazı tasarımlarda uzun süreli ısı uzaklaştırma için ek aktif sistemlerin veya harici destek mekanizmalarının gerekli hâle gelebileceğini ve tüm SMR tasarımlarının aynı düzeyde pasif güvenlik güvencesi sunmadığını vurgulamaktadır (Sovacool vd., 2020). Bu nedenle SMR güvenlik iddialarının genel ifadelerle değil, tasarım bazında, bağımsız güvenlik analizleri ve düzenleyici denetim mekanizmaları aracılığıyla doğrulanması kritik önem taşımaktadır. Pasif güvenlik, SMR teknolojilerinin toplumsal kabulünü ve teknik güvenilirliğini güçlendiren önemli bir unsur olmakla birlikte, bu avantajın gerçek değeri ancak şeffaf lisanslama süreçleri, bağımsız denetim ve uzun dönemli işletme deneyimiyle ortaya konulabilecektir.

2.3.4 İnşaat Süreleri: Modülerliğin Zaman Ekonomisi

İnşaat süresindeki potansiyel kısalma, SMR’lerin ekonomik rekabetçiliği açısından maliyet düşüşü kadar belirleyici bir faktördür. Büyük ölçekli nükleer santrallerin inşaatında karşılaşılan sistematik gecikmeler, uzun yıllardır nükleer sektörün en önemli yapısal sorunlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Grubler’in (2010) Fransız nükleer programını inceleyen çalışması, birbiri

ardına inşa edilen reaktörler arasında maliyet ve inşaat süresinin azalmak yerine arttığını ortaya koymakta ve bu durumu “anti-öğrenme eğrisi” olarak nitelendirmektedir. Hinkley Point C ve Flamanville 3 gibi Avrupa’daki güncel büyük ölçekli nükleer projeler de başlangıçta öngörülen süre ve maliyet hedeflerinin önemli ölçüde aşılması nedeniyle bu sorunun hâlen geçerliliğini koruduğunu göstermektedir (Schneider ve Froggatt, 2025).

SMR tasarımlarının hedeflediği yaklaşık 3–7 yıllık inşaat süresi, yalnızca zamansal bir kazanım değil, aynı zamanda enerji planlaması açısından daha esnek bir yatırım mantığını ifade etmektedir. Geleneksel büyük nükleer santrallerde yatırım kararları çoğu zaman 7–10 yılı aşan uzun planlama ve inşaat döngülerine bağlıken, SMR’lerin daha kısa sürede devreye alınabilme potansiyeli enerji arz planlamasında daha dinamik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu durum, talep artışındaki belirsizliklere daha uyumlu yanıt verilmesini, finansman maliyetlerinin azaltılmasını ve yatırım kararları için gerekli öngörülebilirlik eşliğinin düşmesini mümkün kılabilir. Dolayısıyla modüler üretimin yarattığı “zaman ekonomisi”, SMR’lerin büyük ölçekli nükleer santrallere kıyasla en önemli pratik avantajlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, hedeflenen kısa inşaat sürelerinin henüz tüm SMR tasarımları için ticari ölçekte yeterince doğrulanmadığını belirtmek gerekir. İlk ticari projelerde lisanslama süreçleri, tedarik zinciri hazırlığı, saha altyapısı, yerel düzenleyici gereklilikler ve ilk uygulamalara özgü mühendislik öğrenme süreçleri nedeniyle gecikmeler yaşanması mümkündür. Bu nedenle SMR’lerin zaman avantajı, teorik tasarım hedeflerinden çok, ilk ticari projelerin gerçek saha performansı ile değerlendirilebilecektir. Ancak bu belirsizliğe rağmen, inşaat süresinin kısaltılması hedefi SMR teknolojilerinin hem ekonomik fizibilitesi hem de enerji sistemi planlamasındaki stratejik değeri açısından merkezi bir unsur olmaya devam etmektedir.

2.3.5 Yakıt Yapıları ve Döngü Stratejileri

SMR ailesinin teknolojik çeşitliliği, yakıt yapıları ve yakıt döngüsü stratejileri bakımından da belirgin biçimde kendini göstermektedir. Mevcut SMR tasarımlarının önemli bir bölümü, olgunlaşmış tedarik zinciri ve mevcut lisanslama deneyimi nedeniyle düşük zenginleştirilmiş uranyumu (%3–5 U-235, LEU) yakıt olarak kullanmaktadır (NRC, 2025; WNA, 2025). LEU, ticari hafif su reaktörlerinde standart yakıt formu olarak uzun süredir kullanılmakta olup mevcut yakıt üretim ve regülasyon altyapısıyla uyumludur (NRC, 2025).

Hafif su reaktörü teknolojisine dayanan NuScale VOYGR ve GE-Hitachi BWRX-300 tasarımları, LEU yakıt kullanımına dayalı SMR yaklaşımının önde gelen örnekleri arasında yer almaktadır (WNA, 2025). Bu tasarımlarda LEU kullanımı, mevcut ticari nükleer yakıt döngüsüne entegrasyonu kolaylaştırmakta ve düzenleyici kurumlar açısından daha öngörülebilir bir lisanslama zemini sunmaktadır (OECD NEA, 2024; NRC, 2025).

LEU kullanımının en temel avantajı, mevcut endüstriyel yakıt üretim altyapısıyla uyumlu olmasıdır. NRC’nin güncel değerlendirmelerine göre 5% ve altı zenginleştirilmiş yakıtlar, hem üretim hem de lisanslama açısından “well-established regulatory framework” kapsamında değerlendirilmektedir (NRC, 2025). Bu durum, SMR’lerin erken ticarileşme sürecinde LEU tabanlı tasarımların daha hızlı ölçeklenebilmesine imkân tanımaktadır. Buna karşılık ileri nesil SMR tasarımlarının önemli bir kısmı, yüksek yoğunluklu düşük zenginleştirilmiş uranyum olarak tanımlanan HALEU yakıtına (%5–20 U-235) ihtiyaç duymaktadır. Kairos Power’ın KP-FHR tasarımı, TerraPower’ın Natrium reaktörü ve bazı erimiş tuz reaktörü konseptleri bu kategoriye

örnek gösterilebilir. HALEU yakıtı; daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun yakıt çevrimi, daha kompakt reaktör kalbi ve bazı tasarımlarda daha yüksek yanma oranı gibi teknik avantajlar sunmaktadır. Ancak bu avantajlara rağmen HALEU tedariki, SMR teknolojilerinin yaygınlaşması açısından kritik bir darboğaz oluşturmaktadır. Ticari ölçekte üretim kapasitesinin sınırlı olması, zenginleştirme altyapısının az sayıda ülkede yoğunlaşması, Rusya'ya yönelik yaptırımlar sonrasında nükleer yakıt tedarik güvenliği kaygılarının artması ve daha yüksek zenginleştirme seviyesinin nükleer güvence-denetim süreçlerini daha hassas hâle getirmesi, HALEU'yu yalnızca teknik değil aynı zamanda stratejik bir mesele hâline getirmektedir (Bunn vd., 2024).

Toryum bazlı yakıt döngüleri de SMR literatüründe dikkat çeken alternatiflerden biridir. Hindistan'ın AHWR-300 LEU tasarımı ve bazı erimiş tuz reaktörü konseptleri, toryum kullanımını yakıt döngüsü stratejisinin bir parçası olarak değerlendirmektedir (Amatullah vd., 2024). Toryumun başlıca avantajları; doğada uranyuma kıyasla daha yaygın bulunması, uzun vadeli enerji potansiyeli sunması ve bazı tasarım kombinasyonlarında daha az uzun ömürlü aktinit atığı üretme olasılığıdır (IAEA, 2024; WNA, 2025). Bununla birlikte toryum doğrudan bölünebilir bir yakıt değil, üretken (fertile) bir malzemedir; reaktör içinde nötron yakalayarak U-233'e dönüşmesi gerekir (OECD-NEA, 2024).

Bu nedenle toryum yakıt döngüsü, yakıt üretimi, yeniden işleme, malzeme davranışı ve lisanslama açısından LEU temelli mevcut yakıt döngülerine kıyasla daha karmaşık ve daha düşük olgunluk seviyesine sahiptir (IAEA, 2024; OECD-NEA, 2024). IAEA'nın güncel değerlendirmelerine göre toryum yakıt çevrimi, özellikle yeniden işleme ve yakıt geri kazanım teknolojilerinin henüz ticari ölçekte yaygınlaşmamış olması nedeniyle "advanced but non-mature fuel cycle option" olarak sınıflandırılmaktadır (IAEA, 2024). Dolayısıyla toryum bazlı SMR konseptleri uzun vadeli bir potansiyel taşımakla birlikte, yakın ve orta vadede ticari SMR pazarının ana belirleyicisinin LEU ve özellikle HALEU tedarik kapasitesi olması beklenmektedir (Ingersoll ve Carelli, 2021)

3. DÜNYADA SMR TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ: ÜLKE STRATEJİLERİ VE ÖNCÜ TASARIMLAR

Küresel SMR geliştirme ekosistemi, 2020'lerin ortası itibarıyla 70'i aşkın aktif tasarımın farklı teknolojik olgunluk düzeylerinde ilerlediği, çok aktörlü ve rekabetçi bir alan hâline gelmiştir. Bu ekosistemde ABD, Rusya ve Çin öne çıkan başlıca aktörler olmakla birlikte; Kanada, Birleşik Krallık, Fransa, Güney Kore ve Japonya gibi ülkeler de SMR teknolojilerine yönelik belirgin politika, finansman ve lisanslama stratejileri geliştirmektedir (IAEA, 2023a; WNA, 2025).

3.1 Amerika Birleşik Devletleri

3.1.1 Politika Çerçevesi ve Kurumsal Yapılanma

Amerikan SMR politikasını anlamak için öncelikle ABD nükleer endüstrisinin içinde bulunduğu tarihsel paradoksu kavramak gerekmektedir. ABD, ticari nükleer enerji teknolojilerinin gelişiminde öncü ülkelerden biri olmuş ve uzun yıllar boyunca küresel nükleer kapasitenin en büyük paydaşları arasında yer almıştır (IEA, 2024). Bununla birlikte 1990'lardan 2020'lere kadar yeni büyük ölçekli reaktör inşalarının sınırlı kalması, Westinghouse Electric Company'nin ABD operasyonlarının 2017 yılında Chapter 11 iflas korumasına başvurması ve Vogtle 3–4 projelerinin ciddi gecikmeler ve maliyet artışları sonrasında tamamlanabilmesi, Amerikan nükleer endüstrisinin tarihsel liderliğinin aşındığını göstermektedir (EIA, 2024; WNA, 2025). Bu bağlamda SMR ve ileri reaktör teknolojileri, ABD politika yapıcılarının açısından yalnızca iklim hedeflerine ulaşmak için değil, aynı zamanda Çin ve Rusya'nın küresel nükleer ihracat pazarındaki etkisini dengelemek ve ABD nükleer sanayisini yeniden rekabetçi bir zemine taşımak için stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir (OECD-NEA, 2024; IEA, 2024).

Bu stratejik motivasyon, ABD Enerji Bakanlığı'nın son yıllarda SMR ve ileri reaktör programlarına yönelttiği kamu desteklerinde açık biçimde görülmektedir. 2020 yılında başlatılan İleri Reaktör Gösterimi Programı (Advanced Reactor Demonstration Program — ARDP) kapsamında TerraPower'ın sodyum soğutmalı Natrium reaktörü ile X-energy'nin yüksek sıcaklık gaz soğutmalı Xe-100 reaktörü öncelikli gösterim projeleri olarak seçilmiştir (U.S. Department of Energy, 2024). Programın ilk aşamasında bu iki proje için toplam 160 milyon dolarlık başlangıç desteği sağlanmış; daha geniş maliyet paylaşımı çerçevesinde federal desteğin yıllar içinde milyar dolar ölçeğine ulaşması hedeflenmiştir (DOE, 2024). Böylece ABD, ilk ticari ileri reaktör uygulamalarında özel sektör riskini azaltmayı, yerli tedarik zincirini güçlendirmeyi ve Amerikan teknoloji geliştiricilerini küresel pazara hazırlamayı amaçlamaktadır (IEA, 2024).

Mali teşvikler de Amerikan SMR stratejisinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. 2022 tarihli Enflasyon Düşürme Yasası (Inflation Reduction Act—IRA), mevcut nükleer santraller için sıfır emisyonlu nükleer üretim vergi kredileri sağlarken, yeni temiz enerji yatırımları için üretim ve yatırım vergi kredileri yoluyla ileri nükleer projelerin finansman koşullarını iyileştirmektedir (U.S. Congress, 2022; IEA, 2024). Bu düzenlemeler, SMR ve ileri reaktör projelerinin yalnızca kamu hibelerine değil, özel sermaye, enerji şirketleri ve teknoloji geliştiricileriyle kurulacak uzun vadeli ticari ortaklıklara da dayanmasını mümkün kılmaktadır.

Düzenleyici alanda ise ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu'nun ileri reaktör teknolojilerine uygun daha esnek ve risk odaklı bir lisanslama çerçevesi geliştirme çabası dikkat çekmektedir.

2024 tarihli ADVANCE Act, ileri nükleer teknolojilerin lisanslanması ve ticarileştirilmesi sürecinde NRC'nin daha etkin, öngörülebilir ve teknolojiye duyarlı bir yaklaşım benimsemesini teşvik etmiştir (U.S. Congress, 2024). Bu çerçevede geliştirilen Part 53 düzenleme çalışmaları, geleneksel hafif su reaktörü merkezli lisanslama yapısının ötesine geçerek risk bilgisine dayalı, performans odaklı ve teknoloji-kapsayıcı bir lisanslama yolunun oluşturulmasını amaçlamaktadır (NRC, 2025). Bu gelişmeler, ABD'nin SMR politikasında yalnızca teknoloji geliştirmeye değil, aynı zamanda lisanslama hızını, yatırım güvenini, yakıt ve tedarik zinciri kapasitesini ve ihracat potansiyelini artırmaya yönelik bütüncül bir strateji izlediğini göstermektedir (OECD-NEA, 2024; IEA, 2024).

3.1.2 Piyasa Yapısı ve Girişimci Dinamikler

ABD SMR ekosistemi, Rusya ve Çin gibi devlet merkezli nükleer kalkınma modellerinden belirgin biçimde ayrılan, özel sektör girişimciliği, kamu destekleri, risk sermayesi ve kurumsal enerji talebinin birlikte şekillendirdiği dinamik bir piyasa yapısına sahiptir. NuScale Power, GE-Hitachi Nuclear Energy, Kairos Power, TerraPower, X-energy, Terrestrial Energy USA, Oklo ve Holtec International gibi firmalar; farklı reaktör teknolojileri, yakıt tercihleri ve ticarileşme stratejileriyle ABD ileri nükleer ekosisteminin başlıca aktörleri arasında yer almaktadır. Bu çeşitlilik, teknolojik riskin farklı tasarımlar arasında dağılması açısından önemli bir avantaj sağlamakla birlikte, piyasanın sınırlı sayıda standart tasarım etrafında konsolide olmasını geciktirmekte ve her firmanın kendi lisanslama, tedarik zinciri ve ilk müşteri edinme sürecini ayrı ayrı yürütmesini gerektirmektedir (Lovering vd., 2023).

ABD pazarında SMR ve ileri nükleer teknolojilere yönelik talebin şekillenmesinde iki unsur öne çıkmaktadır: kamu hizmeti şirketlerinin karbonsuzlaşma taahhütleri ve teknoloji şirketlerinin veri merkezleri için kesintisiz, düşük karbonlu elektrik arayışı. Özellikle yapay zekâ ve bulut bilişim altyapılarının hızla büyümesi, 7/24 güvenilir ve karbonsuz elektrik kaynaklarına duyulan ihtiyacı artırmış; bu durum nükleer enerjiyi teknoloji şirketleri açısından yeniden stratejik bir seçenek hâline getirmiştir (Bellan, 2024). Microsoft'un Constellation Energy ile Three Mile Island Unit 1'in Crane Clean Energy Center adıyla yeniden devreye alınmasına yönelik 20 yıllık güç satın alma anlaşması, doğrudan bir SMR projesi olmamakla birlikte, büyük teknoloji şirketlerinin nükleer enerjiyi kurumsal enerji tedarik stratejilerine dâhil etmeye başladığını göstermesi bakımından önemlidir (Constellation Energy, 2024).

Benzer biçimde Google'ın Kairos Power ile yaptığı anlaşma, kurumsal alıcıların yalnızca mevcut nükleer kapasiteye değil, yeni nesil SMR teknolojilerinin ticarileştirilmesine de talep sinyali verdiğini göstermektedir (Google, 2024; Kairos Power, 2024). Anlaşma kapsamında Kairos Power'ın ilk reaktörünü 2030'a kadar devreye alması, ilave reaktörlerin ise 2035'e kadar kademeli biçimde konuşlandırılması ve toplamda 500 MWe'ye kadar karbon-suz elektrik kapasitesi sağlanması hedeflenmektedir (Kairos Power, 2024). Amazon'un X-energy'ye yaptığı yatırım ve Energy Northwest ile desteklediği SMR projesi de bu eğilimi güçlendirmektedir (Amazon, 2023; X-energy, 2023). İlk aşamada yaklaşık 320 MWe kapasite hedefleyen bu modelin daha sonra 960 MWe'ye kadar genişletilebilmesi, SMR'lerin kademeli kapasite artışı mantığının teknoloji şirketleri açısından neden cazip görüldüğünü ortaya koymaktadır (Energy Northwest, 2024). Meta'nın 1–4 GWe aralığında yeni nükleer kapasite için proje geliştirici çağrısı yayımlaması ise kurumsal talebin yalnızca tekil anlaşmalardan ibaret olmadığını, daha geniş bir piyasa dönüşümüne işaret

ettiğini göstermektedir (Meta, 2024). Ayrıca bu gelişmeler, veri merkezlerinin büyümesiyle birlikte nükleer enerjinin yeniden stratejik bir tedarik kaynağı haline geldiğini ortaya koymaktadır (International Energy Agency [IEA], 2025).

Bu gelişmeler birlikte değerlendirildiğinde, ABD’de SMR piyasasının yalnızca kamu destekli bir teknoloji geliştirme alanı olmadığı; aynı zamanda veri merkezleri, sanayi tesisleri ve büyük kurumsal alıcılar tarafından şekillendirilen yeni bir elektrik tedarik piyasasının parçası hâline geldiği görülmektedir. Kurumsal güç satın alma anlaşmaları, ilk ticari projeler için maliyet keşfini hızlandırma, gelir öngörülebilirliği sağlama ve özel finansmanı kolaylaştırma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte bu piyasa dinamiğinin kalıcı bir ticarileşme başarısına dönüşebilmesi; lisanslama süreçlerinin zamanında tamamlanmasına, ilk projelerin bütçe ve takvim hedeflerine yaklaşabilmesine, HALEU ve gelişmiş yakıt tedarik zincirlerinin kurulmasına ve kurumsal talebin uzun vadeli sözleşmelere dönüşmesine bağlıdır.

3.2 Rusya Federasyonu

Rusya’nın SMR alanındaki konumu, büyük ölçüde Rosatom’un uzun yıllara dayanan küçük ölçekli deniz reaktörü deneyimine ve yüzer nükleer güç santrali işletme kapasitesine dayanmaktadır. Bu açıdan Rusya, SMR tartışmalarında yalnızca kavramsal tasarımlar veya lisanslama süreçleri üzerinden değil, sahada işletilen bir uygulama üzerinden konuşabilen az sayıdaki aktörden biridir. Akademik Lomonosov yüzer nükleer güç santralinin Çukotka Özerk Bölgesi’ndeki Pevek kentinde ticari işletmeye alınması, Rusya’nın uzak ve zorlu coğrafyalarda küçük ölçekli nükleer enerji çözümleri geliştirme stratejisinin en somut örneğini oluşturmaktadır. İki adet KLT-40S basınçlı su reaktörüne sahip olan bu tesis, elektrik üretiminin yanı sıra bölgesel ısıtma ihtiyacının karşılanmasında da kullanılmakta ve Arktik koşullarda nükleer enerjinin lojistik avantajlarını göstermektedir (Rosatom, 2020; WNN, 2025). Bununla birlikte Akademik Lomonosov deneyiminin doğrudan RITM-200 teknolojisinin sahada kanıtı olarak sunulmaması gerekir. RITM-200 ailesi, Rusya’nın yeni nesil nükleer buzkıranlarında kullanılan ve Rosatom’un kara konuşlu ve yeni nesil yüzer SMR projeleri için uyarlamayı hedeflediği ayrı bir reaktör hattıdır (IAEA, 2020; Rosatom, 2021). Bu nedenle Rusya’nın SMR avantajı iki katmanlı biçimde değerlendirilebilir: Birincisi, KLT-40S tabanlı Akademik Lomonosov aracılığıyla yüzer nükleer güç santrali işletme deneyimi kazanmış olması; ikincisi ise RITM-200N gibi türevlerle bu deniz reaktörü deneyimini kara konuşlu küçük modüler santral projelerine taşımaya çalışmasıdır (World Nuclear Association, 2024).

Rosatom’un SMR stratejisi, iç piyasa ihtiyaçları ile ihracat hedeflerini birleştiren bütüncül bir yaklaşıma sahiptir. İç piyasada öncelikli hedef, Arktik bölgeler, uzak yerleşimler ve madencilik sahaları gibi merkezi şebekeden uzak alanların enerji güvenliğini sağlamaktır (IAEA, 2020; World Nuclear Association, 2024). Bu bölgelerde dizel yakıt tedarikinin yüksek lojistik maliyetleri ve iklim koşullarına bağlı kırılganlığı, küçük ölçekli nükleer çözümleri stratejik açıdan cazip hâle getirmektedir (World Nuclear Association, 2024). Özellikle Yakutistan’daki Ust-Kuyga sahasında planlanan RITM-200N tabanlı kara konuşlu SMR projesi, Rosatom’un bu alandaki en somut yeni uygulamalarından biri olarak öne çıkmaktadır (Rosatom, 2023). Projenin başarılı olması durumunda Rusya, yalnızca yüzer nükleer santral deneyimini değil, kara konuşlu SMR işletme modelini de ihracata konu edilebilir bir referans hâline getirmeyi hedeflemektedir (IAEA, 2022; Rosatom, 2023).

Rosatom'un geliştirme portföyünde RITM-200N, yeni nesil yüzer güç üniteleri için RITM serisi türevler, düşük güçlü SHELF-M konsepti ve farklı hızlı reaktör yaklaşımları yer almaktadır (IAEA, 2020; World Nuclear Association, 2024). Ancak bu tasarımların olgunluk düzeyleri birbirinden farklıdır. RITM-200N, kısa ve orta vadede Rus SMR stratejisinin merkezinde yer alırken; SHELF-M gibi daha küçük kapasiteli tasarımlar daha niş ve uzun vadeli uygulamalara yöneliktir (Rosatom, 2023). SVBR-100 gibi kurşun-bizmut soğutmalı hızlı reaktör konseptleri ise teknik açıdan dikkat çekici olmakla birlikte, aktif ticarileşme hattında RITM serisi kadar güçlü bir konuma sahip değildir (OECD-NEA, 2022). Bu nedenle Rusya'nın SMR stratejisinin temel omurgasını, Arktik deneyim, yüzer nükleer santral işletmeciliği, RITM serisi reaktörlerin kara ve deniz uygulamalarına uyarlanması ve Rosatom'un devlet destekli entegre ihracat modeli oluşturmaktadır (IAEA, 2022; World Nuclear Association, 2024).

3.3 Çin Halk Cumhuriyeti

Çin'in nükleer enerji politikası; iklim taahhütleri, enerji güvenliği öncelikleri ve teknolojik liderlik hedeflerinin kesiştiği noktada şekillenmektedir. 2024 yılı sonu itibarıyla işletmede, inşaat halinde veya onaylanmış toplam 102 reaktör ve yaklaşık 113 milyon kilovatlık kurulu kapasite portföyüyle Çin, yürütülen inşaatlar ve yeni proje onayları dikkate alındığında küresel nükleer liderlik yarışında hızla öne çıkmaktadır (WNA, 2025). 2025 yılında 10 ek reaktörün daha onaylanmış olması, bu ivmenin yalnızca mevcut projelerle sınırlı kalmadığını ve Çin'in nükleer genişleme programını uzun vadeli bir sanayi politikası olarak sürdürdüğünü göstermektedir. Çin hükümetinin 2035 yılına kadar kurulu nükleer kapasitenin 150 GWe'yi aşmasını, 2050'ye kadar ise çok daha yüksek bir kapasite düzeyine ulaşmasını hedeflemesi, nükleer enerjinin ülkenin düşük karbonlu enerji dönüşümünde merkezi bir rol üstleneceğine işaret etmektedir.

Çin'in SMR alanındaki en somut girişimi, Hainan Adası'ndaki Changjiang sahasında inşa edilen ACP100 Linglong One projesidir. ACP100, kara konuşlu ticari SMR uygulamaları açısından dünyadaki en dikkat çekici projelerden biri olup, Çin'in "olgunlaşmış reaktör teknolojisi mirasını modüler ölçeğe uyarlama" stratejisinin somut bir ürünü olarak değerlendirilmektedir. 125 MWe sınıfındaki bu entegre basınçlı su reaktörü, büyük ölçekli Çin nükleer programlarından edinilen mühendislik, tedarik zinciri ve lisanslama deneyiminin daha küçük ve modüler bir tasarıma aktarılmasını amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, tamamen yeni ve yüksek teknoloji riski taşıyan tasarımlar yerine, bilinen hafif su reaktörü prensiplerinden hareketle daha öngörülebilir bir ticarileşme yolu sunmaktadır (CNNC, 2023). Bununla birlikte ACP100'ün 2023 yılında ticari işletmeye girdiğini söylemek doğru değildir. Projede 2023 yılı, ana iç yapıların tamamlanması ve reaktör modülü montajı gibi kritik inşaat aşamalarının gerçekleştirildiği bir dönem olmuştur. 2024 ve 2025 yıllarında ise dış koruma kubbesinin yerleştirilmesi, ana ekipman montajları ve soğuk testler gibi işletme öncesi süreçler ilerlemiştir. Bu nedenle Linglong One, Çin'in kara konuşlu SMR ticarileşmesi açısından en ileri projelerinden biri olmakla birlikte, ticari işletme başarısı henüz nihai saha performansıyla doğrulanması gereken bir aşamadadır (CNNC, 2023; WNA, 2025).

Çin'in SMR stratejisi, yalnızca tekil bir reaktör tasarımının geliştirilmesine değil, nükleer sanayi altyapısının seri üretim mantığına uyarlanmasına dayanmaktadır. Büyük ölçekli reaktör programlarında edinilen yerli tedarik zinciri kapasitesi, mühendislik standardizasyonu ve devlet destekli proje finansmanı, Çin'e SMR alanında önemli bir ölçek avantajı sağlayabilir. Bu nedenle

Çin'in SMR yaklaşımı, ABD'deki girişimci ve çok tasarımlı piyasa modelinden farklı olarak, devlet yönlendirmeli sanayi politikası, standart tasarım tekrarı ve hızlı konuşlandırma hedefleri üzerine kuruludur. Bu yapı, başarılı olması hâlinde Çin'i yalnızca iç pazarda değil, gelişmekte olan ülkelerdeki küçük ve orta ölçekli nükleer enerji çözümleri için de güçlü bir tedarikçi konumuna taşıyabilir.

3.4 Kanada

Kanada, CANDU ağır su reaktörü teknolojisiyle küresel nükleer enerji tarihinde özgün bir konum edinmiş; ancak son on yıllarda büyük ölçekli yeni nükleer yatırım konusunda görece durağan bir dönem yaşamıştır (World Nuclear Association, 2024). Buna karşılık SMR alanında Kanada, teknolojiyi yalnızca doğrudan geliştiren değil, aynı zamanda düzenleyici çerçeveyi öncü biçimde hazırlayarak uluslararası geliştiricileri kendi lisanslama ekosistemine çeken bir strateji izlemektedir (OECD-NEA, 2023; IAEA, 2022). Kanada Nükleer Güvenlik Komisyonu'nun (CNSC) 2016'dan itibaren uygulamaya koyduğu "Lisans Öncesi Vendor Design Review" (VDR) süreci, reaktör geliştiricilerine resmi lisans başvurusu öncesinde tasarımlarının Kanada düzenleyici gereklilikleriyle uyumunu değerlendirme olanağı sunmaktadır (CNSC, 2022). Bu mekanizma, ABD NRC lisanslama süreciyle karşılaştırıldığında daha erken aşamada düzenleyici geri bildirim sağlaması ve geliştiricilere öngörülebilir bir yol haritası sunması bakımından Kanada'yı SMR alanında önemli bir lisanslama merkezi hâline getirmiştir (CNSC, 2022). Bu çerçeve kapsamında GE-Hitachi BWRX-300, Terrestrial Energy IMSR, ARC-100, Moltex Energy SSR-W300, Holtec SMR-160, X-energy Xe-100 ve NuScale gibi farklı tasarımlar Kanada lisanslama ve ön değerlendirme süreçlerinde çeşitli aşamalara ulaşmıştır (OECD-NEA, 2023; CNSC, 2022).

Kanada'nın SMR gündemindeki en kritik gelişme, Ontario Power Generation (OPG) ile GE-Hitachi Nuclear Energy arasındaki stratejik ortaklıktır. OPG, Darlington New Nuclear Project kapsamında BWRX-300 tasarımını seçerek Kanada'yı Batı dünyasında SMR konuşlandırma sürecinin en ileri sahalarından biri hâline getirmiştir. Darlington sahasında önce saha hazırlık izinleri alınmış, ardından CNSC tarafından 2025 yılında bir BWRX-300 reaktörünün inşası için lisans verilmiştir. Bu gelişme, Kanada'nın yalnızca düzenleyici hazırlık yapan bir ülke olmaktan çıkarak, SMR teknolojisinin gerçek saha uygulamasına geçen öncü ülkelerden biri hâline geldiğini göstermektedir (OPG, 2024; CNSC, 2025).

OPG'nin Darlington sahasında başlangıçta bir BWRX-300 ünitesi kurmayı, daha sonra toplam dört üniteye kadar genişlemeyi hedeflemesi, Kanada SMR stratejisinin kademeli kapasite artışı mantığıyla uyumlu olduğunu göstermektedir (OPG, 2023; CNSC, 2022). Bu model, hem ilk yatırım riskini sınırlamakta hem de ilk ünitelerden elde edilecek lisanslama, inşaat ve işletme deneyiminin sonraki ünitelerde maliyet ve süre avantajına dönüştürülmesini amaçlamaktadır (OECD-NEA, 2023). Bu yönüyle Darlington projesi, yalnızca Kanada için değil, BWRX-300 tasarımının küresel ticarileşme potansiyeli açısından da kritik bir referans proje niteliği taşımaktadır (World Nuclear Association, 2024).

Kanada'daki SMR ilgisi yalnızca Ontario ile sınırlı değildir. Saskatchewan, kömürden çıkış ve düşük karbonlu baz yük ihtiyacı doğrultusunda BWRX-300 seçeneğini değerlendirmekte; New Brunswick ise ARC-100 ve Moltex Energy gibi ileri reaktör tasarımları üzerinden bölgesel bir

SMR inovasyon merkezi oluşturmaya hedeflemektedir (Government of Saskatchewan, 2023; Government of New Brunswick, 2023). Bu eyalet temelli çeşitlilik, Kanada'daki SMR gündeminin tek bir operatör ya da tek bir teknolojiyle sınırlı kalmadığını, aksine farklı bölgesel enerji ihtiyaçlarına göre şekillenen çok merkezli bir stratejiye dönüştüğünü göstermektedir (IAEA, 2022). Düzenleyici çerçeveyi erken hazırlayan Kanada modeli ile SMR'yi kapsamlı bir sanayi politikası ve ihracat stratejisinin merkezine yerleştiren Birleşik Krallık yaklaşımı arasında bu nedenle dikkat çekici bir tamamlayıcılık bulunmaktadır (OECD-NEA, 2023).

3.5 Birleşik Krallık

Birleşik Krallık'ın SMR stratejisi, yalnızca enerji arz güvenliği veya iklim politikası çerçevesinde değil, aynı zamanda ülkenin sanayi politikası, bölgesel kalkınma hedefleri, Brexit sonrası teknoloji özerkliği arayışı ve 2050 net sıfır taahhüdü bağlamında değerlendirilmelidir. Bu yaklaşımda SMR teknolojileri; düşük karbonlu elektrik üretiminin artırılması, yerli nükleer tedarik zincirinin yeniden canlandırılması, yüksek nitelikli mühendislik istihdamının korunması ve özellikle Kuzey İngiltere ile Galler gibi sanayi bölgelerinde yeni ekonomik kümelenmeler oluşturulması açısından stratejik bir araç olarak görülmektedir. Dolayısıyla Birleşik Krallık modeli, SMR'yi yalnızca bir reaktör teknolojisi olarak değil, uzun vadeli bir endüstriyel dönüşüm programının merkezinde konumlandırmaktadır (UK Government, 2024).

Bu stratejinin merkezinde Rolls-Royce SMR konsorsiyumunun geliştirdiği yaklaşık 470 MWe kapasiteli tasarım yer almaktadır. Söz konusu tasarım, SMR terminolojisinin üst sınırına oldukça yakın bir güç seviyesine sahip olduğundan, kavramsal sınıflandırma tartışmalarının da merkezinde bulunmaktadır. Bununla birlikte Rolls-Royce SMR'nin asıl önemi, reaktörün yalnızca teknik özelliklerinden değil, fabrika üretimine dayalı standart tasarım tekrarı, yerli tedarik zinciri oluşturma ve seri konuşlandırma hedeflerinden kaynaklanmaktadır. Bu yaklaşım, İngiltere'nin havacılık, savunma ve ileri imalat alanlarındaki mühendislik birikimini sivil nükleer enerji alanına aktarma çabası olarak okunabilir. Özellikle Sheffield, Leeds, Derby ve Kuzey İngiltere eksenindeki sanayi bölgeleriyle kurulan bağlantı, SMR programının bölgesel kalkınma ve yüksek katma değerli istihdam hedefleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir (UK Government, 2024).

Birleşik Krallık'ın SMR politikasında kurumsal yapılanmanın merkezinde başlangıçta Great British Nuclear (GBN) yer almış, daha sonra bu yapı kamu destekli nükleer kapasite geliştirme mekanizmasının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Department for Energy Security and Net Zero [DESNZ], 2024). GBN tarafından yürütülen SMR teknoloji seçim süreci, Rolls-Royce SMR'nin tercih edilen teknoloji ortağı olarak belirlenmesiyle somut bir aşamaya ulaşmıştır (Great British Nuclear, 2024; Rolls-Royce SMR, 2024). 2026 yılında Great British Energy – Nuclear ile Rolls-Royce SMR arasında imzalanan sözleşme, Birleşik Krallık'ın ilk SMR filosunun geliştirilmesine yönelik kurumsal ve finansal çerçevenin oluşmaya başladığını göstermektedir. Bu kapsamda başlangıçta üç Rolls-Royce SMR ünitesinin geliştirilmesi hedeflenmekte; daha sonraki aşamalarda bu deneyimin hem iç pazarda yeni projelere hem de ihracat potansiyeline temel oluşturması amaçlanmaktadır (UK Government, 2025; UK Government, 2026).

Düzenleyici süreçler açısından da Rolls-Royce SMR tasarımı Birleşik Krallık'ta önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Tasarımın Generic Design Assessment (GDA) sürecinde ilerlemesi, İngiliz

düzenleyici kurumlarının SMR teknolojilerini mevcut nükleer lisanslama çerçevesine entegre etme kapasitesini göstermektedir. GDA süreci yalnızca teknik güvenlik değerlendirmesi açısından değil, aynı zamanda tasarımın ileride iç ve dış pazarlarda güvenilir bir referans teknoloji olarak sunulması açısından da önem taşımaktadır. Bu nedenle Birleşik Krallık'ın SMR stratejisi; teknoloji seçimi, kamu finansmanı, düzenleyici hazırlık ve sanayi politikası unsurlarının birlikte yürütüldüğü bütünlük bir model niteliğindedir.

Bununla birlikte Birleşik Krallık modelinin de belirsizlikleri bulunmaktadır. Rolls-Royce SMR tasarımının yüksek güç kapasitesi, onu bazı klasik SMR tanımlarının sınırına yaklaştırmakta; ilk projelerin maliyet, takvim ve lisanslama performansı henüz ticari ölçekte doğrulanmayı beklemektedir. Ayrıca seri üretim yaklaşımının gerçek maliyet avantajı yaratabilmesi, yalnızca ilk reaktörün inşa edilmesine değil, aynı tasarımın çok sayıda üniteye tekrarlanmasına bağlıdır. Bu nedenle Birleşik Krallık'ın SMR programı, başarılı olması hâlinde ülkeye hem düşük karbonlu baz yük kapasitesi hem de ihracata dönük yeni bir nükleer sanayi alanı kazandırabilir; ancak bu başarı, kamu desteğinin sürekliliği, düzenleyici süreçlerin zamanında tamamlanması, tedarik zincirinin ölçeklenmesi ve ilk projelerin saha performansına bağlı olacaktır.

3.6 Fransa

Fransa, elektrik üretiminin büyük bölümünü nükleer enerjiden karşılayan ve bu yönüyle küresel ölçekte nükleer enerji alanında en gelişmiş ülkelerden biri olarak SMR tartışmalarında özel bir yere sahiptir. Fransız nükleer ekosisteminin onlarca yıllık birikimi; nükleer bilgi tabanı, tedarik zinciri olgunluğu, işletme deneyimi ve düzenleyici uzmanlık açısından son derece güçlüdür. Ancak tam da bu birikim, Fransa'nın uzun süre büyük ölçekli reaktör teknolojilerine, özellikle de EPR ve EPR2 programlarına stratejik ağırlık vermesine yol açmış; SMR geliştirme sürecinin ABD, Kanada ve Birleşik Krallık gibi aktörlere kıyasla görece daha geç ivme kazanmasına neden olmuştur (EDF, 2023).

Fransa'nın SMR alanındaki başlıca girişimi, EDF öncülüğünde geliştirilen NUWARD programıdır. İlk aşamada NUWARD, Avrupa şebeke koşullarına uygun, hafif su reaktörü teknolojisine dayalı ve modüler üretim mantığıyla geliştirilen bir SMR konsepti olarak konumlandırılmıştır. Fransız yaklaşımının temel özelliği, tamamen radikal bir teknoloji sıçramasından ziyade, mevcut nükleer mühendislik birikimini daha küçük, standartlaştırılmış ve potansiyel olarak seri üretilebilir bir reaktör tasarımına aktarma çabasıdır. Bu yönüyle NUWARD, Fransa'nın EPR geleneğinden kopuşunu değil, bu geleneği daha esnek ve ihracata uygun bir ölçekte yeniden yorumlama girişimini temsil etmektedir (EDF, 2023).

Bununla birlikte NUWARD programı, Fransa'nın SMR stratejisindeki çelişkileri de görünür kılmaktadır. EDF, 2024 yılında özgün NUWARD tasarım stratejisinde değişikliğe giderek daha sade, teknik olarak daha az riskli ve kanıtlanmış teknolojilere dayalı bir tasarım yönelimine geçmiştir (EDF, 2024; OECD-NEA, 2023). Bu revizyon, bir yandan Fransız SMR programının piyasa beklentilerine ve ticarileşme baskılarına uyum sağlama çabasını gösterirken, diğer yandan Fransa'nın ilk SMR konseptinde teknik karmaşıklık ve maliyet rekabeti açısından sorunlarla karşılaştığını ortaya koymaktadır (IAEA, 2022). Dolayısıyla NUWARD örneği, SMR alanında köklü nükleer deneyime sahip olmanın tek başına hızlı ticarileşme başarısı sağlamadığını; tasarım

sadeligi, maliyet kontrolu, lisanslama ongoreulebilirliigi ve pazar zamanlamasinin en az teknolojik yetkinlik kadar belirleyici oldugunu gostermektedir (OECD-NEA, 2023).

Fransa'nin 2022'de aciklanan nukleer enerji canlanma plani, buyuk olegkli EPR2 reaktörlerinin inşasını merkeze almakla birlikte, SMR ve ileri reaktör araştırmalarını da ulusal enerji stratejisinin bir parçası hâline getirmiştir. Bu çerçevede NUWARD programı, yalnızca elektrik üretimi için değil; endüstriyel ısı, hidrojen üretimi, bölgesel ısıtma ve deniz suyu arıtımı gibi farklı kullanım alanlarına yönelik çok amaçlı bir enerji platformu olarak da değerlendirilmektedir (EDF, 2024). Böylece Fransa, büyük nukleer santral geleneğini korurken, SMR teknolojilerini özellikle sanayi karbonsuzlaşması ve ihracat potansiyeli açısından tamamlayıcı bir araç olarak konumlandırmaktadır (IAEA, 2022).

Fransız yaklaşımının özgünlüğü, devlet yönlendirmeli endüstriyel konsolidasyon modelinden kaynaklanmaktadır (OECD-NEA, 2023). EDF, Framatome, TechnicAtome, Naval Group ve CEA gibi güçlü ulusal aktörlerin bilgi birikimi, Fransa'ya SMR geliştirme sürecinde önemli bir teknik temel sağlamaktadır (World Nuclear Association, 2024). Ancak bu yapı aynı zamanda rekabetin sınırlı olması, karar alma süreçlerinin yavaşlaması ve büyük reaktör programlarının SMR projeleri üzerinde gölge oluşturması gibi riskler de barındırmaktadır (OECD-NEA, 2023). Bu nedenle Fransa'nın SMR stratejisi, güçlü bir nukleer miras ile bu mirasın yarattığı kurumsal ağırlık arasındaki gerilim üzerinden şekillenmektedir.

Sonuç olarak Fransa, SMR alanına zayıf bir nukleer altyapıyla değil, aksine çok güçlü fakat büyük ölçekli reaktörlere odaklanmış bir nukleer sistemin içinden girmektedir (IAEA, 2022). Bu durum Fransa'ya tedarik zinciri, düzenleyici deneyim ve mühendislik kapasitesi bakımından önemli avantajlar sağlarken; hızlı tasarım sadeleştirilmesi, maliyet rekabeti ve pazar zamanlaması konularında belirgin zorluklar da yaratmaktadır (OECD-NEA, 2023).

3.7 Güney Kore

Güney Kore'nin nukleer enerji tarihi, 1970'lerden bu yana gerçekleştirdiği teknoloji transferi, yerelleştirme ve sanayi kapasitesi inşa etme süreçleriyle son derece özgün bir gelişim çizgisi izlemiştir (World Nuclear Association, 2024). Başlangıçta dış teknolojiye bağımlı bir nukleer program yürüten Güney Kore, zaman içinde kendi mühendislik, imalat ve proje yönetimi kapasitesini geliştirerek APR-1400 tasarımıyla küresel nukleer ihracat pazarında rekabet edebilen bir aktöre dönüşmüştür (Korea Electric Power Corporation [KEPCO], t.y.; IAEA, 2022). Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki Barakah NGS projesi, Güney Kore'nin büyük ölçekli reaktör ihracatı bakımından en önemli referanslarından biri olarak kabul edilmektedir (IAEA, 2023). Bu arka plan, Güney Kore'nin SMR stratejisini anlamak açısından kritik önemdedir; çünkü ülke SMR teknolojilerini yalnızca bir Ar-Ge başlığı olarak değil, mevcut nukleer sanayi altyapısını daha kompakt, ihracata uygun ve esnek enerji çözümlerine dönüştürme aracı olarak değerlendirmektedir (KAERI, 2024).

Güney Kore'nin SMR alanındaki en erken ve en önemli girişimi, KAERI öncülüğünde geliştirilen SMART (*System-integrated Modular Advanced Reactor*) tasarımıdır. SMART, entegre basınçlı su reaktörü mimarisine dayanan, küçük ölçekli elektrik üretiminin yanı sıra deniz suyu arıtımı ve bölgesel ısıtma gibi çok amaçlı kullanım alanları için tasarlanmış bir reaktör konseptidir. Tasarımın 2012 yılında Kore düzenleyici otoritesinden standart tasarım onayı alması, Güney

Kore'yi SMR lisanslama tarihinde erken konumlanan ülkelerden biri hâline getirmiştir (KAERI, 2012). Bu onay, SMART'ın yalnızca kavramsal bir tasarım olmadığını, düzenleyici değerlendirmeden geçmiş uygun bir teknoloji hattı sunduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

SMART programının ihracat boyutu özellikle Suudi Arabistan ile yürütülen iş birlikleri üzerinden somutlaşmıştır. KAERI ile Suudi Arabistan'ın King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy (K.A.CARE) kurumu arasında yürütülen Pre-Project Engineering çalışmaları, SMART teknolojisinin yalnızca teorik bir ihracat seçeneği olmadığını; alıcı ülke ihtiyaçlarına göre uyarlanabilecek bir enerji, su artımı ve altyapı çözümü olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Daha sonra geliştirilen SMART100 tasarımı ise SMART ailesinin daha gelişmiş, pasif güvenlik özellikleri güçlendirilmiş ve ihracata dönük yeni bir versiyonu olarak öne çıkmıştır. SMART100'ün 2024 yılında standart tasarım onayı alması, Güney Kore'nin SMR alanındaki lisanslama birikimini güncel bir teknoloji hattına taşıdığını göstermektedir (KAERI, 2024).

Güney Kore'nin güncel SMR stratejisinde bir diğer önemli başlık, KAERI ve KHNP'nin ortak yürüttüğü i-SMR (*Innovative Small Modular Reactor*) programıdır. i-SMR, hafif su reaktörü teknolojisine dayanan, daha yüksek güvenlik, modüler üretim ve seri konuşlandırma hedefleriyle geliştirilen yeni nesil bir tasarım olarak konumlandırılmaktadır. Güney Kore'nin bu programdaki amacı, SMART deneyiminden elde edilen teknik ve düzenleyici birikimi daha rekabetçi, standartlaştırılmış ve küresel pazara uygun bir ticari SMR tasarımına dönüştürmektir. Bu nedenle i-SMR, Güney Kore'nin SMR politikasında yalnızca teknik bir Ar-Ge projesi değil, aynı zamanda nükleer ihracat kapasitesini yeni nesil reaktör pazarına taşıma girişimi olarak değerlendirilmelidir.

Güney Kore'nin SMR stratejisindeki temel rekabet avantajı, olgunlaşmış nükleer imalat ekosistemi, rekabetçi mühendislik maliyetleri ve büyük ölçekli nükleer projelerde elde ettiği uluslararası referanslardan kaynaklanmaktadır (World Nuclear Association, 2024; IAEA, 2023). Doosan Enerbility başta olmak üzere Koreli ağır sanayi ve mühendislik şirketleri, nükleer bileşen üretimi, büyük ölçekli proje yönetimi ve uluslararası tedarik zinciri entegrasyonu açısından güçlü bir altyapıya sahiptir (Doosan Enerbility, 2024). APR-1400 tasarımının Barakah Nükleer Güç Santrali'nde sağladığı operasyonel referans da Güney Kore'nin yeni nükleer projelerde güvenilir tedarikçi imajını desteklemektedir (Nuclear Energy Agency [NEA], 2023; Emirates Nuclear Energy Corporation [ENEC], 2024). Bu özellikler, Güney Kore'yi yalnızca teknoloji geliştiren değil, aynı zamanda projeyi sahaya indirebilecek mühendislik ve inşaat kapasitesine sahip bir aktör hâline getirmektedir (World Nuclear Association, 2024).

Bu avantajlar, Türkiye'nin potansiyel SMR ortaklıkları açısından Güney Kore'yi dikkate değer bir seçenek hâline getirmektedir. Türkiye'nin mevcut büyük ölçekli nükleer programında Rusya ile kurduğu güçlü bağ, gelecekte tedarikçi çeşitlendirmesi ve teknoloji portföyünü genişletme ihtiyacını gündeme getirebilir. Bu bağlamda Güney Kore; Batılı teknoloji geliştiricilerine kıyasla daha rekabetçi mühendislik maliyetleri, Rusya'ya kıyasla daha düşük jeopolitik risk algısı ve ihracat odaklı proje yürütme deneyimiyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte Güney Kore SMR teknolojilerinin de ilk ticari uygulamalar, lisanslama takvimi, maliyet doğrulaması ve yakıt-tedarik zinciri açısından henüz tam olarak olgunlaşmadığı belirtilmelidir. Dolayısıyla Kore modeli güçlü bir potansiyel taşımakla birlikte, nihai değerlendirme ilk ticari projelerin saha performansına bağlı olacaktır.

3.8 Japonya

Japonya'nın nükleer politika çizgisi, 2011 Fukushima Daiichi kazasının ardından benzeri az görülen bir siyasi, toplumsal ve düzenleyici dönüşüm sürecinden geçmiştir. Kaza sonrasında çok sayıda reaktörün devre dışı bırakılması ve yeniden işletmeye alınacak tesislerin daha sıkı güvenlik standartlarına tabi tutulması, Japon nükleer sektörünü uzun süreli bir duraklama dönemine sokmuştur. Reaktörlerin yeniden devreye alınması yalnızca teknik lisanslama süreçlerine değil, aynı zamanda yerel yönetimlerin ve bölge halkının kabulüne bağlı olduğundan, nükleer enerjinin yeniden konumlandırılması Japonya'da diğer birçok ülkeye kıyasla daha yavaş ve tartışmalı ilerlemiştir. Bununla birlikte 2022 enerji krizinin yarattığı arz güvenliği kaygısı, fosil yakıt ithalatına bağımlılık ve 2050 karbon nötrlüğü hedefi, Japon hükümetini mevcut reaktörlerin daha etkin kullanımı, işletme sürelerinin uzatılması ve yeni nesil nükleer teknolojilere yatırım yapılması konusunda daha kararlı bir politika çizgisine yöneltmiştir (METI, 2023).

Japonya'nın SMR ve ileri reaktör alanındaki başlıca sanayi aktörleri Hitachi-GE ve Mitsubishi Heavy Industries'tir (World Nuclear Association, 2024). Hitachi-GE, GE-Hitachi Nuclear Energy ortaklığı çerçevesinde BWRX-300 programının küresel gelişimine entegre biçimde dâhil olmakta; bu tasarımın Kanada, ABD ve Avrupa'daki ilerleme süreci Japonya açısından da önemli bir teknolojik referans oluşturmaktadır (GE Hitachi Nuclear Energy, 2023; OECD-NEA, 2023). BWRX-300, kaynar su reaktörü teknolojisinin daha küçük, sadeleştirilmiş ve modüler bir forma uyarlanması bakımından Japon sanayisinin mevcut hafif su reaktörü deneyimiyle uyumlu bir seçenek sunmaktadır (IAEA, 2022). Mitsubishi Heavy Industries ise küçük basınçlı su reaktörü, yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktör ve mikroreaktör konseptleri üzerinde çalışmalar yürütmekte; özellikle yüksek sıcaklık proses ısısı, hidrojen üretimi ve sanayi karbonsuzlaşması gibi alanlarda ileri reaktörlerin rolünü araştırmaktadır (Mitsubishi Heavy Industries, 2024; OECD-NEA, 2023).

Japon hükümetinin 2023 yılında kabul ettiği GX (*Green Transformation*) temel politikası, nükleer enerjinin Fukushima sonrası dönemde yeniden stratejik bir enerji kaynağı olarak konumlandırılmasında önemli bir eşik oluşturmaktadır. Bu politika çerçevesinde Japonya, güvenlik onayı alan mevcut reaktörlerin yeniden devreye alınmasını hızlandırmayı, işletme sürelerinden daha etkin yararlanmayı ve yeni nesil ileri reaktörlerin mevcut nükleer santral sahalarında geliştirilmesini hedeflemektedir (METI, 2023). Bu yönüyle GX stratejisi, Japonya'nın nükleer enerjiden uzaklaşma eğilimini tamamen tersine çevirdiği anlamına gelmemekle birlikte, enerji güvenliği ve karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda nükleer teknolojiyi yeniden politika araç setinin merkezine almaya başladığını göstermektedir.

Bununla birlikte Japonya'nın SMR stratejisi, ABD veya Çin gibi hızlı ticarileşme odaklı modellerden daha temkinli bir karakter taşımaktadır. Fukushima sonrası oluşan toplumsal güven sorunu, yerel kabul mekanizmalarının belirleyiciliği ve düzenleyici süreçlerin hassasiyeti, Japonya'da yeni nükleer teknolojilerin konuşlandırılmasını yavaşlatabilecek başlıca faktörlerdir. Bu nedenle Japonya'nın SMR yaklaşımı, kısa vadeli büyük ölçekli konuşlandırmadan çok, mevcut sanayi birikimini koruma, ileri reaktör teknolojilerinde Ar-Ge kapasitesini sürdürme ve enerji güvenliği koşulları olgunlaştıkça yeni seçenekleri devreye alma stratejisi olarak değerlendirilmelidir.

3.9 Öncü SMR Tasarımları: Teknik ve Ticari Uygulanabilirlik Analizi

3.9.1 NuScale VOYGR

NuScale Power tarafından geliştirilen VOYGR platformu, SMR tarihinin en çok atıfta bulunulan tasarımlarından biri olmakla birlikte, 2023 yılında UAMPS destekli Carbon Free Power Project'in iptal edilmesiyle ticari uygulanabilirlik tartışmalarının da merkezine yerleşmiştir. NuScale'ın ilk lisanslama başarısı, 50 MWe gücündeki modüllerden oluşan ve 12 modüle kadar ölçeklenebilen US600 tasarımının NRC tarafından değerlendirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu tasarım, ABD'de tasarım sertifikasyonu sürecini tamamlayan ilk SMR olarak önemli bir düzenleyici öncülük avantajı sağlamıştır (NRC, 2020). Daha sonra şirket, ekonomik performansı artırmak amacıyla modül gücünü 77 MWe'ye yükselten US460 tasarımına yönelmiş; bu yeni konfigürasyon altı modülden oluşan yaklaşık 462 MWe'lik bir santral mimarisi olarak geliştirilmiştir. 77 MWe'lik yükseltilmiş tasarımın NRC tarafından 2025 yılında onaylanması, NuScale'ın lisanslama üstünlüğünü sürdürmesi açısından önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir (NRC, 2025).

VOYGR tasarımının teknik açıdan en belirleyici unsuru, entegre basınçlı su reaktörü mimarisine ve pasif güvenlik felsefesine dayanmasıdır (NuScale Power, 2024; IAEA, 2023). Reaktör basınç kabı, buhar üreteçleri ve basınçlandırıcı gibi temel bileşenlerin tek bir modül içinde bütünleştirilmesi, geleneksel büyük ölçekli basınçlı su reaktörlerine kıyasla sistem karmaşıklığını azaltmayı hedeflemektedir (NuScale Power, 2024). Ayrıca modüllerin su havuzu içinde konumlandırılması, bozunum ısısının uzaklaştırılmasında doğal sirkülasyon ve pasif soğutma mekanizmalarından yararlanılmasını mümkün kılmaktadır (NRC, 2023; NuScale Power, 2024). Bu yaklaşım, harici elektrik gücü veya operatör müdahalesi olmaksızın belirli süre boyunca güvenli soğutma sağlayabilme iddiasıyla SMR güvenlik anlatısının en güçlü örneklerinden biri olarak sunulmaktadır (IAEA, 2023; NRC, 2023).

Bununla birlikte NuScale'ın ticari yolculuğu, SMR ekonomisinin yapısal güçlüklerini son derece somut biçimde ortaya koymuştur. UAMPS ile Idaho National Laboratory sahasında geliştirilmesi planlanan Carbon Free Power Project, ABD'de ilk ticari SMR uygulaması olma potansiyeli taşımaya rağmen, artan maliyetler ve yeterli müşteri taahhüdünün sağlanamaması nedeniyle 2023 yılında iptal edilmiştir. Projenin başlangıçta yaklaşık 50–55 \$/MWh düzeyinde öngörülen elektrik üretim maliyeti, 2023'e gelindiğinde 89 \$/MWh seviyesine yükselmiş; bu artış, belediye tipi kamu hizmeti alıcılarının projeye olan ilgisini zayıflatmış ve iptal kararında belirleyici olmuştur (Haas vd., 2023).

Bu deneyim, SMR teknolojileri açısından iki yönlü bir ders sunmaktadır. Bir yandan NuScale örneği, düzenleyici onay almış bir tasarımın bile ticari başarıya otomatik olarak ulaşmadığını göstermektedir. Diğer yandan ilk tesis maliyetlerinin yüksekliği, tedarik zincirinin henüz seri üretim ölçeğine ulaşmamış olması ve müşteri tabanının yeterince kesinleşmemesi, SMR projelerinde finansal riskin teknik risk kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla NuScale VOYGR, SMR alanında lisanslama bakımından öncü bir başarı örneği olmakla birlikte, aynı zamanda ilk ticari projelerde maliyet kontrolü, talep kesinliği ve gerçekçi fiyat tahminlerinin ne kadar kritik olduğunu gösteren uyarıcı bir vaka niteliği taşımaktadır.

3.9.2 GE-Hitachi BWRX-300

GE-Hitachi Nuclear Energy tarafından geliştirilen BWRX-300, 300 MWe kapasiteli, kaynar su reaktörü teknolojisine dayanan ve günümüzde en aktif lisanslama ve konuşlandırma süreçlerine sahip SMR tasarımlarından biridir. Kanada'da Ontario Power Generation (OPG) ile yürütülen Darlington New Nuclear Project, Polonya'daki Orlen Synthos Green Energy ortaklığı, Birleşik Krallık'taki SMR değerlendirme süreçleri ve ABD'deki ön lisanslama çalışmaları, BWRX-300'ün küresel ticari ağını göstermektedir (GEH, 2024). Tasarımın temel rekabet argümanı, GE-Hitachi'nin daha önce geliştirdiği ESBWR tasarımından türetilmiş olmasıdır. Bu durum, mühendislik bilinmezliklerinin tamamen ortadan kalktığı anlamına gelmemekle birlikte, tasarımın köklü BWR işletme deneyimi ve daha önce lisanslanmış bir teknoloji temeli üzerine inşa edildiğini göstermektedir.

BWRX-300'ün teknik özellikleri arasında doğal sirkülasyona dayalı soğutma yaklaşımı, pasif güvenlik sistemleri, sadeleştirilmiş tesis mimarisi ve azaltılmış aktif güvenlik bileşeni sayısı öne çıkmaktadır. Tasarımın sadeleştirilmesi, hem inşaat süresini hem de sermaye maliyetini azaltmayı hedeflemektedir. Geliştiriciler, BWRX-300'ün ESBWR tasarımından hareketle daha kompakt ve maliyet-etkin bir konfigürasyon sunduğunu; bu sayede diğer su soğutmalı SMR tasarımlarına ve büyük ölçekli nükleer santrallere kıyasla önemli maliyet avantajları sağlayabileceğini ileri sürmektedir (GEH, 2024). Ancak bu maliyet iddialarının nihai geçerliliği, ilk ticari projelerin gerçek saha maliyetleri ve işletme performansı ile doğrulanacaktır.

BWRX-300 açısından en kritik referans proje Kanada'daki Darlington sahasıdır. Kanada Nükleer Güvenlik Komisyonu'nun 2025 yılında OPG'ye Darlington sahasında bir BWRX-300 reaktörü inşa lisansı vermesi, tasarımın Batı dünyasındaki ticarileşme sürecinde önemli bir eşik oluşturmuştur (CNSC, 2025). Bu gelişmenin ardından Darlington New Nuclear Project kapsamında ilk ünitenin inşaat süreci başlatılmış; projenin 2030 civarında işletmeye alınması hedeflenmiştir. Takvim gerçekleşirse BWRX-300, Batı dünyasında yeni inşa edilen ilk ticari SMR projelerinden biri olacak ve sonraki üniteler için maliyet, lisanslama ve tedarik zinciri açısından kritik bir referans sağlayacaktır.

Bununla birlikte BWRX-300'ün ticari başarısı kesinleşmiş bir sonuç olarak görülmemelidir. Darlington projesi tasarımın en ileri saha uygulaması olmakla birlikte, ilk ünitenin maliyet ve takvim performansı henüz tamamlanmış değildir. Ayrıca Polonya, Birleşik Krallık ve ABD gibi pazarlardaki ilerleme; yerel lisanslama gereklilikleri, finansman koşulları, tedarik zinciri kapasitesi ve siyasi destek düzeyine bağlı olacaktır. Bu nedenle BWRX-300, günümüzde Batı kaynaklı SMR tasarımları içinde en güçlü ticari ivmeye sahip adaylardan biri olarak değerlendirilse de, tasarımın gerçek ekonomik rekabetçiliği ilk projelerin saha performansı ile netleşecektir.

3.9.3 CAREM-25

Arjantin'in CAREM-25 (*Central Argentina de Elementos Modulares*) projesi, gelişmekte olan ekonomilerin bağımsız SMR geliştirme kapasitesi açısından özel bir analitik önem taşımaktadır. CNEA öncülüğünde geliştirilen ve Arjantin'in yerli nükleer mühendislik birikimine dayanan bu tasarım, yaklaşık 30–32 MWe elektrik üretim kapasitesine sahip entegre basınçlı su reaktörü konsepti olarak tasarlanmıştır. CAREM projesi, Arjantin'in onlarca yıllık nükleer bilgi birikiminin, araştırma reaktörü deneyiminin ve bölgesel ölçekte teknoloji geliştirme iddiasının somut bir ürünü olarak değerlendirilmektedir. Buenos Aires eyaletindeki Lima bölgesinde,

Atucha nükleer kompleksi yakınında yürütülen inşaat süreci; finansman, tedarik, proje yönetimi ve teknik tasarım değişiklikleri nedeniyle öngörülen takvimin gerisinde kalmış olmakla birlikte, proje Arjantin'in yerli SMR geliştirme kapasitesinin en görünür örneği olmayı sürdürmektedir (CNEA, 2024).

CAREM'in kavramsal açıdan en özgün özelliği, birincil devre bileşenlerinin büyük ölçüde reaktör basınç kabı içinde bütünleştirildiği "tam entegre" (fully integral) tasarım felsefesidir (IAEA, 2023; CNEA, 2024). Bu tasarımda buhar üreteçleri ve basınçlandırma işlevi reaktör kabı içinde yer almakta; birincil soğutucu akış ise geleneksel büyük basınçlı su reaktörlerinde olduğu gibi harici pompalarla değil, doğal sirkülasyon prensibiyle sağlanmaktadır (IAEA, 2023). Bu yaklaşım, büyük çaplı boru kırılması gibi klasik kaza senaryolarının olasılığını azaltmayı ve pasif güvenlik özelliklerini güçlendirmeyi amaçlamaktadır (World Nuclear Association, 2025; IAEA, 2023). Dolayısıyla CAREM, SMR teknolojilerinin temel iddialarından biri olan sistem sadeleşmesi, entegre tasarım ve pasif güvenlik mantığının erken örneklerinden biri olarak öne çıkmaktadır (CNEA, 2024).

Bununla birlikte CAREM deneyimi, yerli SMR geliştirme stratejisinin karşılaşılabileceği yapısal güçlükleri de açık biçimde göstermektedir. Tam entegre tasarım, güvenlik ve kompaktlık açısından avantaj sağlarken; reaktör kabı içindeki bileşenlerin imalatı, montajı, muayenesi ve bakım-onarım süreçleri açısından mühendislik karmaşıklığı yaratabilmektedir. Ayrıca gelişmekte olan bir ekonomide uzun soluklu nükleer teknoloji geliştirme programının sürdürülebilmesi, yalnızca teknik kapasiteye değil, kamu finansmanının sürekliliğine, tedarik zinciri istikrarına, düzenleyici kapasiteye ve siyasi önceliklerin değişmemesine bağlıdır. CAREM'in yıllar içinde yaşadığı duraksamalar, ilk yerli SMR projelerinde teknik risk kadar kurumsal ve finansal sürekliliğin de belirleyici olduğunu göstermektedir.

Türkiye perspektifinden değerlendirildiğinde CAREM, teknolojik egemenlik hedefli yerli SMR geliştirme stratejisi açısından önemli bir kıyaslama örneği sunmaktadır. Arjantin deneyimi, sınırlı kaynaklara sahip ancak nükleer bilgi birikimi bulunan ülkelerin tamamen dışa bağımlı kalmadan özgün reaktör tasarımı geliştirebileceğini göstermesi bakımından dikkat çekicidir. Ancak aynı deneyim, yerli tasarım hedefinin uzun zaman, yüksek mühendislik sürekliliği, istikrarlı kamu desteği ve güçlü kurumsal koordinasyon gerektirdiğini de ortaya koymaktadır. Bu nedenle CAREM, Türkiye gibi nükleer teknoloji kapasitesini geliştirmeyi hedefleyen ülkeler için hem ilham verici hem de uyarıcı bir örnek niteliğindedir.

3.9.4 ACP100 Linglong One

Daha önce ayrıntılı biçimde değinildiği üzere, Çin'in Hainan Adası'ndaki Changjiang sahasında inşa edilen ACP100 Linglong One projesi, kara konuşlu ticari SMR uygulamaları içinde dünyadaki en ileri örneklerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte tasarımın henüz tam ticari işletme deneyimiyle doğrulanmış bir referans tesis olarak değerlendirilmemesi gerekir. Linglong One, 125 MWe brüt elektrik üretim kapasitesine ve yaklaşık 385 MWt termal güce sahip entegre basınçlı su reaktörü tasarımıdır. Net elektrik kapasitesi yaklaşık 100 MWe olarak verilmektedir. Bu özellikleriyle tasarım, küçük ve orta ölçekli elektrik talebi olan bölgeler, endüstriyel ısı uygulamaları, bölgesel enerji arzı ve çok amaçlı enerji kullanımları açısından önemli bir uygulama potansiyeli taşımaktadır (CNNC, 2023).

ACP100'ün (Linglong One) teknik önemi, Çin'in büyük ölçekli basınçlı su reaktörü programlarından edindiği mühendislik, tedarik zinciri ve lisanslama deneyimini daha küçük ve modüler bir konfigürasyona aktarma girişiminde yatmaktadır (IAEA, 2023; World Nuclear Association, 2025). Entegre birincil devre tasarımı, kompakt tesis mimarisi, pasif güvenlik özellikleri ve 60 yıllık tasarım ömrü hedefi, Linglong One'ı Çin'in SMR alanındaki en dikkat çekici projelerinden biri hâline getirmektedir (CNNC, 2024; IAEA, 2023). Bu yaklaşım, tamamen deneysel bir reaktör konseptinden ziyade, olgunlaşmış hafif su reaktörü teknolojisinin daha sade, daha küçük ve seri üretime daha uygun bir forma dönüştürülmesi anlamına gelmektedir (OECD-NEA, 2024; World Nuclear Association, 2025).

Linglong One'ın uluslararası önemi yalnızca teknik özelliklerinden değil, aynı zamanda Çin'in SMR ihracat stratejisindeki potansiyel rolünden de kaynaklanmaktadır. ACP100 tasarımının 2016 yılında IAEA'nın genel reaktör güvenliği incelemesinden geçmiş olması, tasarımın uluslararası düzeyde görünürlüğünü artırmış ve Çin'in bu teknolojiyi küresel pazara sunma iddiasını güçlendirmiştir. Ancak bu incelemenin doğrudan bir lisanslama onayı değil, tasarımın güvenlik dokümantasyonuna yönelik erken aşama bir değerlendirme olduğu özellikle vurgulanmalıdır. Dolayısıyla ACP100'ün uluslararası pazarlardaki başarısı, yalnızca IAEA inceleme sürecine değil, ilk ünitenin gerçek saha performansına, maliyet sonuçlarına, işletme güvenilirliğine ve alıcı ülkelerdeki düzenleyici kabul süreçlerine bağlı olacaktır (CNNC, 2023).

Çin'in bu tasarımla Orta Doğu, Güneydoğu Asya ve Afrika gibi enerji talebi hızla artan bölgelerde ihracat fırsatları araması, Linglong One'ı yalnızca ulusal bir teknoloji projesi olmaktan çıkararak Kuşak ve Yol Girişimi eksenindeki enerji altyapısı stratejisinin de bir parçası hâline getirmektedir. Başarılı bir ilk işletme deneyimi elde edilmesi durumunda ACP100, gelişmekte olan ülkeler için düşük karbonlu, görece küçük ölçekli ve devlet destekli finansman modelleriyle sunulabilecek bir nükleer enerji seçeneği olarak öne çıkabilir. Bununla birlikte tasarımın küresel referans değerinin kesinleşmesi, ticari işletme aşamasındaki güvenilirlik, maliyet ve bakım performansının sahada kanıtlanmasına bağlıdır.

3.9.5 RITM-200

Rusya'nın RITM-200 ailesi, SMR teknolojileri içinde deniz reaktörü deneyimi, Arktik operasyon kabiliyeti ve kara konuşlu küçük modüler reaktörlere uyarlanma potansiyeli bakımından özel bir konuma sahiptir (IAEA, 2023; WNA, 2024). Bununla birlikte RITM-200'ün doğrudan Akademik Lomonosov yüzer nükleer güç santralinde işletildiğini söylemek doğru değildir. Akademik Lomonosov, iki adet KLT-40S reaktörüne sahip olup Pevek bölgesinde elektrik ve ısı üretimi sağlayan bir yüzer nükleer güç santrali olarak işletilmektedir (WNA, 2024). RITM-200 ise Rusya'nın yeni nesil nükleer buzkıranlarında kullanılan daha modern bir deniz reaktörü ailesidir (Rosatom, 2024). Bu nedenle Rusya'nın SMR alanındaki sahada kanıtlanmış deneyimi iki ayrı düzeyde değerlendirilmelidir: KLT-40S tabanlı Akademik Lomonosov ile yüzer nükleer santral işletme deneyimi ve RITM-200 ailesiyle nükleer buzkıranlarda kazanılmış deniz reaktörü işletme tecrübesi (IAEA, 2023).

RITM-200 ailesinin SMR tartışmalarındaki asıl önemi, bu deniz reaktörü teknolojisinin kara konuşlu ve yüzer güç ünitelerine uyarlanabilir bir teknoloji platformu hâline getirilmesinden kaynaklanmaktadır (OECD NEA, 2024). Kara konuşlu RITM-200N versiyonu, yaklaşık 55 MWe elektrik üretim kapasitesine sahip olacak şekilde geliştirilmekte ve özellikle uzak yerleşimler,

Arktik kaynak bölgeleri, madencilik sahaları ve merkezi şebekeden kopuk endüstriyel tesisler için konumlandırılmaktadır (Rosatom, 2024).

Yakutistan'daki Ust-Kuyga sahasında planlanan RITM-200N projesi, Rusya'nın deniz reaktörü deneyimini kara konuşlu SMR uygulamasına dönüştürme stratejisinin en somut örneklerinden biridir (IAEA, 2023). Bu proje başarılı olduğu takdirde Rosatom, RITM ailesini yalnızca iç pazar için değil, ihracata konu edilebilecek bir SMR referans tasarımı olarak da sunma imkânı kazanacaktır (OECD NEA, 2024).

Rosatom'un RITM temelli stratejisi, Rusya'nın Arktik jeopolitiği ve nükleer diplomasi kapasitesiyle doğrudan bağlantılıdır (WNA, 2024). Bu bağlamda küçük modüler reaktörler, yalnızca düşük karbonlu elektrik üretim teknolojisi değil; uzak bölgelerde enerji güvenliği sağlama, doğal kaynak projelerini destekleme ve Arktik bölgelerde kalıcı altyapı kurma aracıdır (IAEA, 2023). Bununla birlikte RITM ailesinin uluslararası yayılımı önemli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Rusya-Ukrayna Savaşı sonrasında oluşan yaptırım ortamı, finansman kanallarının daralması ve Batılı ülkelerde Rus nükleer teknolojilerine yönelik güven kaybı, Rosatom'un SMR ihracat potansiyelini sınırlandırmaktadır (OECD NEA, 2024). Bu nedenle RITM-200N'nin uluslararası yayılımı yalnızca mühendislik performansına değil, jeopolitik ve finansal koşullara da bağlıdır.

Sonuç olarak RITM-200 ailesi, Rusya'nın SMR alanındaki en güçlü teknoloji hatlarından birini temsil etmektedir; ancak bu gücün doğru analiz edilebilmesi için Akademik Lomonosov'daki KLT-40S deneyimi ile RITM-200/RITM-200N hattı birbirinden ayrılmalıdır (IAEA, 2023). Bu ayırım, Rusya'nın yüzer nükleer santral işletme yetkinliği ile kara konuşlu SMR ticarileşme stratejisini net biçimde ortaya koymaktadır.

3.9.6 Rolls-Royce SMR

Rolls-Royce SMR, yaklaşık 470 MWe kapasitesiyle teknik olarak SMR sınıfının üst sınırında yer alan ve bu nedenle bazı değerlendirmelerde “büyük SMR” ya da “orta ölçekli modüler reaktör” olarak da nitelendirilen bir tasarımdır. Bununla birlikte tasarımın önemi yalnızca güç kapasitesinden değil, Birleşik Krallık'ın bu teknolojiyi açık biçimde bir sanayi politikası aracı olarak konumlandırmasından kaynaklanmaktadır. Rolls-Royce öncülüğündeki konsorsiyumun yaklaşımı; reaktörün önemli bileşenlerinin fabrika ortamında standartlaştırılmış üretim süreçleriyle imal edilmesi, saha çalışmalarının azaltılması ve aynı tasarımın çoklu ünitelerde tekrarlanması yoluyla nükleer sektörde üretim ölçeği ekonomisinin yakalanması üzerine kuruludur. Bu yönüyle Rolls-Royce SMR, modüler üretim felsefesini yalnızca teknik bir tasarım ilkesi olarak değil, aynı zamanda maliyet düşürme ve yerli tedarik zinciri oluşturma stratejisi olarak ele almaktadır (UK Government, 2024).

Birleşik Krallık hükümetinin SMR programına doğrudan destek vermesi, bu tasarımın ticari perspektifini güçlendiren en önemli unsurlardan biridir. Great British Nuclear tarafından yürütülen teknoloji seçim süreci sonucunda Rolls-Royce SMR'nin tercih edilen teknoloji ortağı olarak belirlenmesi ve ardından Great British Energy – Nuclear ile sözleşme imzalanması, tasarımın yalnızca kavramsal ya da ön lisanslama düzeyinde kalmadığını göstermektedir (UK Government, 2025; UK Government, 2026). Bu gelişme, Rolls-Royce SMR'yi Batı kaynaklı SMR tasarımları arasında kamu politikası, sanayi stratejisi ve potansiyel saha uygulaması bakımından en güçlü adaylardan biri hâline getirmiştir.

Rolls-Royce SMR'nin teknik yaklaşımı, mevcut hafif su reaktörü deneyimine dayanan görece tanıdık bir teknoloji tabanı ile fabrika üretimine uygun standart modül anlayışını birleştirmektedir. Radikal ölçüde yeni yakıt döngülerine veya henüz ticari olgunluğa ulaşmamış soğutucu teknolojilerine yönelmek yerine, basınçlı su reaktörü prensiplerini daha kompakt, standartlaştırılmış ve seri üretime uygun bir forma dönüştürmeyi hedeflemektedir. Bu tercih, lisanslama öngörülebilirliği ve tedarik zinciri uyumu açısından önemli bir avantaj sağlayabilir. Ancak 470 MWe'lik kapasite, tasarımı klasik SMR tanımının sınırına yaklaştırdığı için, bu reaktörün küçük modüler reaktörden çok “standartlaştırılmış orta ölçekli reaktör” olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunan yorumlar da bulunmaktadır.

Tasarımın ekonomik iddiası, ilk üniteden ziyade aynı tasarımın çok sayıda projede tekrarlanmasıyla anlam kazanmaktadır. Fabrika üretimi, tedarik zinciri standardizasyonu ve saha montajının azaltılması, teorik olarak maliyet ve süre avantajı yaratabilir; ancak bu avantajların gerçekleşmesi, yalnızca tek bir reaktörün inşasıyla değil, filo yaklaşımının fiilen uygulanmasıyla mümkün olacaktır. Bu nedenle Rolls-Royce SMR'nin ekonomik başarısı, ilk projelerin lisanslama, maliyet ve takvim performansına; ardından da aynı tasarımın tekrar eden ünitelerde ne ölçüde maliyet düşüşü sağlayabileceğine bağlıdır.

İhracat perspektifi açısından Rolls-Royce SMR, Birleşik Krallık'ın nükleer sanayi kapasitesini yeniden uluslararası pazara taşıma girişiminin merkezinde yer almaktadır. Polonya, Çek Cumhuriyeti, Türkiye ve diğer potansiyel alıcı ülkelerde bu tasarıma yönelik ilgi, yalnızca reaktör teknolojisinin teknik özelliklerinden değil, İngiltere'nin güvenilir düzenleyici geleneği, NATO/Batı ittifakı içindeki konumu ve Rusya-Çin kaynaklı tedarik seçeneklerine alternatif oluşturma potansiyelinden de kaynaklanmaktadır. Bu yönüyle Rolls-Royce SMR, yalnızca bir enerji teknolojisi değil, aynı zamanda Batı merkezli SMR tedarik zincirinin ve nükleer ihracat stratejisinin önemli bir bileşeni olarak değerlendirilebilir.

Bununla birlikte Rolls-Royce SMR'nin ticari başarısı henüz kesinleşmiş değildir. İlk projelerin nihai maliyeti, inşaat süresi, lisanslama takvimi ve tedarik zinciri performansı sahada doğrulanmayı beklemektedir. Ayrıca tasarımın gerçek anlamda maliyet avantajı sağlayabilmesi için Birleşik Krallık iç pazarında yeterli sayıda ünite siparişi oluşması ve bu referansların ihracat pazarlarında güven yaratması gerekmektedir. Dolayısıyla Rolls-Royce SMR, modüler üretim felsefesini en sistematik biçimde sanayi politikasına dönüştüren tasarımlardan biri olmakla birlikte, bu yaklaşımın gerçek ekonomik değeri ancak ilk ticari projelerin performansı ve seri üretim ölçeğine ulaşıp ulaşılamayacağı ile netleşecektir.

4. SMR TEKNOLOJİLERİNİN ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNDEKİ ROLÜ: ANALİTİK BİR DEĞERLENDİRME

Enerji dönüşümü kavramı, günümüzde akademik ve politika literatüründe giderek artan bir kavramsal yoğunluk kazanmakla birlikte, bu kavramın homojen ve tek boyutlu bir içeriğe sahip olmadığını baştan belirtmek gerekmektedir. Bazı yaklaşımlarda enerji dönüşümü yalnızca enerji karışımındaki yakıt ikamesi, yani fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş olarak ele alınmaktadır. Daha kapsamlı bir analitik çerçevede ise enerji dönüşümü; enerji üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemlerinin teknolojik, ekonomik, kurumsal ve davranışsal katmanlarda köklü biçimde yeniden düzenlenmesini ifade etmektedir (Markard vd., 2012).

SMR'lerin enerji dönüşümündeki rolü, bu ikinci ve daha geniş çerçeve içinde değerlendirildiğinde çok daha zengin ve çok katmanlı bir anlam kazanmaktadır. Zira SMR'ler yalnızca fosil yakıtların yerine geçebilecek ek bir düşük karbonlu elektrik üretim seçeneği değildir; aynı zamanda enerji sistemlerinin mekânsal örgütlenmesi, yatırım ölçeği, arz güvenliği, sanayi karbonsuzlaşması ve esnek kapasite planlaması üzerinde etkili olabilecek yeni bir teknolojik seçenek olarak değerlendirilmelidir. Bu yönüyle SMR'ler, merkezi büyük ölçekli üretim modelinden daha modüler, daha kademeli ve farklı kullanım alanlarına uyarlanabilir bir enerji altyapısı anlayışına geçiş tartışmalarında önemli bir yer tutmaktadır.

4.1 Karbonsuzlaşma ve Net Sıfır Hedefleri: SMR'lerin Rolü Nerede Başlayıp Nerede Bitiyor?

4.1.1 Düşük Karbonlu Sistemlerde Nükleer Enerjinin Yaşam Döngüsü Karbon Yoğunluğu

SMR'lerin iklim politikası açısından değerlendirilmesi, öncelikle yaşam döngüsü karbondioksit eşdeğeri emisyonları perspektifinden yapılmalıdır. Nükleer tesisler operasyonel aşamada doğrudan karbondioksit emisyonu üretmemekle birlikte; inşaat, uranyum madenciliği, yakıt zenginleştirme, yakıt üretimi, işletme destek süreçleri, atık yönetimi ve nihai sökülme aşamalarında dolaylı emisyonlara neden olmaktadır. Bu nedenle nükleer enerjinin iklim performansı yalnızca santral bacasından çıkan emisyonlarla değil, tüm yakıt ve tesis yaşam döngüsü dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

IPCC'nin kapsamlı meta-analizine göre nükleer enerjinin medyan yaşam döngüsü karbon yoğunluğu yaklaşık 12 gCO₂-eşdeğeri/kWh düzeyindedir. Bu değer, rüzgâr enerjisi ve fotovoltaik güneş enerjisi gibi düşük karbonlu kaynaklarla karşılaştırılabilir düzeyde olup, kömürlü termik santrallerin yaşam döngüsü emisyonlarının yalnızca çok küçük bir bölümüne karşılık gelmektedir (IPCC, 2014). Bu veriler, SMR'lerin karbonsuzlaşma tartışmasındaki temel konumunu açık biçimde ortaya koymaktadır: SMR'ler, fosil yakıtlı elektrik üretimine kıyasla dramatik ölçüde düşük karbonlu bir seçenek sunmakta; yenilenebilir enerji teknolojileriyle ise aynı düşük karbonlu enerji sisteminin farklı bir bileşeni olarak değerlendirilebilmektedir.

Bununla birlikte bu kıyaslama, SMR'lerin iklim katkısını bütünüyle açıklamak için tek başına yeterli değildir. Nükleer enerjinin yaşam döngüsü karbon yoğunluğu; reaktör tipinden, santral inşaatında kullanılan malzemelerden, uranyum cevherinin tenöründen, yakıt zenginleştirme teknolojisinden ve zenginleştirme sürecinde kullanılan elektriğin karbon yoğunluğundan etkilenmektedir. Özellikle uranyum zenginleştirme aşaması bu bakımdan önemlidir. Gaz

difüzyon yöntemi gibi daha enerji yoğun teknolojilerle ve karbon yoğun elektrik kullanılarak üretilen yakıtın yaşam döngüsü emisyonu, gaz santrifüj yöntemiyle ve düşük karbonlu elektrikle desteklenen yakıt üretimine kıyasla daha yüksek olabilmektedir.

Bu metodolojik nüans, SMR'lerin karbonsuzlaşma katkısının yalnızca reaktörün işletme aşamasındaki düşük emisyon performansına indirgenemeyeceğini göstermektedir. Gerçek anlamda düşük karbonlu bir SMR stratejisi; yakıt madenciliği, zenginleştirme, yakıt üretimi, atık yönetimi ve tesis sökümü dâhil olmak üzere tüm nükleer yakıt zincirinin mümkün olduğunca düşük karbonlu hâle getirilmesini gerektirmektedir. Başka bir ifadeyle, SMR'lerin net sıfır hedeflerine katkısı yalnızca modüler reaktör teknolojisinin başarısına değil, aynı zamanda yakıt döngüsünün enerji ve karbon yoğunluğunun azaltılmasına da bağlıdır (Sovacool vd., 2020).

Bu bütünleşik bakış açısı, SMR politikasının neden yalnızca reaktör tasarımı veya santral inşaatı meselesi olarak ele alınamayacağını göstermektedir. Yakıt tedarik güvenliği, zenginleştirme altyapısı, HALEU üretim kapasitesi, atık yönetimi ve nükleer yakıt zincirinin karbonsuzlaştırılması; SMR'lerin iklim politikası içindeki gerçek değerini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Dolayısıyla SMR'lerin karbonsuzlaşmadaki rolü, düşük karbonlu elektrik üretme potansiyeliyle başlamakta; ancak bu potansiyelin net sıfır hedeflerine tam anlamıyla hizmet edebilmesi, bütün nükleer yakıt döngüsünün sürdürülebilir ve düşük karbonlu biçimde yönetilmesine bağlı olarak şekillenmektedir.

4.2 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu: Rakip mi, Tamamlayıcı mı?

IEA'nın Net Sıfır 2050 senaryosu, nükleer enerjinin küresel elektrik sistemindeki rolünün orta ve uzun vadede korunmakla kalmayıp belirgin biçimde genişleyeceğini öngörmektedir. IEA'nın güncel projeksiyonlarında, Net Zero Emissions by 2050 Scenario kapsamında kurulu nükleer kapasitenin 2050'ye kadar 1000 GWe'nin üzerine çıkabileceği belirtilmektedir. Bu artış, yalnızca mevcut büyük ölçekli reaktörlerin işletme sürelerinin uzatılmasına değil, aynı zamanda yeni büyük reaktör inşalarına, SMR'lere ve ileri reaktör teknolojilerine de dayanmaktadır (IEA, 2024b; IEA, 2025). IEA'nın 2025 yılında yayımladığı *The Path to a New Era for Nuclear Energy* raporu, mevcut politika koşullarında 2050'de toplam SMR kapasitesinin yaklaşık 40 GWe'ye ulaşabileceğini; güçlü politika desteği, maliyet düşüşü, lisanslama başarısı ve sanayi teslimat kapasitesinin sağlanması durumunda ise bu rakamın 120 GWe'ye kadar çıkabileceğini vurgulamaktadır (IEA, 2025).

IRENA'nın 1,5°C senaryosu ise nükleer enerjiye IEA'ya kıyasla daha sınırlı fakat tamamen dışlayıcı olmayan bir rol atfetmektedir. IRENA'nın enerji dönüşümü yaklaşımı, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, elektrifikasyon ve yeşil hidrojen ekseninde şekillenmekte; nükleer enerji ise düşük karbonlu enerji sisteminin tamamlayıcı bileşenlerinden biri olarak daha ölçülü bir konumda yer almaktadır (IRENA, 2023). IPCC AR6 çalışmaları da net sıfıra ulaşan senaryoların önemli bir bölümünde nükleer enerjinin en az mevcut kapasitesini koruduğunu veya artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte IPCC literatürü, nükleer enerjinin tek başına zorunlu bir çözüm olduğunu değil; yenilenebilir enerji, karbon yakalama, enerji verimliliği, depolama, hidrojen ve talep tarafı yönetimiyle birlikte değerlendirilen geniş bir teknoloji portföyünün parçası olduğunu ortaya koymaktadır (IPCC, 2022).

Bu model projeksiyonlarının analitik değeri kadar epistemik sınırlılıkları da göz ardı edilmemelidir. Uzun vadeli enerji modelleri; teknoloji maliyetleri, yakıt fiyatları, politika sürekliliği, finansman koşulları, inşaat süreleri, enerji talebi büyümesi ve toplumsal kabul gibi değişkenlere ilişkin güçlü varsayımlar içermektedir. Bu varsayımlardaki küçük sapmalar, özellikle 2040–2050 gibi uzun vadeli sonuçlarda ciddi farklılıklar yaratabilmektedir. SMR’ler bakımından bu belirsizlik daha da belirgindir; çünkü ilk ticari projelerin maliyet, lisanslama ve inşaat performansı henüz geniş ölçekte doğrulanmış değildir. Bu nedenle modeller, SMR katkısını bazı senaryolarda oldukça iyimser, bazı senaryolarda ise daha sınırlı düzeyde hesaplamaktadır.

Bu metodolojik çekince dikkate alındığında çıkarılabilecek en güvenilir sonuç şudur: Net sıfır 2050 hedefi, teknoloji yelpazesini mümkün olduğunca geniş tutmayı gerektirmektedir. SMR’ler bu yelpazede fosil yakıtların doğrudan ikamesi olarak değil; düşük karbonlu baz yük üretimi, esnek kapasite planlaması, sanayi karbonsuzlaşması, hidrojen üretimi ve veri merkezleri gibi yeni elektrik talebi alanlarında kullanılabilecek tamamlayıcı bir teknoloji seçeneği olarak anlam kazanmaktadır. Başka bir ifadeyle SMR’lerin net sıfır senaryolarındaki rolü, yenilenebilir enerjilerin yerine geçmekten çok, yüksek yenilenebilir payına sahip sistemlerde arz güvenliği, sistem esnekliği ve düşük karbonlu sürekli üretim ihtiyacını desteklemek üzerinden şekillenmektedir.

Öte yandan net sıfır tartışmasındaki en kritik boyutlardan biri zaman çizelgesidir. 2050 net sıfır hedefi, inşaat süresi teorik olarak 3–7 yıl aralığında öngörülen SMR’ler için yeterli bir zaman penceresi sunuyor gibi görünse de, asıl sorun teknolojik olgunluk döngüsünün politika ve yatırım kararlarıyla senkronize edilmesidir. Net sıfır hedefine anlamlı katkı sağlayabilmesi için 2040–2045 döneminde operasyonel olması gereken bir SMR tesisinin, bugünden lisanslama, saha seçimi, tedarik zinciri, yakıt temini ve finansman kararlarının alınmasını gerektirmesi, politika öngörülebilirliğini stratejik bir ön koşul hâline getirmektedir. Dolayısıyla SMR’lerin net sıfır hedeflerindeki rolü yalnızca teknolojik potansiyele değil, bu potansiyelin zamanında ticarileştirilmesini sağlayacak düzenleyici tutarlılık, kamu desteği ve sanayi kapasitesine bağlıdır.

4.2.1 Aralıklılık Sorunu ve Şebeke Dengesi

SMR’lerin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilişkisini yalnızca “rekabet” çerçevesinde ele almak, bu teknolojilerin enerji sistemindeki farklı işlevsel rollerini göz ardı ettiği için analitik açıdan yanıltıcıdır. Güneş fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi, kaynak bağımlı üretim karakterleri nedeniyle saatlik, mevsimsel ve iklimsel dalgalanmalar göstermektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının düşük karbonlu enerji dönüşümündeki merkezi rolünü ortadan kaldırmamakla birlikte, yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip elektrik sistemlerinde şebeke dengesi, arz güvenliği ve esnek kapasite ihtiyacını daha görünür hâle getirmektedir. Almanya’nın son on yılda inşa ettiği kapsamlı rüzgâr ve güneş kapasitesine rağmen *Dunkelflaute* dönemlerinde, yani düşük rüzgâr ve düşük güneş ışınımının aynı anda yaşandığı koşullarda karşılaştığı sistem baskısı, büyük ölçekli depolama, talep tarafı yönetimi veya düşük karbonlu düzenleyici kapasite olmaksızın yüksek yenilenebilir payının şebeke güvenilirliği açısından zorluklar yaratabileceğini göstermektedir (Heide vd., 2010).

Bu bağlamda SMR’ler, yenilenebilir enerji kaynaklarının yerine geçecek bir alternatif olarak değil, yüksek yenilenebilir payına sahip enerji sistemlerinde tamamlayıcı bir düşük karbonlu kapasite seçeneği olarak değerlendirilmelidir. Geleneksel büyük nükleer santraller çoğunlukla baz yük

üretimiyle ilişkilendirilirken, bazı SMR tasarımlarının daha küçük kapasite birimleri, modüler kurulum yapısı ve potansiyel yük izleme kabiliyeti, onları daha esnek sistem entegrasyonu açısından dikkat çekici hâle getirmektedir. SMR'ler bu çerçevede, rüzgâr ve güneş üretiminin düşük olduğu dönemlerde sistem güvenilirliğini destekleyebilecek, fosil yakıtlı yedek kapasite ihtiyacını azaltabilecek ve düşük karbonlu elektrik arzının sürekliliğine katkı sağlayabilecek bir rol üstlenebilir.

Jenkins vd. (2018), düşük karbonlu elektrik sistemleri üzerine yaptıkları modelleme çalışmalarında, nükleer enerji dâhil olmak üzere düzenlenebilir düşük karbonlu kapasitenin yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip sistemlerde toplam sistem maliyetlerini ve güvenilirlik risklerini azaltabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, net sıfır hedeflerine ulaşmak için yalnızca en düşük birim üretim maliyetine sahip teknolojilere odaklanmanın yeterli olmadığını; aynı zamanda sistem güvenilirliği, esneklik, depolama ihtiyacı ve uzun süreli düşük üretim dönemleri gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Jenkins vd., 2018). Bu argüman, SMR'lerin enerji dönüşümündeki değerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla doğrudan rekabetten değil, yenilenebilir ağırlıklı sistemlerin ihtiyaç duyduğu tamamlayıcı işlevleri üstlenme potansiyelinden kaynaklandığını göstermektedir.

4.3 Hidrojen Ekonomisi ve SMR'lerin Stratejik Konumu

Bazı SMR destekçileri, bu reaktörlerin güneş ve rüzgâr üretiminin yetersiz kaldığı dönemlerde çıkış gücünü artıran, yenilenebilir üretimin bol olduğu dönemlerde ise gücünü azaltan esnek yük izleme modunda çalışabileceğini ileri sürmektedir. Bu iddia teknik açıdan tamamen temelsiz değildir; nitekim bazı nükleer reaktörler belirli sınırlar içinde güç ayarlaması yapabilmekte ve bazı ülkelerde nükleer santraller sınırlı yük izleme operasyonlarında kullanılmaktadır. Ancak bu teknik imkânın, nükleer reaktörleri gerçek zamanlı şebeke dengeleyici bir kaynak hâline getirdiğini varsaymak analitik açıdan yanıltıcıdır.

Nükleer reaktörlerde güç değişimleri; reaktör fiziki, yakıt davranışı ve işletme ekonomisi bakımından çeşitli sınırlamalara tabidir. Reaktör kalbinde Xe-135 gibi nötron soğurucu fizyon ürünlerinin birikimi, güç değişimlerinden sonra reaktivite yönetimini karmaşıklıştırabilmektedir. Ayrıca yakıt çubuklarında ve yapısal bileşenlerde termal gerilmelerin artması, sık ve hızlı güç rampalarının uzun dönemli malzeme davranışı üzerinde olumsuz etkiler yaratma potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle nükleer reaktörler teknik olarak belirli ölçüde yük izleme yapılırsa da, batarya depolama, hidroelektrik veya gaz türbinleri gibi hızlı tepki veren dengeleme kaynaklarıyla aynı esneklik düzeyinde değerlendirilmemelidir.

Ekonomik açıdan bakıldığında sınırlılık daha da belirgindir. Nükleer tesisler yüksek ilk yatırım maliyetleri ve düşük marjinal üretim maliyetleriyle karakterize edildiğinden, ekonomik işletme mantığı genellikle yüksek kapasite faktörüyle çalışmaya dayanmaktadır. Reaktör gücünün sık sık düşürülmesi veya uzun süre düşük kapasitede işletilmesi, üretilen elektrik miktarını azaltarak birim maliyetleri yükseltmekte ve projenin finansal fizibilitesini zayıflatmaktadır. Bu nedenle SMR'lerin yük izleme kapasitesi, teknik bir avantaj olarak değerlendirilse bile, ekonomik açıdan sınırsız ve maliyetsiz bir esneklik biçimi olarak görülmemelidir (Lévêque, 2014). Bu yapısal kısıt, SMR'lerin rolünü "tam esnek dengeleme kaynağı"ndan çok, düşük karbonlu ve kısmen esnek düzenlenebilir kapasite sağlayıcısı olarak konumlandırılmayı gerektirmektedir.

Bununla birlikte bazı ileri nesil SMR tasarımları, bu teknik ve ekonomik kısıtları kısmen aşmaya yönelik yenilikçi sistem mimarileri önermektedir. TerraPower'ın Natrium reaktörü, sodyum soğutmalı hızlı reaktör teknolojisini erimiş tuz enerji depolama sistemiyle entegre eden hibrit bir yaklaşım sunmaktadır. Bu modelde reaktör daha istikrarlı bir termal güç düzeyinde çalışırken, depolama sistemi elektrik üretimini şebeke talebine göre artırıp azaltabilmektedir. Böylece reaktörün yüksek kapasite faktörüyle çalışma ihtiyacı ile elektrik sisteminin esneklik gereksinimi arasında daha dengeli bir ilişki kurulması hedeflenmektedir (TerraPower, 2023).

Benzer biçimde bazı yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktör ve ileri reaktör tasarımları, yalnızca elektrik üretimine değil, endüstriyel ısı, hidrojen üretimi veya bölgesel ısıtma gibi farklı enerji hizmetlerine de yönlendirilebilecek biçimde tasarlanmaktadır. Bu tür çok amaçlı kullanım senaryolarında, şebeke elektrik talebinin düşük olduğu dönemlerde reaktörün termal çıktısı sanayi proseslerine veya hidrojen üretimine aktarılabilir. Böylece reaktörün toplam kapasite kullanımı korunurken, elektrik sistemine verilen güç daha esnek biçimde yönetilebilir. Bu yaklaşım, SMR'lerin yük izleme kapasitesini yalnızca reaktör gücünü artırıp azaltma meselesi olarak değil, elektrik, ısı ve depolama arasında akıllı enerji yönlendirmesi yapabilen hibrit sistem mimarileri içinde değerlendirmek gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak SMR'lerin yenilenebilir enerji ağırlıklı sistemlerdeki esneklik rolü, abartılı beklentilerden arındırılarak ele alınmalıdır. SMR'ler kısa süreli ve hızlı şebeke dengeleme işlevini tek başına üstlenecek kaynaklar değildir; ancak depolama, hidrojen üretimi, endüstriyel ısı uygulamaları ve gelişmiş kontrol sistemleriyle entegre edildiklerinde düşük karbonlu enerji sistemlerinde önemli bir düzenlenebilir kapasite unsuru hâline gelebilirler. Bu nedenle SMR'lerin yük izleme kapasitesi, teknik olarak mümkün fakat ekonomik ve operasyonel olarak sınırlı bir özellik olarak değerlendirilmelidir.

4.3.1 Nükleer Hidrojen Üretim Yolları

Hidrojen, enerji dönüşümü literatüründe özellikle karbonsuzlaştırılması zor sektörler açısından stratejik bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte hidrojen ekonomisi henüz ticari ölçekte tam rekabetçi maliyetlere ulaşmış değildir. IEA'ya göre mevcut küresel hidrojen üretiminin büyük çoğunluğu fosil yakıtlara dayalı gri ve mavi hidrojen üretiminden oluşmakta; düşük karbonlu veya yenilenebilir kaynaklı hidrojen ise toplam üretim içinde oldukça sınırlı bir paya sahip bulunmaktadır (IEA, 2023). Bu yapının dönüşmesi, net sıfır hedefleri açısından kritik önemdedir. Çünkü demir-çelik üretimi, amonyak sentezi, uzun mesafe deniz taşımacılığı, rafineri süreçleri ve bazı kimyasal üretim alanları doğrudan elektrifikasyonun zor olduğu sektörler arasında yer almakta; bu alanlarda düşük karbonlu hidrojen önemli bir karbonsuzlaşma seçeneği sunmaktadır. SMR'ler bu denklemde hidrojen ekonomisine üç temel kanal üzerinden katkı sağlayabilir.

İlk kanal, konvansiyonel düşük sıcaklık elektrolizi için elektrik üretimidir. Bu yöntemde SMR'lerden elde edilen düşük karbonlu elektrik, alkalın elektroliz veya PEM elektroliz sistemlerinde suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılması için kullanılmaktadır. Bu yaklaşım teknik açıdan olgun ve uygulanabilir olmakla birlikte, ekonomik rekabetçiliği tartışmalıdır. Güneş ve rüzgâr enerjisinden üretilen elektriğin maliyetinin düşmesi, elektroliz yoluyla üretilen hidrojen piyasasında nükleer elektriğin maliyet avantajını sınırlayabilir. Buna karşılık SMR'lerin kesintisiz ve yüksek kapasite faktörüyle çalışabilmesi, elektrolizörlerin daha yüksek kullanım oranına

ulaşmasını sağlayarak bazı sistemlerde maliyet dengesini iyileştirebilir. Dolayısıyla bu kanalın rekabetçiliği, yalnızca elektrik üretim maliyetine değil, elektrolizör kapasite faktörüne, şebeke koşullarına, karbon fiyatına ve hidrojen talebinin sürekliliğine bağlıdır.

İkinci ve daha stratejik kanal, yüksek sıcaklık buharlı elektrolizdir. Yüksek sıcaklık buharlı elektroliz (*High Temperature Steam Electrolysis* — HTSE), elektrik enerjisinin yanı sıra yüksek sıcaklıkta ısı girdisine de ihtiyaç duyan bir süreçtir. Bu nedenle yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler, bazı erimiş tuz reaktörü tasarımları ve ileri nesil yüksek sıcaklık SMR konseptleri HTSE için özel bir potansiyel taşımaktadır. Bu sistemlerde reaktörün ürettiği ısı, suyun buhar hâline getirilmesi ve elektroliz sürecinin enerji ihtiyacının azaltılması için kullanılmakta; böylece yalnızca elektrik kullanan düşük sıcaklık elektroliz yöntemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği elde edilebilmektedir. Literatürde, yüksek sıcaklık elektrolizinin uygun reaktör entegrasyonu ile geleneksel elektrolize göre kayda değer verimlilik avantajı sağlayabileceği belirtilmektedir (Naterer vd., 2019). Bu avantaj, özellikle büyük ölçekli ve sürekli hidrojen talebine sahip endüstriyel tesislerde nükleer kaynaklı hidrojenin ekonomik değerini artırabilir.

Üçüncü kanal ise termokimyasal su ayrıştırma döngüleridir. Kükürt-iyot döngüsü ve hibrit sülfür döngüsü gibi yöntemler, çok yüksek sıcaklıkta çalışan reaktörlerin sağladığı ısıyı doğrudan kimyasal süreçlerde kullanarak sudan hidrojen üretmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşımda ısı enerjisinin önce elektriğe dönüştürülmesine gerek kalmadığından, teorik olarak yüksek verimlilik potansiyeli bulunmaktadır. Ancak bu süreçler malzeme dayanımı, korozyon kontrolü, kimyasal ayırma aşamaları, yüksek sıcaklıkta güvenli işletme ve endüstriyel ölçek büyütme gibi önemli teknik zorluklar barındırmaktadır. Bu nedenle termokimyasal hidrojen üretim yolları, uzun vadede yüksek potansiyel taşımaya rağmen, bugün için ticari olgunluktan ziyade araştırma, geliştirme ve demonstrasyon aşamasında değerlendirilmektedir (IAEA, 2022).

Türkiye gibi hem nükleer enerji hem de hidrojen stratejisi geliştirmekte olan ülkeler açısından bu üç kanalın ayrı ayrı değerlendirilmesi önemlidir. Kısa vadede SMR destekli düşük sıcaklık elektrolizi daha uygulanabilir bir seçenek olarak öne çıkarken, orta ve uzun vadede yüksek sıcaklık buharlı elektroliz ve termokimyasal döngüler daha yüksek verimlilik ve sanayi entegrasyonu potansiyeli sunabilir. Bu nedenle nükleer hidrojen stratejisi, tek bir teknoloji seçimine indirgenmemeli; elektrik üretimi, proses ısı, hidrojen talep merkezleri, sanayi bölgeleri, altyapı yatırımları ve Ar-Ge kapasitesi birlikte değerlendirilerek kademeli biçimde tasarlanmalıdır.

4.3.2 Nükleer Hidrojenin Jeopolitik Boyutu

Hidrojen ekonomisinin jeopolitiği, son yıllarda enerji güvenliği tartışmalarının yeni ve giderek önem kazanan eksenlerinden biri hâline gelmiştir. Doğal gaz ticareti büyük ölçüde coğrafi yakınlık, boru hattı altyapısı ve uzun vadeli tedarik ilişkileri üzerinden şekillenirken; hidrojenin özellikle sıvılaştırılmış hidrojen, amonyak veya sentetik yakıt formunda uzun mesafeli deniz taşımacılığına konu edilebilmesi, küresel enerji ticaret coğrafyasını yeniden biçimlendirme potansiyeli taşımaktadır (Pflugmann ve De Blasio, 2020). Bu durum, hidrojenin yalnızca bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda yeni enerji bağımlılıkları, ticaret koridorları ve teknoloji rekabeti üreten stratejik bir unsur olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Bu dönüşüm içinde nükleer hidrojen özel bir konuma sahiptir. Yenilenebilir kaynaklı hidrojen üretimi büyük ölçüde güneş ve rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu coğrafyalara bağlıyken, nükleer hidrojen üretimi kaynak coğrafyasına daha az bağımlı bir yapı sunmaktadır. Nükleer

reaktörlerin yüksek kapasite faktörüyle sürekli çalışabilmesi, hidrojen üretim tesislerinin de daha kararlı ve yüksek kullanım oranıyla işletilmesine olanak tanıyabilir. Bu özellik, nükleer hidrojeni özellikle sürekli talep gerektiren demir-çelik, amonyak, rafineri ve kimya sanayii gibi sektörler açısından stratejik bir seçenek hâline getirmektedir. Ayrıca SMR'lerin daha küçük ölçekli ve modüler yapısı, hidrojen üretiminin büyük merkezi tesislerle sınırlı kalmadan sanayi bölgelerine, limanlara veya enerji yoğun endüstriyel kümelerle yakın biçimde konumlandırılabilmesi açısından ek bir avantaj sağlayabilir.

Jeopolitik açıdan nükleer hidrojen, enerji ithalatçısı ve transit ülkeler için yeni konumlanma fırsatları yaratmaktadır. Hidrojen ticaretinin gelecekte yalnızca üretici ve tüketici ülkeler arasında değil, aynı zamanda dönüştürme, depolama, taşıma ve yeniden ihracat merkezleri üzerinden şekillenmesi beklenmektedir. Bu bağlamda hidrojenin amonyak veya sentetik yakıt formuna dönüştürülmesi, liman altyapıları, boru hattı dönüşümü ve endüstriyel kullanım merkezleri, yeni enerji jeopolitiğinin kritik unsurları hâline gelebilir.

Türkiye açısından bu tablo özel bir önem taşımaktadır. Türkiye'nin Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Orta Asya'daki potansiyel hidrojen üretim bölgeleri ile Avrupa'daki tüketim merkezleri arasında yer alması, ülkeye hidrojen ticaretinde transit, dönüştürme ve bölgesel dağıtım merkezi olma potansiyeli sunmaktadır. Ancak bu potansiyelin stratejik değere dönüşebilmesi için yalnızca coğrafi konum yeterli değildir. Hidrojen depolama altyapısı, liman ve amonyak terminalleri, boru hattı dönüşüm kapasitesi, düşük karbonlu elektrik üretimi, sanayi talebi ve uluslararası sertifikasyon mekanizmaları birlikte geliştirilmelidir. Bu çerçevede nükleer kökenli hidrojen, Türkiye'nin hem enerji arz güvenliğini güçlendirebilecek hem de Avrupa'nın düşük karbonlu hidrojen talebiyle bağlantı kurmasını sağlayabilecek tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

Bununla birlikte nükleer hidrojenin jeopolitik avantajları, teknolojinin kendiliğinden rekabetçi olacağı anlamına gelmemektedir. Üretim maliyetleri, elektrolizör kapasite faktörü, karbon fiyatları, hidrojen taşıma altyapısı, uluslararası düşük karbonlu hidrojen sertifikasyonu ve nükleer teknolojiye yönelik toplumsal kabul gibi unsurlar, bu stratejinin başarısını doğrudan etkileyecektir. Dolayısıyla nükleer hidrojen, geleceğin enerji jeopolitiğinde önemli bir seçenek olarak görülmeli; ancak bu seçenek, gerçekçi maliyet analizleri ve uzun vadeli altyapı planlamasıyla desteklenmediği sürece sınırlı bir potansiyel olarak kalacaktır.

4.4 Ağır Sanayinin Karbonsuzlaştırılması: SMR'lerin En Stratejik Değer Önerisi

4.4.1 Demir-Çelik Endüstrisi

Küresel çelik üretimi, dünya toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7–8'inden sorumlu olup, enerji dönüşümü tartışmalarında karbonsuzlaştırılması en zor sektörlerden biri olarak değerlendirilmektedir (World Steel Association, 2023). Bunun temel nedeni, mevcut baskın üretim yöntemi olan yüksek fırın-bazik oksijen fırını sürecinin (*Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace* — BF-BOF) hem yüksek sıcaklıkta sürekli enerji girdisine hem de kok kömürü gibi karbonlu indirgeyicilere dayanmasıdır. Dolayısıyla çelik sektörünün karbonsuzlaştırılması yalnızca elektrik üretiminin düşük karbonlu hâle getirilmesiyle sınırlı değildir; aynı zamanda üretim sürecinde kullanılan indirgeme kimyasının, ısı girdisinin ve proses altyapısının da dönüştürülmesini gerektirmektedir.

Bu dönüşümde öne çıkan başlıca teknoloji yollarından biri, doğrudan indirgeme demiri (*Direct Reduced Iron — DRI*) ve elektrik ark fırını (*Electric Arc Furnace — EAF*) kombinasyonudur. DRI sürecinde demir cevheri doğal gaz veya düşük karbonlu hidrojen kullanılarak doğrudan indirgenmekte, ardından elde edilen sünger demir elektrik ark fırınlarında çeliğe dönüştürülmektedir. Hidrojen temelli DRI-EAF yolu, fosil karbon kullanımını büyük ölçüde azaltma potansiyeli taşıdığı için çelik sektörünün net sıfır senaryolarında merkezi bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (IEA, 2020).

SMR'lerin bu süreçteki rolü iki katmanlıdır. Birinci katkı, elektrik ark fırınları için büyük ölçekli, kararlı ve düşük karbonlu elektrik teminidir. EAF tesisleri yüksek elektrik talebine sahip olduğundan, bu elektriğin fosil yakıtlardan değil düşük karbonlu kaynaklardan sağlanması çelik üretiminin toplam karbon ayak izi açısından belirleyicidir. İkinci katkı ise DRI sürecinde kullanılacak düşük karbonlu hidrojenin üretimidir. SMR'ler, elektroliz sistemlerine sürekli elektrik sağlayarak veya ileri tasarımlarda yüksek sıcaklık ısısını hidrojen üretim süreçleriyle entegre ederek çelik üretimi için gerekli hidrojenin düşük karbonlu biçimde üretilmesine katkıda bulunabilir.

Bu iki katkı birlikte değerlendirildiğinde, SMR'lerin demir-çelik sektöründeki stratejik değeri daha net ortaya çıkmaktadır. SMR'ler yalnızca elektrik sağlayan bir santral olarak değil, çelik üretim tesisleriyle entegre çalışabilecek düşük karbonlu enerji altyapısı olarak düşünülmelidir. Özellikle büyük sanayi kümelerinde SMR, EAF elektrik talebini karşılayan, hidrojen üretimini destekleyen ve gerektiğinde proses ısısı sağlayan çok işlevli bir enerji merkezi rolü üstlenebilir. Bu nedenle çelik sektörü, SMR'lerin yalnızca şebeke elektriği üretimindeki değil, ağır sanayi karbonsuzlaşmasındaki en güçlü uygulama alanlarından biri olarak değerlendirilebilir.

Türkiye bağlamında bu analiz özel bir önem taşımaktadır. Türkiye, küresel ölçekte önemli çelik üreticileri arasında yer almakta ve demir-çelik sektörü ülkenin sanayi enerji tüketiminde kritik bir pay oluşturmaktadır. Aynı zamanda Türkiye'nin çelik ihracatının önemli bir bölümü Avrupa pazarlarıyla bağlantılıdır. Avrupa Birliği'nin Sınırdan Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM/CBAM), karbon yoğun üretim yapan sektörlerde ihracat maliyetlerini artırma potansiyeli taşıdığı için Türk çelik sanayisinin orta ve uzun vadeli rekabetçiliği açısından doğrudan belirleyici olacaktır. Bu durum, çelik sektöründe düşük karbonlu üretim teknolojilerine geçişi yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda sanayi politikası ve dış ticaret stratejisi meselesi hâline getirmektedir.

Bu koşullarda SMR destekli düşük karbonlu çelik üretimi, Türkiye açısından üç düzeyde stratejik anlam taşımaktadır. Birincisi, sanayinin yüksek ve sürekli enerji ihtiyacını düşük karbonlu kaynaklarla karşılayarak enerji arz güvenliğine katkı sağlayabilir. İkincisi, hidrojen temelli DRI-EAF dönüşümünü destekleyerek çelik sektörünün karbon yoğunluğunu azaltabilir. Üçüncüsü, CBAM benzeri düzenlemeler karşısında Türk çelik ihracatçılarının rekabet gücünü korumasına yardımcı olabilir. Dolayısıyla SMR'lerin demir-çelik sektörüyle entegrasyonu, yalnızca nükleer enerji politikası kapsamında değil; Türkiye'nin sanayi dönüşümü, ihracat rekabetçiliği ve düşük karbonlu kalkınma stratejisi bağlamında da değerlendirilmesi gereken kritik bir seçenektir.

4.4.2 Amonyak ve Gübre Üretimi

Haber-Bosch süreciyle gerçekleştirilen amonyak sentezi, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %1–2'sinden sorumlu olmakla birlikte, modern tarımsal üretkenliğin sürdürülmesi

açısından vazgeçilmez bir sanayi sürecidir (IEA, 2021; IPCC, 2022). Amonyak, azotlu gübre üretiminin temel girdisi olduğu için gıda güvenliğiyle doğrudan bağlantılıdır (Food and Agriculture Organization [FAO], 2023). Bu nedenle amonyak üretiminin karbonsuzlaştırılması, yalnızca enerji dönüşümü ya da sanayi politikası açısından değil, aynı zamanda tarımsal sürdürülebilirlik ve gıda arz güvenliği bakımından da stratejik önem taşımaktadır (IEA, 2021; IPCC, 2022).

Mevcut amonyak üretiminin büyük bölümü, doğal gaz veya kömürden elde edilen hidrojenin kullanıldığı karbon yoğun süreçlere dayanmaktadır (IEA, 2021). Bu yapının dönüştürülmesi için öncelikle Haber–Bosch sürecinde kullanılan hidrojenin fosil yakıt kaynaklı üretimden çıkarılarak düşük karbonlu alternatiflerle ikame edilmesi gerekmektedir. Bu alternatifler arasında yenilenebilir elektrikle üretilen yeşil hidrojenin yanı sıra, nükleer enerji kaynaklı düşük karbonlu hidrojen de önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (IAEA, 2023; OECD-NEA, 2024). SMR’ler bu noktada, elektroliz sistemleri için sürekli ve düşük karbonlu elektrik sağlayarak veya ıleri tasarımlarda proses ısısı desteği sunarak amonyak üretiminin karbon yoğunluğunu azaltmaya katkıda bulunabilir (IAEA, 2023; World Nuclear Association, 2025).

SMR destekli amonyak üretiminin temel avantajı, yüksek kapasite faktörü ve sürekli üretim imkânıdır. Amonyak tesisleri genellikle kesintisiz çalışmayı gerektiren büyük ölçekli endüstriyel yapılardır (IEA, 2021). Bu nedenle yalnızca değişken yenilenebilir kaynaklara dayalı hidrojen üretimi, depolama ve sistem dengeleme maliyetlerini artırabilir. Buna karşılık SMR’ler, amonyak tesislerinin ihtiyaç duyduğu kararlı elektrik ve olası ısı girdisini sağlayarak elektrolizörlerin daha yüksek kapasite faktörüyle çalışmasına olanak tanıyabilir (OECD-NEA, 2024; IAEA, 2023).

Türkiye açısından bu uygulama alanı özel bir önem taşımaktadır. Türkiye, tarımsal üretim kapasitesi ve gübre talebi bakımından önemli bir pazara sahip olmakla birlikte, doğal gaz ve gübre hammaddeleri açısından dışa bağımlılık sorunuyla karşı karşıyadır (World Bank, 2023). Bu nedenle düşük karbonlu yerli amonyak üretimi, yalnızca sanayi karbonsuzlaşması değil, aynı zamanda tarımsal girdi güvenliği ve dış ticaret dengesi açısından da stratejik bir değer taşıyabilir (FAO, 2023). Özellikle bölgesel ölçekli SMR destekli hidrojen–amonyak tesisleri, düşük karbonlu sanayi altyapısı ve gübre arz güvenliği açısından dikkat çekici bir seçenek oluşturabilir.

Bununla birlikte SMR destekli amonyak üretiminin kısa vadede doğrudan uygulanabilir ve ekonomik açıdan kesin bir çözüm olduğu varsayılmamalıdır. Bu modelin başarısı; SMR maliyetlerine, elektrolizör teknolojisinin olgunlaşmasına, hidrojen depolama altyapısına, amonyak tesislerinin ölçeğine, karbon fiyatlandırmasına ve düşük karbonlu gübre ürünlerine yönelik piyasa talebine bağlıdır (IPCC, 2022; OECD-NEA, 2024). Dolayısıyla SMR’lerin amonyak ve gübre üretimindeki rolü, uzun vadeli sanayi karbonsuzlaşması stratejisinin bir parçası olarak değerlendirilmelidir.

4.4.3 Petrokimya, Çimento ve Madencilik Uygulamaları

Yüksek sıcaklık süreç ısısı; petrokimya rafinerileri, çimento üretimi, metalurjik işlemler ve madencilik faaliyetleri gibi ağır sanayi alanlarında kritik bir enerji girdisi oluşturmaktadır. Bu sektörlerde kullanılan ısı yoğunlukla doğal gaz, kömür, petrol türevleri veya kok gibi fosil yakıt kaynaklarından sağlanmakta; dolayısıyla endüstriyel süreç ısısının karbonsuzlaştırılması, elektrik üretiminin karbonsuzlaştırılmasına kıyasla çok daha karmaşık bir dönüşüm alanı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle 500°C üzerindeki proseslerde, yalnızca düşük karbonlu elektrik üretmek

yeterli olmamakta; yüksek sıcaklıkta, sürekli, güvenilir ve ekonomik ısı arzı sağlayabilecek teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Güneş ve rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi açısından düşük karbonlu dönüşümün temel bileşenleri olmakla birlikte, yüksek sıcaklık sanayi ısısının kesintisiz ve doğrudan karşılanması açısından bazı sınırlılıklar taşımaktadır. Elektrikli fırınlar, dirençli ısıtma sistemleri, plazma teknolojileri ve ısı pompaları belirli uygulamalarda çözüm sunabilse de, çimento klinker üretimi, rafineri prosesleri ve bazı metalurjik işlemler gibi yüksek sıcaklık ve sürekli enerji gerektiren alanlarda maliyet, ölçek ve sistem güvenilirliği sorunları devam etmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklık SMR tasarımları —özellikle yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler ve bazı erimiş tuz reaktörü konseptleri— endüstriyel süreç ısısının karbonsuzlaştırılması açısından önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

SMR'lerin bu alandaki stratejik değeri, yalnızca elektrik üretiminden değil, elektrik ve ısıyı birlikte sağlayabilme potansiyelinden kaynaklanmaktadır. Petrokimya tesislerinde buhar üretimi, hidrojen üretimi ve rafineri prosesleri için; çimento sektöründe yüksek sıcaklık ısı girdisi ve elektrik ihtiyacı için; madencilikte ise hem elektrikli ekipmanların beslenmesi hem de cevher işleme süreçlerinin enerji ihtiyacı için SMR tabanlı entegre enerji merkezleri düşünülebilir. Bu model, özellikle şebeke bağlantısının zayıf olduğu, enerji talebinin sürekli olduğu ve fosil yakıt lojistiğinin maliyetli olduğu bölgelerde daha anlamlı hâle gelmektedir.

Türkiye açısından bakıldığında, petrokimya, çimento ve madencilik sektörleri SMR uygulamaları için dikkat çekici potansiyel alanlar sunmaktadır. Türkiye'nin çimento üretimindeki güçlü konumu, petrokimya yatırımlarındaki dışa bağımlılığı azaltma hedefi ve Güneydoğu Anadolu ile Doğu Anadolu'daki bakır, krom, fosfat ve diğer maden sahaları dikkate alındığında, küçük veya orta ölçekli SMR'lerin sanayi kümeleriyle entegre biçimde değerlendirilmesi stratejik önem taşıyabilir. Özellikle enerji yoğun madencilik ve cevher işleme faaliyetlerinde SMR'ler, hem düşük karbonlu elektrik hem de yüksek sıcaklık ısı sağlayarak fosil yakıt bağımlılığını azaltma potansiyeline sahiptir.

Bununla birlikte bu potansiyelin gerçekleşmesi, yalnızca reaktör teknolojisinin teknik kapasitesine bağlı değildir. Yüksek sıcaklık SMR tasarımlarının ticari olgunluk düzeyi, sanayi tesisleriyle güvenli ısı entegrasyonu, lisanslama süreçleri, saha seçimi, soğutma suyu ihtiyacı, yerel kabul, yatırım maliyeti ve uzun vadeli enerji satın alma anlaşmaları gibi unsurlar belirleyici olacaktır. Bu nedenle petrokimya, çimento ve madencilik uygulamaları SMR'ler için güçlü bir değer önerisi sunmakla birlikte, bu alanın kısa vadeli kesin bir çözümden ziyade orta ve uzun vadeli sanayi karbonsuzlaşması stratejisinin parçası olarak ele alınması daha doğru olacaktır.

4.5 Veri Merkezleri, Yapay Zekâ Ekonomisi ve SMR'lerin Yeni Kurumsal Talebi

Yapay zekâ modellerinin eğitim ve çıkarım süreçlerinde tüketilen enerji, enerji politikası gündeminin hızla büyüyen yeni başlıklarından biri hâline gelmiştir. IEA'nın *Energy and AI* raporuna göre küresel veri merkezi elektrik tüketimi 2024 yılında yaklaşık 415 TWh düzeyinde gerçekleşmiş ve bu değer küresel elektrik tüketiminin yaklaşık %1,5'ine karşılık gelmiştir. Aynı raporun temel senaryosunda veri merkezi elektrik tüketiminin 2030'a kadar yaklaşık iki katına çıkarak 945 TWh düzeyine ulaşacağı ve küresel elektrik talebinin yaklaşık %3'ünü oluşturacağı öngörülmektedir (IEA, 2025). Bu büyümenin en önemli dinamiklerinden biri, yapay zekâ

uygulamalarında kullanılan hızlandırılmış sunucuların ve yüksek yoğunluklu hesaplama altyapılarının hızla yaygınlaşmasıdır.

Veri merkezleri, elektrik sistemi açısından klasik sanayi yüklerinden farklı bir profil sergilemektedir. Bu tesisler 7/24 kesintisiz, yüksek kaliteli, güvenilir ve öngörülebilir elektrik arzına ihtiyaç duymaktadır. Enerji kesintileri yalnızca operasyonel aksamalara değil, veri kaybı, hizmet sürekliliği sorunları ve yüksek finansal maliyetlere de yol açabilmektedir. Bu nedenle yapay zekâ odaklı veri merkezlerinin enerji talebi, yalnızca miktar bakımından değil, arz güvenilirliği ve süreklilik gereksinimi bakımından da enerji planlamasında yeni bir baskı alanı yaratmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerjisi düşük karbonlu elektrik üretiminin temel bileşenleri olmakla birlikte, bu kaynakların değişken üretim karakteri veri merkezlerinin sürekli güç ihtiyacıyla doğrudan örtüşmemektedir. Bu durum, depolama, şebeke yatırımları, uzun vadeli güç satın alma anlaşmaları ve düzenlenebilir düşük karbonlu kaynaklara olan ilgiyi artırmaktadır.

Bu yapısal gereksinim, büyük teknoloji şirketlerini nükleer enerjiye yönelik uzun vadeli sözleşmelere ve yeni nesil reaktör projelerine yönlendirmektedir. Microsoft'un Constellation Energy ile Three Mile Island Unit 1'in Crane Clean Energy Center adıyla yeniden devreye alınmasına yönelik 20 yıllık güç satın alma anlaşması, doğrudan bir SMR projesi olmamakla birlikte, büyük teknoloji şirketlerinin nükleer enerjiyi veri merkezi ve yapay zekâ altyapısı için stratejik bir enerji kaynağı olarak konumlandırmaya başladığını göstermektedir. Google'ın Kairos Power ile 2035'e kadar toplam 500 MW'a ulaşması hedeflenen ileri nükleer kapasite anlaşması ise yeni nesil reaktör teknolojilerine yönelik kurumsal talebin daha doğrudan bir örneğini oluşturmaktadır. Benzer şekilde Amazon'un X-energy ve Energy Northwest ile geliştirdiği proje, başlangıçta yaklaşık 320 MW'lık kapasiteyi hedeflemekte ve ilerleyen aşamalarda 960 MW'a kadar genişleme potansiyeli taşımaktadır. Meta'nın 1-4 GW yeni nükleer kapasite için proje geliştirici çağrısı yayımlaması da bu eğilimin tekil şirket kararlarından ibaret olmadığını, yapay zekâ ekonomisinin enerji altyapısında daha geniş bir dönüşüme işaret ettiğini ortaya koymaktadır (EPRI, 2024).

Bu kurumsal talep sinyali, SMR teknolojileri açısından kritik bir piyasa unsuru oluşturmaktadır. SMR projelerinin en önemli sorunlarından biri, ilk ticari uygulamalarda maliyet ve talep belirsizliğinin yüksek olmasıdır. Büyük teknoloji şirketleriyle yapılacak uzun vadeli güç satın alma anlaşmaları, proje gelirlerini öngörülebilir hâle getirerek finansman maliyetlerini azaltabilir, yatırımcı güvenini artırabilir ve ilk ticari projelerin hayata geçirilmesini kolaylaştırabilir. Bu açıdan veri merkezleri, SMR'ler için yalnızca yeni bir elektrik tüketim alanı değil, aynı zamanda erken dönem ticarileşmeyi destekleyebilecek güçlü bir kurumsal müşteri tabanı anlamına gelmektedir.

Bununla birlikte veri merkezleri ile SMR'ler arasındaki ilişki abartısız ve gerçekçi biçimde değerlendirilmelidir. SMR projelerinin lisanslama, inşaat, yakıt tedariki ve maliyet doğrulaması hâlen önemli belirsizlikler taşımaktadır. Veri merkezlerinin enerji talebi ise çok daha hızlı büyümekte ve çoğu tesis iki-üç yıl gibi kısa sürelerde devreye alınabilmektedir. Buna karşılık nükleer projeler, özellikle ilk ticari uygulamalarda daha uzun planlama ve lisanslama süreçleri gerektirmektedir. Bu zaman uyumsuzluğu, kısa vadede veri merkezlerinin enerji ihtiyacının büyük ölçüde şebeke yatırımları, yenilenebilir enerji sözleşmeleri, depolama ve bazı bölgelerde doğal gaz santralleriyle karşılanabileceğini göstermektedir. SMR'lerin bu alandaki asıl stratejik değeri ise orta ve uzun vadede, büyük veri merkezi kümelerine düşük karbonlu, sürekli ve yüksek güvenilirlikli elektrik sağlayabilecek bir altyapı seçeneği sunmasından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak yapay zekâ ekonomisinin enerji talebi, SMR teknolojileri için yeni ve güçlü bir kurumsal pazar oluşturma potansiyeline sahiptir. Veri merkezleri, yüksek kapasite faktörü, arz güvenilirliği ve karbonsuz elektrik talebi bakımından SMR'lerin değer önerisiyle önemli ölçüde örtüşmektedir. Ancak bu potansiyelin gerçekleşmesi, SMR projelerinin zamanında lisanslanmasına, maliyetlerinin öngörülebilir hâle gelmesine, yakıt tedarik zincirinin güvence altına alınmasına ve teknoloji şirketlerinin uzun vadeli sözleşme taahhütlerini sürdürmesine bağlıdır. Bu nedenle yapay zekâ ve veri merkezi talebi, SMR'lerin ticarileşmesi için önemli bir ivme yaratabilir; fakat tek başına teknolojinin ekonomik başarısını garanti eden bir unsur olarak görülmemelidir.

5. SMR TEKNOLOJİLERİNİN JEOPOLİTİĞİ

5.1 'Nükleer Kilit Etkisi' (Nuclear Lock-in)

Bir ülkenin belirli bir nükleer teknoloji tedarikçisine bağlandıktan sonra, bu bağı yüksek maliyetler ve operasyonel riskler üstlenmeden değiştirmesi son derece güçtür. Bu olgu, enerji sistemleri literatüründe “yol bağımlılığı” (*path dependency*) ya da nükleer teknoloji bağlamında “nükleer kilit etkisi” (*nuclear lock-in*) olarak kavramsallaştırılabilir (Cowan, 1990). Nükleer enerji projeleri, diğer enerji teknolojilerinden farklı olarak yalnızca santral inşaatını değil; lisanslama standartlarını, yakıt tedarik zincirini, bakım ve yedek parça altyapısını, operatör eğitimini, güvenlik kültürünü, atık yönetimini ve düzenleyici bilgi birikimini de kapsayan uzun vadeli bir teknoloji ekosistemi yaratmaktadır.

Nükleer kilit etkisinin mekanizması çok katmanlıdır. İlk olarak, reaktör tasarımının lisanslanması ve güvenlik analizleri belirli bir teknoloji ailesine göre şekillendiğinden, sonraki ünitelerde aynı tedarikçiye yönelmek düzenleyici ve teknik açıdan daha kolay hâle gelmektedir. İkinci olarak, yakıt demeti tasarımı, yakıt üretimi, zenginleştirme düzeyi ve tedarik zinciri çoğu zaman reaktör teknolojisine özgü olduğundan, yakıt tedariki uzun vadeli bağımlılık ilişkileri yaratmaktadır. Üçüncü olarak, yedek parça, yazılım güncellemeleri, dijital kontrol sistemleri, bakım prosedürleri ve teknik dokümantasyon çoğunlukla tedarikçi ülkenin veya şirketin kontrolünde kalmaktadır. Dördüncü olarak, operatör eğitimi ve güvenlik kültürü de belirli bir reaktör teknolojisinin işletme mantığına göre inşa edilmektedir. Bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, bir nükleer teknoloji tercihinin yalnızca bugünkü reaktör seçimi değil, onlarca yıla yayılan stratejik bir bağımlılık kararı olduğu görülmektedir.

Bu analiz Türkiye açısından son derece somut sonuçlar doğurmaktadır. Akkuyu NGS'nin Rosatom merkezli inşa et-sahip ol-işlet (*build-own-operate* — BOO) modeliyle yürütülmesi, Türkiye'nin nükleer enerjiye girişinde önemli bir kapasite kazanımı sağlarken, aynı zamanda teknoloji, yakıt, işletme ve kurumsal bağımlılık tartışmalarını da beraberinde getirmektedir. Akkuyu modeli, Türkiye'nin ilk büyük ölçekli nükleer santral deneyimini hızlandırması bakımından avantajlı görünse de, uzun vadede nükleer değer zincirinin kritik halkalarında Rusya merkezli bir bağımlılık yapısı oluşturma potansiyeli taşımaktadır.

Bu nedenle Türkiye'nin gelecekteki SMR stratejisinde aynı veya benzer bir bağımlılık modelini tekrar etmesi, nükleer teknoloji portföyünü çeşitlendirme imkânını zayıflatırabilir. İkinci bir nükleer açılımın da tek bir tedarikçi, tek bir yakıt zinciri ve tek bir işletme modeli etrafında şekillenmesi, Türkiye'nin stratejik otonomi kapasitesini sınırlandıracak ve kriz dönemlerinde dış politika kırılganlıklarını artırabilecektir. Buna karşılık SMR teknolojilerinde tedarikçi çeşitlendirmesi, yerli insan kaynağı geliştirme, yakıt tedarik güvenliği, bakım-onarım kapasitesinin millileştirilmesi ve düzenleyici bağımsızlığın güçlendirilmesi, Türkiye'nin nükleer kilit etkisini azaltmasına katkı sağlayabilir.

5.2 Nükleer Teknoloji İhracatı ve Yumuşak Güç

Nükleer teknoloji ihracatı, yalnızca ticari bir faaliyet değil, aynı zamanda uzun vadeli diplomatik etki üreten güçlü bir yumuşak güç aracıdır. Bir nükleer santral projesi, reaktör inşaatı tamamlandıktan sonra dahi onlarca yıl sürebilecek teknik iş birliği, yakıt tedariki, bakım

hizmetleri, mühendislik eğitimleri, akademik değişim programları ve düzenleyici kapasite geliştirme faaliyetleri için kalıcı bir zemin oluşturmaktadır. Bu süreç, tedarikçi ve alıcı ülke arasında yalnızca kurumsal ilişkileri değil, aynı zamanda insan kaynağı ağlarını, uzman topluluklarını ve teknik kültür paylaşımını da güçlendirmektedir. Dolayısıyla nükleer teknoloji ihracatı, zaman içinde ekonomik iş birliğini aşarak daha geniş bir stratejik yakınlaşma dinamiğine dönüşebilmektedir.

Birleşik Arap Emirlikleri'nin Barakah NGS projesi üzerinden Güney Kore ile geliştirdiği ilişki, bu olgunun dikkat çekici örneklerinden biridir. 2009 yılında imzalanan nükleer santral anlaşması, başlangıçta bir enerji altyapısı yatırımı olarak görülse de, ilerleyen yıllarda iki ülke arasındaki ilişkilerin savunma, uzay, sanayi ve ekonomik ortaklık alanlarına doğru genişlemesine katkı sağlamıştır. Bu örnek, nükleer teknoloji ihracatının yalnızca reaktör satışıyla sınırlı olmadığını; alıcı ülkenin teknik kadrolarının eğitimi, kurumsal kapasitesinin geliştirilmesi ve stratejik güven ilişkisinin derinleşmesi yoluyla daha kapsamlı bir yumuşak güç etkisi yaratabildiğini göstermektedir (WNA, 2019).

Türkiye'nin uzun vadeli SMR stratejisi açısından bu yumuşak güç boyutu özel bir önem taşımaktadır. Türkiye, yalnızca SMR teknolojisini ithal eden bir ülke konumunda kalmak yerine, zaman içinde mühendislik, işletme, bakım-onarım, eğitim, düzenleyici danışmanlık ve bölgesel proje geliştirme kapasitesi oluşturabilirse, nükleer enerji alanında daha aktif bir bölgesel rol üstlenebilir. Orta Doğu, Kuzey Afrika, Balkanlar, Kafkasya ve Orta Asya'daki enerji talebi artışı dikkate alındığında, Türkiye'nin bu coğrafyalara yönelik teknik eğitim, insan kaynağı geliştirme ve proje ortaklığı mekanizmaları kurması, SMR teknolojilerini bölgesel diplomasi ve sanayi politikası aracı hâline getirebilir.

Bununla birlikte bu potansiyelin gerçekleşmesi, yalnızca coğrafi konuma veya siyasi niyete bağlı değildir. Türkiye'nin bölgesel SMR merkezi olabilmesi için öncelikle kendi nükleer düzenleyici kapasitesini güçlendirmesi, yerli mühendislik ve imalat ekosistemini geliştirmesi, üniversite-sanayi-kamu iş birliğini kurumsallaştırması ve uluslararası güvenilirliği yüksek bir nükleer güvenlik kültürü oluşturması gerekmektedir. Ayrıca Türkiye'nin herhangi bir tedarikçiye aşırı bağımlı kalmadan, farklı teknoloji sağlayıcılarıyla dengeli ilişkiler geliştirmesi, bu yumuşak güç kapasitesinin sürdürülebilirliği açısından kritik olacaktır.

5.3 SMR'lerin Kritik Altyapı Güvenliği Boyutu

Kritik altyapı güvenliği; enerji sistemleri, iletişim ağları, ulaşım altyapıları, su sistemleri, savunma tesisleri ve dijital veri merkezleri gibi ulusal güvenliğin sürekliliği açısından hayati öneme sahip yapıların korunmasını ifade eden stratejik bir kavramdır (World Bank, 2023; European Union Agency for Cybersecurity [ENISA], 2022). Bu çerçevede nükleer enerji tesisleri, hem fiziksel güvenlik hem de siber güvenlik bakımından en yüksek koruma standartlarına tabi tutulması gereken kritik altyapılar arasında yer almaktadır (IAEA, 2022; U.S. Department of Homeland Security, 2023). SMR teknolojilerinin kritik altyapı güvenliği bağlamında değerlendirilmesi ise iki temel boyutu birlikte ele almayı gerektirmektedir (OECD-NEA, 2024).

İlk boyut, SMR'lerin diğer kritik altyapılar için enerji güvencesi sağlayabilme potansiyelidir. Savunma sanayii tesisleri, hassas üretim kompleksleri, komuta-kontrol merkezleri, büyük veri merkezleri, acil müdahale altyapıları ve stratejik lojistik tesisleri, şebeke kesintilerine karşı son

derece düşük toleransa sahip enerji tüketim merkezleridir (IEA, 2023; World Nuclear Association, 2025). Bu tür tesislerde elektrik arzının kesintiye uğraması yalnızca ekonomik kayıplara değil, ulusal güvenlik ve kamu düzeni açısından ciddi risklere de yol açabilmektedir (IEA, 2023). Günümüzde bu güvence çoğunlukla dizel jeneratörler, özel iletim hatları, batarya sistemleri veya yedek güç altyapılarıyla sağlanmaktadır. Ancak bu çözümler, uzun süreli kesintilerde yakıt ikmal, kapasite sınırlılığı, bakım gereksinimi ve karbon emisyonu gibi sorunlar barındırmaktadır (IPCC, 2022). SMR'ler bu bağlamda, stratejik tesislere yakın konumlandırıldığında düşük karbonlu, sürekli ve yüksek güvenilirlikli enerji sağlayabilecek tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilebilir (IAEA, 2023; OECD-NEA, 2024).

İkinci boyut ise SMR tesislerinin kendilerinin kritik altyapı güvenliği açısından yaratacağı yeni gereksinimlerdir. SMR'lerin daha küçük ölçekli ve potansiyel olarak daha dağıtık biçimde konuşlandırılması, enerji arz güvenliği bakımından avantaj sağlasa da, güvenlik mimarisi açısından daha geniş bir tehdit yüzeyi oluşturabilir (IAEA, 2022; ENISA, 2022). Her bir konuşlandırma noktasında fiziksel koruma, erişim kontrolü, çevresel izleme, acil durum planlaması, siber güvenlik, personel güvenilirliği ve yerel kolluk koordinasyonu gibi unsurların yüksek standartlarda sağlanması gerekecektir (IAEA, 2022). Bu nedenle SMR güvenliği yalnızca reaktör tasarımındaki pasif güvenlik sistemleriyle sınırlı değildir; tesisin bulunduğu bölgenin güvenlik altyapısı, dijital kontrol sistemlerinin dayanıklılığı ve kurumlar arası müdahale kapasitesiyle birlikte düşünülmelidir (OECD-NEA, 2024).

Dağıtık SMR modeli, özellikle siber güvenlik açısından da dikkatli bir planlama gerektirmektedir. Modern nükleer tesislerde dijital kontrol sistemleri, uzaktan izleme altyapıları, veri aktarım ağları ve bakım yazılımları giderek daha merkezi bir rol oynamaktadır (NIST, 2024; IAEA, 2022). Bu durum, işletme verimliliğini ve erken uyarı kapasitesini artırırken, aynı zamanda siber saldırı, veri manipülasyonu, tedarik zinciri güvenliği ve yazılım güncelleme süreçleri gibi yeni risk alanları yaratmaktadır (ENISA, 2022; NIST, 2024). Dolayısıyla SMR programları, baştan itibaren "güvenlik tasarıma gömülü" bir yaklaşımla geliştirilmeli; siber güvenlik, fiziksel güvenlik ve nükleer emniyet birbirinden ayrı değil, bütünlük bir risk yönetimi çerçevesi içinde ele alınmalıdır (IAEA, 2022).

Türkiye açısından bu başlık özel bir önem taşımaktadır. SMR'lerin savunma sanayii bölgeleri, büyük sanayi kümeleri, veri merkezi bölgeleri veya uzak kritik altyapılar için enerji güvencesi sağlayabilecek olması, bu teknolojilerin yalnızca enerji politikası değil, ulusal güvenlik ve sanayi stratejisi açısından da değerlendirilmesini gerektirmektedir (World Bank, 2023; IEA, 2023). Ancak böyle bir programın güvenli biçimde yürütülebilmesi için nükleer düzenleyici kurum, enerji otoriteleri, siber güvenlik kurumları, iç güvenlik birimleri, afet yönetimi yapıları ve savunma sanayii aktörleri arasında güçlü bir kurumsal koordinasyon kurulmalıdır (IAEA, 2022).

Sonuç olarak SMR'ler kritik altyapı güvenliği açısından çift yönlü bir teknoloji olarak değerlendirilmelidir. Bir yandan stratejik tesislere düşük karbonlu ve kesintisiz enerji sağlayarak ulusal dayanıklılığı artırabilirler; diğer yandan dağıtık konuşlandırma, siber güvenlik ve fiziksel koruma gereksinimleri nedeniyle yeni güvenlik sorumlulukları doğururlar (OECD-NEA, 2024; IAEA, 2022). Bu nedenle SMR programlarının yalnızca enerji arz planlaması kapsamında değil, kritik altyapı güvenliği, siber dayanıklılık, acil durum yönetimi ve ulusal güvenlik stratejisiyle entegre biçimde tasarlanması gerekmektedir.

5.4 Nükleer Çoğalma Riski: Eleştirel Perspektif ve Gerçekçi Değerlendirme

SMR'lere yönelik en ciddi ve meşru eleştirilerden biri, bu teknolojilerin yaygınlaşmasının nükleer çoğalma riskini artırabileceği yönündeki kaygıdır. Nükleer silah geliştirme açısından en kritik eşik, yeterli miktarda silah yapımına uygun nükleer materyalin —yüksek zenginleştirilmiş uranyum veya ayrıştırılmış plütonyum— elde edilmesidir. SMR'ler doğrudan nükleer silah üretimiyle özdeşleştirilemez; ancak reaktör teknolojilerinin daha fazla ülkeye, daha farklı coğrafyalara ve daha çeşitli yakıt döngüsü modelleriyle yayılması, güvence-denetim ve fiziksel koruma açısından yeni sorular doğurmaktadır. Bu nedenle SMR'lerin nükleer çoğalma boyutu, teknolojiyi bütünüyle reddeden abartılı bir güvenlik söylemiyle değil, tasarım bazlı ve gerçekçi bir risk analiziyle ele alınmalıdır.

SMR'lerin nükleer çoğalma riskini artırabilecek başlıca vektörlerinden biri HALEU yakıtına duyulan ihtiyaçtır. HALEU, genellikle %5 ile %20 arasında U-235 zenginleştirme oranına sahip uranyumu ifade etmektedir. Bu oran, silah sınıfı uranyum için gereken %90 ve üzeri zenginleştirme seviyesinin oldukça altında kalmaktadır; dolayısıyla HALEU doğrudan silah malzemesi olarak değerlendirilmemelidir. Bununla birlikte HALEU'nun LEU'ya kıyasla daha yüksek zenginleştirme seviyesinde olması, teorik olarak silah sınıfı seviyeye ulaşmak için gereken ek zenginleştirme adımlarını azaltmaktadır. Bu durum, özellikle HALEU kullanan ileri SMR tasarımlarının yaygınlaşması hâlinde yakıt tedariki, taşıma, depolama ve güvence-denetim süreçlerinin daha hassas biçimde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır (Carlson, 2024).

İkinci risk alanı, SMR'lerin dağıtık konuşlandırma modelinden kaynaklanmaktadır. Geleneksel büyük nükleer santraller az sayıda, yüksek güvenlikli ve yoğun düzenleyici denetime tabi sahalarda işletilirken, SMR'ler teorik olarak uzak bölgelerde, sanayi tesislerine yakın alanlarda, madencilik sahalarında veya küçük şebekelerde konuşlandırılabilir şekilde tasarlanmaktadır. Bu durum enerji arz güvenliği açısından avantaj sağlasa da, nükleer materyalin daha fazla sahaya yayılması nedeniyle fiziksel koruma, acil durum müdahalesi, siber güvenlik ve düzenleyici denetim kapasitesi açısından yeni yükler doğurabilir. Özellikle kurumsal kapasitesi sınırlı veya siyasi istikrarı zayıf ülkelerde SMR konuşlandırılması, güvenlik altyapısının reaktör teknolojisiyle eş zamanlı olarak geliştirilmesini zorunlu kılar.

Üçüncü risk alanı ise bazı ileri reaktör tasarımlarının yakıt döngüsü özellikleriyle ilgilidir. Erimiş tuz reaktörleri, hızlı reaktörler veya kapalı yakıt döngüsüyle ilişkilendirilen bazı tasarımlar, teorik olarak yakıtın yeniden işlenmesi, aktinit geri kazanımı veya plütonyum yönetimi gibi daha karmaşık süreçleri gündeme getirebilir. Bu tür teknolojiler atık miktarını azaltma, yakıt kullanım verimliliğini artırma veya uzun ömürlü izotopları yakma potansiyeli taşısa da, ayrıştırılmış nükleer materyal akışlarının oluşması durumunda güvence-denetim açısından daha hassas bir rejim gerektirebilir. Dolayısıyla SMR'lerin nükleer çoğalma riski, tek bir teknoloji ailesine genellenmemeli; kullanılan yakıt, zenginleştirme seviyesi, yakıt çevrimi, yeniden işleme ihtiyacı ve tesisin işletme modeli üzerinden ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Bununla birlikte SMR'lerin çoğalma riskini azaltabilecek bazı tasarım ve işletme özellikleri de bulunmaktadır. Bunların başında mühürlü çekirdek (*sealed core*) veya uzun ömürlü yakıt kartuşu konseptleri gelmektedir. Bazı küçük ve mikro reaktör tasarımları, yakıtın reaktör ömrü boyunca

sahada değiştirilmemesini; reaktörün üretici tarafından yakıtlı olarak teslim edilmesini ve işletme ömrü sonunda yakıtıyla birlikte geri alınmasını öngörmektedir. Bu model, alıcı ülkenin nükleer materyale doğrudan erişimini sınırlayabilir ve yakıt döngüsünün kritik aşamalarını tedarikçi ülkenin kontrolünde tutarak çoğalma riskini azaltabilir. Ancak bu yaklaşım da tüm riskleri ortadan kaldırmamaktadır; çünkü mühürlü çekirdek konsepti, yakıtın taşınması, uzun süreli sahada korunması, geri alma anlaşmalarının uygulanabilirliği ve tedarikçi ülkeye bağımlılık gibi yeni güvenlik ve egemenlik soruları yaratmaktadır.

IAEA güvenceler sistemi ve Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması (NPT) çerçevesindeki denetim mekanizmaları, SMR'lerin yaygınlaşması durumunda da temel güvenlik mimarisini oluşturmaya devam edecektir. Ancak SMR'lerin daha küçük, daha dağıtık ve bazı durumlarda daha yenilikçi yakıt döngülerine sahip olması, mevcut güvence-denetim uygulamalarının tasarım aşamasından itibaren bu teknolojilere uyarlanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle "safeguards by design" yaklaşımı, yani güvence-denetim gerekliliklerinin reaktör tasarımının en başından itibaren sisteme entegre edilmesi, SMR politikalarında merkezi bir ilke hâline gelmelidir.

Sonuç olarak SMR'lerin nükleer çoğalma riski ne abartılarak teknolojinin tümüyle reddedilmesini gerektiren mutlak bir engel olarak görülmeli ne de pasif güvenlik ve mühürlü çekirdek gibi tasarım özellikleri gerekçe gösterilerek önemsizleştirilmelidir. Gerçekçi değerlendirme, riskin tasarım, yakıt, konuşlandırma coğrafyası, tedarikçi modeli ve düzenleyici kapasiteye bağlı olarak değiştiiğini kabul etmeyi gerektirir. Bu nedenle çoğalma riski, SMR politikası gündeminde ciddiye alınması gereken kalıcı bir kısıt olarak kalmalıdır. Bu yaklaşım, hem analitik dürüstlüğün hem de sorumlu nükleer politika tasarımının gereğidir (Squassoni, 2023).

6. SMR TEKNOLOJİLERİNİN EKONOMİK ANALİZİ: MALİYET, FİNANSMAN VE TİCARİ UYGULANABİLİRLİK

Ekonomik uygulanabilirlik, SMR teknolojilerinin geniş çaplı yayılımını belirleyecek en kritik sınavlardan biri olmaya devam etmektedir. Teknolojik olgunluk, pasif güvenlik performansı, düşük karbonlu üretim kapasitesi ve jeopolitik gerekçeler ne kadar güçlü olursa olsun, elektrik piyasasında rekabetçi maliyet düzeylerine ulaşamayan bir teknolojinin belirleyici kamu desteği olmaksızın ticari ölçüğe erişmesi güçtür. Bu nedenle SMR tartışmasının merkezinde yalnızca mühendislik tasarımı veya güvenlik felsefesi değil, aynı zamanda maliyet yapısı, finansman modeli, yatırım riski ve piyasa uyumu da yer almalıdır.

SMR'lerin ekonomik iddiası iki yönlü bir mantığa dayanmaktadır. Bir yandan daha küçük birim kapasite, daha düşük toplam yatırım büyüklüğü, daha kısa hedeflenen inşaat süresi ve kademeli kapasite artırımını sayesinde büyük ölçekli nükleer santrallere kıyasla finansman riskini azaltabileceği ileri sürülmektedir. Diğer yandan ise birim kurulu güç başına maliyetin, ölçek ekonomilerinden yararlanan büyük reaktörlere kıyasla başlangıçta daha yüksek olabileceği kabul edilmektedir. Bu gerilim, SMR ekonomisinin temel paradoksunu oluşturmaktadır: SMR'ler toplam proje riskini azaltabilir; ancak bu avantajın birim elektrik maliyetine yansiyabilmesi için seri üretim, tedarik zinciri standardizasyonu, öğrenme eğrisi ve yüksek kapasite faktörü gibi koşulların gerçekleşmesi gerekmektedir.

6.1 Maliyet Yapısının Anatomisi: Birinci Nesil Tesislerden Ne Öğrenildi?

6.1.1 Sermaye Maliyeti: Neden Bu Kadar Belirsiz?

SMR'lerin sermaye maliyetine ilişkin tahminlerin oldukça geniş bir aralıkta dağıldığı görülmektedir. Bu geniş aralık, yalnızca teknoloji geliştiricileri arasındaki farklılıklardan değil, aynı zamanda SMR ekonomisinin henüz yeterli ticari saha verisiyle doğrulanmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Büyük ölçekli nükleer santraller için geçmiş projelerden elde edilen maliyet verileri bulunmakla birlikte, SMR'ler açısından tamamlanmış ticari proje sayısı son derece sınırlıdır. Bu nedenle mevcut maliyet tahminlerinin önemli bir bölümü mühendislik hesaplamalarına, büyük reaktör maliyetlerinin ölçeklendirilmesine, geliştirici beyanlarına veya erken aşama proje varsayımlarına dayanmaktadır.

Bu belirsizliğin ilk nedeni veri kıtlığıdır. Ticari ölçekte tamamlanmış SMR projelerinin azlığı, birim sermaye maliyeti, inşaat süresi, tedarik zinciri performansı ve işletme maliyetleri konusunda güvenilir karşılaştırma yapılmasını zorlaştırmaktadır. İkinci neden, tasarım olgunluk düzeylerindeki farklardır. Kavramsal tasarım veya erken Ar-Ge aşamasındaki bir reaktör için yapılan maliyet tahmini ile lisanslama sürecinde ilerlemiş ya da inşaat aşamasına geçmiş bir tasarım için yapılan tahmin aynı güvenilirlik düzeyine sahip değildir. Üçüncü neden ise ülkeye özgü koşullardır. İnşaat işgücü maliyetleri, düzenleyici süreçlerin uzunluğu, tedarik zinciri olgunluğu, finansman maliyeti, yerli sanayi katkısı ve proje yönetimi kapasitesi farklı ülkelerde ciddi maliyet farklılıklarına yol açabilmektedir.

Mevcut çalışmaların ve proje deneyimlerinin sentezi yapıldığında, ilk nesil veya öncü SMR tesisleri için sermaye maliyetinin oldukça geniş bir aralıkta seyretmesi beklenmektedir. Çeşitli analizlerde birim sermaye maliyetinin yaklaşık 5.000–10.000 \$/kWe aralığında olabileceği öne

sürülmekte; bazı ilk tesislerde bu aralığın da üzerine çıkma riski bulunduğu belirtilmektedir. Bu durum, SMR'lerin temel ekonomik paradoksunu ortaya koymaktadır: Daha küçük birim kapasite toplam yatırım büyüklüğünü ve proje riskini azaltabilir; ancak ölçek ekonomilerinden mahrum kaldığı için birim kurulu güç maliyeti başlangıçta büyük reaktörlerden daha düşük olmayabilir. Dolayısıyla SMR'lerin ekonomik rekabetçiliği, ilk tesis maliyetinden çok, aynı tasarımın seri üretimle tekrarlanması sonucunda maliyetlerin düşüp düşmeyeceğine bağlıdır.

NuScale/UAMPS Carbon Free Power Project deneyimi, bu belirsizliklerin somut biçimde görüldüğü en önemli vaka çalışmalarından biridir. Proje başlangıçta ABD'de ilk ticari SMR uygulamalarından biri olma potansiyeli taşıırken, maliyet tahminlerinin zaman içinde yükselmesi ve yeterli müşteri taahhüdünün sağlanamaması nedeniyle 2023 yılında iptal edilmiştir. Projede hedeflenen elektrik satış fiyatının önce yaklaşık 55–58 \$/MWh düzeylerinden 89 \$/MWh seviyesine yükselmesi, SMR ekonomisinin ilk ticari projelerde karşılaşılabileceği finansal zorlukları açıkça göstermiştir (Haas vd., 2023). Bu artışın arkasında enflasyon, tedarik zinciri sorunları, faiz oranlarındaki yükseliş, lisanslama ve mühendislik maliyetleri ile ilk tesis olmanın getirdiği öğrenme primi gibi faktörler yer almaktadır.

Bu deneyim, SMR maliyet tahminlerinde sistematik bir iyimserlik eğilimi bulunabileceğini göstermektedir. Geliştirici şirketler ve politika yapımcılar çoğu zaman seri üretim, fabrika imalatı ve kısa inşaat süresi gibi avantajları vurgulamakta; ancak bu avantajların ilk tesislerde tam olarak ortaya çıkması beklenmemelidir. İlk projeler genellikle lisanslama öğrenmesi, tedarik zinciri kurulumu, saha hazırlığı, düzenleyici belirsizlikler ve mühendislik tasarımının nihai hâle getirilmesi gibi ek maliyetler taşımaktadır. Bu nedenle SMR maliyet değerlendirmelerinde yalnızca hedef maliyetler değil, ilk tesis riski ve olası maliyet artışları da hesaba katılmalıdır.

BWRX-300 ve Darlington projesi ise SMR maliyet tartışmasında farklı bir örnek sunmaktadır. GE-Hitachi'nin BWRX-300 tasarımı, ESBWR teknolojik mirasına dayanması ve daha sade bir tesis mimarisi hedeflemesi nedeniyle maliyet azaltımı açısından güçlü bir aday olarak sunulmaktadır. Kanada'daki Darlington New Nuclear Project kapsamında Ontario Power Generation'ın BWRX-300 tasarımını seçmesi ve inşa lisansı alması, Batı kaynaklı SMR projeleri içinde en ileri ticari uygulamalardan biri olarak dikkat çekmektedir (OPG, 2024; CNSC, 2025). Ancak Darlington için açıklanan güncel bütçe kalemleri, SMR maliyetlerinin hâlen dikkatle izlenmesi gerektiğini göstermektedir. İlk ünite maliyeti, ortak altyapı harcamaları, faiz, eskalasyon ve ihtiyat kalemleri birlikte değerlendirildiğinde, BWRX-300'ün gerçek ekonomik performansı ancak inşaatın tamamlanması ve sonraki ünitelerde öğrenme etkisinin görülmesiyle netleşecektir.

Bu nedenle BWRX-300 örneği, NuScale deneyimine kıyasla daha olumlu bir ticari ivme sunsa da, maliyet avantajı henüz kesinleşmiş bir sonuç olarak görülmemelidir. Darlington projesinin asıl önemi, ilk ünitenin maliyetinden çok, aynı sahada birden fazla ünitenin tekrarlanması yoluyla öğrenme eğrisi, ortak altyapı kullanımı ve tedarik zinciri standardizasyonu etkilerinin test edilecek olmasıdır. Eğer sonraki ünitelerde maliyet ve inşaat süresi anlamlı biçimde düşerse, SMR'lerin ekonomik mantığı daha güçlü biçimde doğrulanmış olacaktır. Aksi hâlde, SMR'lerin küçük ölçek avantajının yüksek birim maliyetler tarafından sınırlandırıldığı yönündeki eleştiriler güç kazanacaktır.

Sonuç olarak SMR sermaye maliyetleri konusunda bugün için kesin ve tekil bir rakam vermek analitik açıdan yanıltıcıdır. Mevcut kanıtlar, ilk nesil SMR tesislerinin düşük maliyetli olmaktan

ziyade yüksek belirsizlikli projeler olduğunu göstermektedir. SMR'lerin ekonomik başarısı, ilk tesislerin maliyet performansına, aynı tasarımın tekrar eden ünitelerde ne ölçüde ucuzlayacağına, finansman maliyetlerinin nasıl yönetileceğine ve tedarik zincirinin seri üretime ne kadar hızlı uyum sağlayacağına bağlıdır. Bu nedenle SMR ekonomisi değerlendirilirken iyimser geliştirici beyanları ile eleştirel maliyet analizleri birlikte ele alınmalı; politika tasarımında güçlü bir ihtiyat payı bırakılmalıdır.

6.1.2 Düzleştirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) Analizi

Nükleer enerji, yüksek sermaye maliyetine karşılık görece düşük işletme ve yakıt maliyetleriyle karakterize edilen bir teknolojidir. Bu maliyet yapısı, nükleer santrallerin ekonomik performansında kapasite faktörünü son derece belirleyici hâle getirmektedir. İlk yatırım maliyetinin yüksek olması nedeniyle, santralin yıl boyunca ne ölçüde yüksek üretim seviyesinde çalıştığı, birim elektrik maliyetini doğrudan etkilemektedir. Büyük ölçekli nükleer santraller, ABD ve Fransa gibi olgun nükleer ekosistemlerde çoğu zaman %90'a yaklaşan veya bu seviyeyi aşan kapasite faktörlerine ulaşabilmektedir. SMR tasarımları da benzer biçimde yüksek kapasite faktörü hedeflemektedir; ancak ilk ticari uygulamalarda planlı bakım, lisanslama sonrası işletme öğrenmesi, tedarik zinciri sorunları ve plansız duruşlar nedeniyle bu hedeflere ulaşmak başlangıçta zor olabilir.

SMR'lerin yük izleme modunda veya kısmi güçte çalıştırılması da ekonomik açıdan dikkatle değerlendirilmesi gereken bir konudur. Teknik olarak bazı SMR tasarımları belirli ölçüde güç ayarlamasına uygun olsa da, sık sık güç düşürme veya düşük kapasitede işletme, üretilen toplam elektrik miktarını azaltarak birim maliyeti yükseltebilir. Bu durum, yüksek sabit maliyetli nükleer tesislerin ekonomik mantığıyla doğrudan ilişkilidir. OECD NEA (2023), SMR kapasite faktörünü etkileyen başlıca unsurlar arasında şebeke istikrarı, yakıt değiştirme aralıkları, planlı bakım süreleri ve plansız arıza oranlarını vurgulamaktadır. Özellikle yeni teknolojilerde planlı ve plansız duruş oranlarının ilk işletme yıllarında öngörülenden daha yüksek gerçekleşmesi, kapasite faktörü ve dolayısıyla LCOE üzerinde olumsuz etki yaratabilecek önemli bir risk unsurudur.

Yakıt maliyetleri açısından bakıldığında ise nükleer enerji, fosil yakıtlı santrallere kıyasla daha yüksek bir öngörülebilirlik avantajı sunmaktadır. Uranyum fiyatı, nükleer elektrik üretim maliyetinin görece küçük bir bölümünü oluşturduğundan, ham madde fiyatlarındaki dalgalanmalar nihai elektrik maliyetini doğal gaz veya kömür santrallerinde olduğu kadar güçlü biçimde etkilememektedir. Bu özellik, nükleer enerjiyi uzun vadeli fiyat istikrarı açısından dikkat çekici hâle getirmektedir. Ancak SMR'lerde yakıt maliyeti değerlendirilirken yalnızca uranyum hammaddesi değil, yakıt zenginleştirme, yakıt fabrikasyonu, HALEU gereksinimi, taşıma ve tedarik güvenliği gibi unsurlar da dikkate alınmalıdır. Özellikle HALEU kullanan ileri SMR tasarımlarında yakıt zincirinin henüz ticari ölçekte olgunlaşmamış olması, maliyet ve arz güvenliği açısından ek belirsizlik yaratmaktadır.

Türkiye açısından bu özellik özel bir önem taşımaktadır. Türkiye'nin elektrik üretiminde doğal gaz ithalatına olan bağımlılığı, enerji fiyatları üzerinde dış piyasa dalgalanmalarının etkisini artırmaktadır. Bu bağlamda nükleer enerji ve potansiyel SMR yatırımları, yakıt maliyetinin toplam üretim maliyeti içindeki sınırlı payı sayesinde uzun dönemli elektrik fiyat istikrarına katkı sağlayabilecek bir seçenek sunmaktadır. Bununla birlikte bu avantajın gerçekleşebilmesi için SMR projelerinin yüksek kapasite faktörüyle işletilebilmesi, yakıt tedarik zincirinin güvence altına

alınması ve bakım-duruş sürelerinin dikkatle yönetilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla SMR ekonomisinde işletme maliyetleri düşük görünse de, ticari başarının asıl belirleyicisi yüksek kapasite faktörünü sürdürülebilir biçimde koruyabilmektir.

Tablo: Farklı Enerji Teknolojileri için LCOE Tahminleri (2025–2026 Fiyatlarıyla, \$/MWh)

Teknoloji	Kategori	LCOE Alt (\$/MWh)	LCOE Üst (\$/MWh)	Ülke / Bağlam	Notlar
Büyük ölçekli nükleer					
Büyük NGS — mevcut işletme	Nükleer	35	75	ABD, Fransa, Güney Kore	İşletme + yakıt maliyeti; sermaye geri ödenmiş
Büyük NGS — yeni inşaat	Nükleer	85	180	AB / ABD yeni projeler	Hinkley C ve Vogtle referansları dahil
SMR — Küçük Modüler Reaktör (öğrenme eğrisi senaryoları)					
SMR — 1. nesil öncü tesis	SMR	90	160	Çeşitli tahmin	NuScale UAMPS revizyonu sonrası üst sınır
SMR — 5. tesis (seri üretim başlangıcı)	SMR	60	120	OECD NEA (2021)	Seri üretim varsayımıyla
SMR — 10. tesis ve ötesi	SMR	45	90	OECD NEA (2023)	İyimser maliyet öğrenme senaryosu
Yenilenebilir enerji [*entegrasyon maliyeti hariç]					
Deniz üstü rüzgâr enerjisi	Yenilenebilir	60	120	Kuzey Avrupa ortalama	Entegrasyon maliyeti hariç
Kara üstü rüzgâr enerjisi	Yenilenebilir	30	65	Türkiye dahil gelişen pazarlar	Entegrasyon maliyeti hariç
Güneş fotovoltaik (PV)	Yenilenebilir	25	60	Yüksek ışınım bölgeleri	Entegrasyon maliyeti hariç
Fosil yakıtlı					
Kombine çevrim doğal gaz (CCGT)	Fosil yakıt	55	110	Doğal gaz fiyatına bağlı	2022–2023 küresel enerji krizi etkisi yansıtılmış
Hibrit sistem (projeksiyon)					
SMR + depolama entegre sistem	Hibrit	80	140	Projeksiyon: 2030–2035	TerraPower Natrium benzeri model

* Entegrasyon maliyeti: Yenilenebilir kaynaklara ait LCOE değerleri şebeke dengeleme, yedek kapasite ve iletim yatırım maliyetlerini içermemektedir. Bu maliyetler eklendiğinde yenilenebilir LCOE değerleri %20–50 oranında artabilir.

* Deniz üstü rüzgâr enerjisi (Offshore wind) / Kara üstü rüzgâr enerjisi (Onshore wind).

* Kaynaklar: OECD NEA (2021, 2023), IEA (2023), Lazard LCOE Analysis (2024).

Tablodan çıkan en kritik analitik sonuç; SMR'lerin 1. nesil öncü tesis aşamasında büyük ölçekli yeni NGS ile kıyaslanabilir maliyet düzeylerinde bulunduğu, ancak kümülatif üretim artışıyla birlikte öngörülen maliyet düşüşlerinin gerçekleşmesi halinde orta vadede önemli bir rekabetçilik penceresi açılabileceğidir. Bu tablo bir soruyu kaçınılmaz biçimde gündeme getirmektedir: SMR'lerin en temel ekonomik vaadi olan seri üretim öğrenme eğrisi, gerçekten işleyebilecek midir?

6.2 Finansman Modelleri ve Devlet Desteğinin Belirleyici Rolü

SMR ekonomisinin temel vaatlerinden biri, nükleer inşaatın büyük ölçüde sahaya özgü ve proje bazlı karakterinden uzaklaştırılarak fabrika ortamında standart modül üretimine dayalı bir yapıya dönüştürülebileceği iddiasıdır. Bu yaklaşım, nükleer sektöre otomotiv, gemi inşa veya havacılık

sanayilerinde görülen seri üretim ve öğrenme eğrisi dinamiklerinin taşınabileceğini varsaymaktadır. Teorik olarak aynı tasarımın tekrar tekrar üretilmesi; mühendislik hatalarının azalması, işçilik verimliliğinin artması, tedarik zincirinin olgunlaşması ve kalite kontrol süreçlerinin standartlaşması yoluyla birim maliyetleri düşürebilir.

Bu argümanın analitik temeli, Wright'ın (1936) uçak üretimi üzerine geliştirdiği klasik “öğrenme eğrisi” yaklaşımına dayanmaktadır. Öğrenme eğrisi modeline göre kümülatif üretim iki katına çıktıkça, birim üretim maliyeti belirli bir oranda azalmaktadır. OECD NEA (2021) tarafından yapılan modellemeler, SMR’lerde mütevazı öğrenme oranlarının dahi uzun vadede anlamlı maliyet düşüşleri yaratabileceğini göstermektedir. Özellikle aynı tasarımın çok sayıda üniteyle tekrarlanması hâlinde, 5. reaktörden 50. reaktöre doğru ilerleyen üretim sürecinde birim maliyetlerde kayda değer azalma potansiyeli bulunmaktadır. Ancak bu potansiyel, kendiliğinden gerçekleşecek bir sonuç değil; tasarım standardizasyonu, tedarik zinciri olgunluğu, düzenleyici istikrar ve güvenilir piyasa talebi gibi koşulların eş zamanlı sağlanmasına bağlıdır.

Birinci koşul tasarım standardizasyonudur. Öğrenme eğrisi, temelde aynı ürünün tekrar edilmesine dayanır. Eğer her proje sahaya, ülkeye veya düzenleyici talebe göre önemli tasarım değişiklikleri gerektirirse, önceki projelerden elde edilen öğrenme birikiminin önemli bir bölümü kaybedilebilir. Nükleer sektörde bu risk özellikle yüksektir; çünkü lisanslama süreçleri, güvenlik analizleri ve düzenleyici geri bildirimler tasarım revizyonlarına yol açabilmektedir. Grubler’in (2010) Fransız nükleer programı üzerine yaptığı analizde ortaya koyduğu “negatif öğrenme” olgusu, nükleer sektörde tekrarın her zaman otomatik maliyet düşüşü yaratmadığını göstermektedir. Tasarım değişiklikleri, proje yönetimi karmaşıklığı, mühendislik kadrolarındaki süreksizlik ve düzenleyici belirsizlikler, maliyetlerin zaman içinde azalmak yerine artmasına neden olabilmektedir. SMR’lerin bu tuzaktan kaçınabilmesi için erken aşamada olgun, lisanslanabilir ve uzun süre değiştirilmeden tekrarlanabilecek standart tasarımlara ulaşması gerekmektedir.

İkinci koşul tedarik zinciri olgunluğudur. Seri üretim ekonomisi, yalnızca reaktör tasarımının standartlaşmasına değil, aynı zamanda bu tasarımı destekleyecek nükleer kaliteye sahip bileşen tedarikçilerinin sürekliliğine bağlıdır. Reaktör basınç kapları, buhar jeneratörleri, özel pompa ve valf sistemleri, kontrol-otomasyon ekipmanları, nükleer dereceli çelik alaşımları ve yakıt bileşenleri gibi kritik parçaların güvenilir, lisanslı ve tekrarlanabilir biçimde üretilebilmesi gerekmektedir. Bu tedarik zincirinin kurulması yalnızca teknik bir mesele değildir; kalite güvence sistemleri, sertifikasyon süreçleri, nükleer güvenlik kültürü ve uzun vadeli sipariş görünürlüğü de bu zincirin temel unsurlarıdır. Dolayısıyla fabrika üretimi vaadi, güçlü bir sanayi tabanı ve süreklilik taşıyan sipariş akışı olmadan maliyet avantajına dönüşmeyebilir.

Üçüncü koşul düzenleyici istikrar ve lisanslama uyumudur. SMR’lerin seri üretim mantığı, aynı tasarımın farklı sahalarda ve mümkünse farklı ülkelerde tekrar edilebilmesine dayanmaktadır. Ancak her ülkenin nükleer düzenleyici çerçevesi, güvenlik beklentileri ve lisanslama prosedürleri farklı olduğunda, aynı tasarımın her pazarda yeniden uyarlanması gerekebilir. Bu durum, tasarım standardizasyonunu zayıflatır ve öğrenme eğrisinin etkisini sınırlar. Bu nedenle SMR ekonomisinin başarısı yalnızca şirketlerin üretim kabiliyetine değil, aynı zamanda düzenleyici kurumlar arasında tasarım onayı, güvenlik değerlendirmesi ve lisanslama süreçlerinde daha fazla uyum sağlanmasına da bağlıdır.

Dördüncü koşul ise piyasa talebinin güvence altına alınmasıdır. Öğrenme eğrisinin işleme için üretim sürekliliği gereklidir. Eğer ilk birkaç ünitelerden sonra sipariş akışı kesilirse, fabrika yatırımları, tedarikçi kapasitesi ve mühendislik ekipleri sürdürülebilirliğini kaybedebilir. Bu nedenle SMR ekonomisi, tekil projelerden çok filo mantığıyla değerlendirilmektedir. Bir ülkenin veya müşteri grubunun aynı tasarımdan çok sayıda ünite sipariş etmesi, maliyet düşüşünün gerçekleşmesi için kritik öneme sahiptir. Buna karşılık piyasa talebindeki belirsizlik, finansman zorlukları veya büyük bir müşterinin projeden çekilmesi, seri üretim döngüsünü kırarak öğrenme eğrisini başlamadan durdurabilir.

Bu koşullar birlikte değerlendirildiğinde, SMR'lerde seri üretim ekonomisi teorik olarak mümkündür; ancak ekonomik başarı için yeterli değildir. Öğrenme eğrisi, yalnızca teknik bir üretim avantajı değil, aynı zamanda kurumsal, düzenleyici, finansal ve endüstriyel koordinasyon gerektiren karmaşık bir süreçtir. SMR'lerin maliyet düşüşü sağlayabilmesi için geliştirici şirketlerin standart tasarımları koruması, devletlerin uzun vadeli sipariş görünürlüğü sağlaması, düzenleyici kurumların lisanslama süreçlerinde öngörülebilirlik yaratması ve sanayinin nükleer kaliteye uygun seri üretim kapasitesi geliştirmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak SMR'lerin öğrenme eğrisi vaadi gerçek dışı değildir; ancak otomatik olarak gerçekleşecek bir maliyet düşüş mekanizması da değildir. Bu vaat, yalnızca belirli koşullar altında geçerli olabilecek koşullu bir ekonomik varsayımdır. Tasarım değişiklikleri, tedarik zinciri darboğazları, lisanslama farklılıkları ve talep belirsizliği devam ettiği sürece SMR'lerin seri üretim avantajı sınırlı kalabilir. Buna karşılık standart tasarım, güçlü tedarik zinciri, düzenleyici istikrar ve garanti edilmiş filo siparişleri bir araya getirilebilirse, SMR'ler nükleer enerjide maliyet düşüşü ve inşaat süresi kısalması açısından önemli bir dönüşüm potansiyeli taşıyabilir.

6.2.1 Neden SMR'ler Salt Piyasa Dinamikleriyle Finanse Edilemez?

Nükleer enerji, yüksek ilk yatırım maliyeti, uzun geri ödeme süresi, karmaşık lisanslama süreçleri ve teknoloji riski nedeniyle özel sermayenin doğal risk toleransını aşan bir yatırım profiline sahiptir. Bu durum, nükleer projelerin yalnızca piyasa mekanizmalarıyla finanse edilmesini pratikte son derece güç hâle getirmektedir. Elektrik piyasalarının serbestleşmesiyle birlikte üretici şirketler, uzun vadeli ve sermaye yoğun yatırımların riskini doğrudan üstlenmekte daha isteksiz hâle gelmiştir. Bu nedenle nükleer enerji gibi büyük ölçekli altyapı projeleri, çoğu durumda kamu garantileri, uzun vadeli alım anlaşmaları, düzenlenmiş gelir mekanizmaları veya devlet destekli finansman modelleri olmaksızın yatırımcı açısından yeterince cazip görünmemektedir.

Lévêque'in (2014) analizi, elektrik piyasalarının liberalleşmesinden sonra yeni nükleer santral yatırımlarının gerçek anlamda salt piyasa finansmanı ile hayata geçirilmesinin oldukça zorlaştığını ortaya koymaktadır. Bunun temel nedeni, nükleer projelerde maliyetlerin büyük bölümünün inşaatın başında ortaya çıkması, gelirlerin ise ancak uzun yıllar sonra ve elektrik piyasası fiyatlarına bağlı olarak elde edilmesidir. Bu yapı, yatırımcıyı hem inşaat süresi boyunca maliyet aşımı ve gecikme riskine hem de işletme döneminde piyasa fiyatı belirsizliğine maruz bırakmaktadır. Dolayısıyla nükleer enerji yatırımlarında finansman maliyeti, teknik maliyet kadar belirleyici bir unsur hâline gelmektedir.

SMR'ler bu yapısal sorunu belirli ölçüde hafifletme potansiyeline sahiptir. Büyük ölçekli nükleer santrallere kıyasla daha küçük birim kapasite, daha düşük toplam proje büyüklüğü, hedeflenen daha kısa inşaat süresi ve modüler kademeli yatırım imkânı, özel sermayenin projeye giriş eşliğini

azaltabilir. Bir SMR filosu, tek seferde çok büyük bir yatırım gerektirmek yerine, talep artışına paralel biçimde kademeli kapasite eklenmesine olanak sağlayabilir. Bu durum, özellikle elektrik talebinin belirsiz olduğu veya finansman kapasitesinin sınırlı kaldığı ülkeler açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Bununla birlikte SMR'ler, nükleer finansmanın temel risklerini tamamen ortadan kaldırmamaktadır. İlk nesil SMR projelerinde teknoloji riski hâlen yüksektir; çünkü tasarımların büyük bölümü henüz ticari ölçekte uzun süreli işletme deneyimiyle doğrulanmamıştır. Ayrıca lisanslama süreçlerinin süresi, düzenleyici belirsizlikler, tedarik zinciri olgunluğu, ilk tesis maliyetleri ve seri üretim öğrenme eğrisinin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği konusunda önemli belirsizlikler bulunmaktadır. Özel sermaye, bu tür belirsizlikleri çoğu zaman yüksek getiri beklentisiyle fiyatlamakta; bu da projenin finansman maliyetini artırarak SMR'lerin rekabetçiliğini zayıflatabilmektedir.

SMR ekonomisinin bir diğer sorunu, piyasanın öğrenme eğrisi değerini tek başına finanse etmekte yetersiz kalmasıdır. İlk SMR tesisleri genellikle daha pahalı, daha riskli ve daha uzun geliştirme süresine sahip olacaktır; buna karşılık sonraki ünitelerde maliyetlerin düşmesi beklenmektedir. Ancak özel yatırımcı açısından ilk tesisin yüksek maliyetini üstlenmek, gelecekteki toplumsal veya sektörel öğrenme kazançları garanti edilmediği sürece rasyonel görünmeyebilir. Bu durum, klasik bir "ilk hareket eden yatırımcı riski" yaratmaktadır. Öğrenme eğrisinden doğacak fayda sektör geneline yayılırken, ilk proje riskini belirli bir yatırımcı veya müşteri üstlenmektedir.

Bu nedenle SMR'lerin ticari ölçüğe ulaşabilmesi için orta vadede devlet desteği kaçınılmaz görünmektedir. Bu destek, doğrudan kamu finansmanı biçiminde olmak zorunda değildir; uzun vadeli elektrik alım garantileri, fark sözleşmeleri, düzenlenmiş varlık tabanı modeli, kredi garantileri, vergi teşvikleri, kamu-özel ortaklıkları, ilk tesis demonstrasyon fonları ve devlet destekli filo siparişleri gibi farklı araçlarla sağlanabilir. Asıl amaç, özel sermayenin üstlenmekte zorlandığı teknoloji, inşaat ve piyasa risklerinin belirli ölçüde kamu politikası yoluyla azaltılmasıdır.

Dolayısıyla SMR'ler, nükleer enerjinin finansman sorununu tamamen çözen bir teknoloji olarak değil, bu sorunu daha yönetilebilir hâle getirme potansiyeline sahip bir model olarak değerlendirilmelidir. Küçük ölçek, modülerlik ve kademeli yatırım imkânı özel sermaye katılımını kolaylaştırabilir; ancak ilk nesil tesislerin yüksek risk profili, devlet destekli finansman mekanizmalarını hâlen gerekli kılmaktadır. Bu nedenle SMR finansmanı, salt piyasa dinamiklerine bırakılabilecek bir alan değil; enerji güvenliği, sanayi politikası, düşük karbonlu dönüşüm ve stratejik teknoloji geliştirme hedefleriyle birlikte tasarlanması gereken karma bir kamu-özel finansman meselesidir.

Bu noktada temel soru, devlet desteğinin gerekli olup olmadığı değil, hangi biçimde ve hangi koşullarla sağlanacağıdır. Bu soruya yanıt verebilmek için küresel ölçekte uygulanan nükleer finansman modellerini ve bu modellerin SMR projelerine ne ölçüde uyarlanabileceğini analiz etmek gerekmektedir.

6.2.2 Küresel Finansman Model Taksonomisi

Halihazırda dünyada uygulanan veya SMR projelerine uyarlanması tartışılan finansman modelleri beş ana kategori altında ele alınabilir. Bu modeller, nükleer enerjinin yüksek sermaye maliyeti, uzun geri ödeme süresi, düzenleyici belirsizlik ve teknoloji riski gibi yapısal özelliklerine farklı çözümler üretmeyi amaçlamaktadır. SMR'lerin daha küçük ölçekli ve modüler yapısı finansman seçeneklerini çeşitlendirse de, ilk nesil projelerde kamu desteği ve risk paylaşımı hâlen belirleyici önem taşımaktadır.

Birinci model doğrudan devlet yatırımı ve kamu mülkiyetidir. Fransa, Rusya ve Çin gibi nükleer enerji sektöründe güçlü kamu varlığına sahip ülkelerde nükleer tesisler büyük ölçüde devlet şirketleri, kamu bankaları veya merkezi planlama mekanizmaları aracılığıyla finanse edilmektedir. Bu modelin temel avantajı, sermaye piyasası riskini azaltması ve uzun vadeli stratejik taahhüdü güvence altına almasıdır. Devlet mülkiyeti veya devlet destekli yatırım modeli, nükleer projelerin yalnızca kısa vadeli piyasa getirisiyle değil, enerji güvenliği, sanayi politikası, iklim hedefleri ve jeopolitik nüfuz gibi daha geniş stratejik amaçlarla değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu modelin kamu bütçesi üzerinde ciddi yük oluşturması, maliyet aşımı riskinin nihai olarak kamuya yansması ve siyasi döngülere bağımlı hâle gelmesi gibi önemli sınırlılıkları bulunmaktadır.

İkinci model Düzenlenmiş Varlık Tabanı modelidir (*Regulated Asset Base* — RAB). RAB modeli, büyük altyapı projelerinde yatırımcıya düzenlenmiş ve öngörülebilir bir getiri sağlanması mantığına dayanmaktadır. Birleşik Krallık'ta Hinkley Point C projesi fark sözleşmesi (*Contract for Difference* — CfD) modeliyle finanse edilirken, Sizewell C projesi için RAB modelinin uygulanması yönünde bir politika çerçevesi geliştirilmiştir. Bu modelde tüketicilere inşaat sürecinden itibaren sınırlı bir maliyet yansıtılması karşılığında yatırımcıların finansman riski azaltılmakta ve sermaye maliyetinin düşürülmesi hedeflenmektedir. SMR'ler açısından RAB modeli, özellikle filo mantığıyla birden fazla ünitenin planlandığı durumlarda düşük maliyetli ve uzun vadeli finansman sağlama potansiyeli taşımaktadır. Bununla birlikte tüketicilerin proje tamamlanmadan maliyet üstlenmesi, maliyet aşımı riskinin nasıl paylaşılacağı ve kamuoyu kabulü gibi konular bu modelin başlıca tartışma alanlarıdır (UK Government, 2024).

Üçüncü model uzun vadeli güç satın alma anlaşmaları (*Power Purchase Agreements* — PPA) ve temiz enerji vergi kredileridir. Bu modelde proje geliştiricisi, üreteceği elektriği uzun dönemli ve öngörülebilir fiyat koşullarıyla satmayı garanti altına alarak gelir belirsizliğini azaltmaktadır. ABD'de Enflasyonu Düşürme Yasası (*Inflation Reduction Act* — IRA) kapsamında sağlanan temiz elektrik üretim ve yatırım vergi kredileri, nükleer ve ileri nükleer projelerin gelir görünürlüğünü artıran önemli araçlar arasında yer almaktadır. Kurumsal PPA sözleşmeleri ise özellikle teknoloji şirketleri, veri merkezi işletmecileri ve büyük sanayi tüketicileri açısından düşük karbonlu, sürekli ve güvenilir enerji talebini SMR projeleriyle eşleştirebilecek bir finansman kanalı sunmaktadır. Ancak bu modelin başarısı, PPA fiyatının uzun dönemli elektrik piyasası fiyatlarıyla uyumlu olmasına ve alıcı tarafın kredi değerliliğine bağlıdır. Ayrıca ilk nesil SMR projelerinde teknoloji ve inşaat riski yüksek olduğu için PPA modeli çoğu zaman tek başına yeterli olmayacak, kamu garantileri veya vergi destekleriyle tamamlanması gerekecektir.

Dördüncü model kalkınma bankası ve ihracat finansmanıdır. Nükleer teknoloji ihracatı, yüksek başlangıç maliyeti ve uzun vadeli geri ödeme yapısı nedeniyle çoğu alıcı ülke için ticari

finansmanla yürütülmesi zor bir alandır. Bu nedenle ihracat kredi kuruluşları, kalkınma finansmanı kurumları ve çok taraflı bankalar SMR projelerinin küresel ölçekte yaygınlaşmasında kritik rol oynayabilir. ABD Uluslararası Kalkınma Finansmanı Kurumu'nun nükleer enerji projelerine destek yasağını kaldırması, Japonya JBIC'in nükleer ihracat finansmanı kapasitesi ve Avrupa'da nükleer enerjinin sürdürülebilir finansman çerçevesindeki yeri üzerine yürütülen tartışmalar, bu alanın giderek daha stratejik hâle geldiğini göstermektedir. Özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde SMR projelerinin gerçekleştirilmesi, çoğu durumda uygun vadeli kredi, devlet garantisi, ihracat sigortası ve teknik yardım paketlerinin birlikte sunulmasına bağlı olacaktır.

Beşinci model kamu-özel ortaklığı (*Public-Private Partnership* — PPP) ve proje finansmanıdır. Bu modelde kamu kurumları, özel yatırımcılar, teknoloji tedarikçileri ve elektrik alıcıları belirli bir proje etrafında özel amaçlı araçlar (*Special Purpose Vehicle* — SPV) üzerinden bir araya getirilmektedir. SPV yapısı, risklerin sözleşmesel olarak taraflar arasında dağıtılmasına, finansman kaynaklarının çeşitlendirilmesine ve projenin bilanço dışı veya sınırlı bilanço etkisiyle yürütülmesine olanak tanıyabilir. TerraPower'ın Wyoming'de yürüttüğü Natrium projesi, ABD Enerji Bakanlığı'nın İleri Reaktör Demonstrasyon Programı kapsamındaki mali desteği, özel sektör yatırımı ve yerel elektrik sistemiyle entegrasyon hedefi bakımından bu modele yakın bir örnek sunmaktadır. Bu tür modeller, özellikle ilk nesil SMR projelerinde teknoloji riskini kamu desteğiyle paylaşırken özel sektörün mühendislik, proje yönetimi ve işletme kapasitesinden yararlanmayı amaçlamaktadır.

Bu beş model birlikte değerlendirildiğinde, SMR finansmanında tek ve evrensel bir çözüm bulunmadığı görülmektedir. Her ülkenin elektrik piyasası yapısı, kamu maliyesi kapasitesi, düzenleyici çerçevesi, yatırımcı güveni ve stratejik enerji hedefleri farklı olduğundan, finansman modeli de ülkeye özgü biçimde tasarlanmalıdır. Ancak ortak sonuç açıktır: İlk nesil SMR projeleri salt piyasa dinamikleriyle değil, kamu desteği, uzun vadeli gelir güvencesi, risk paylaşımı ve stratejik sanayi politikası araçlarının birleşimiyle hayata geçirilebilecektir. Bu nedenle SMR finansmanı, yalnızca proje finansmanı sorunu değil; aynı zamanda enerji güvenliği, teknoloji geliştirme ve devletin düşük karbonlu dönüşümdeki rolüyle doğrudan bağlantılı bir politika alanıdır.

6.3 SMR Ekonomisine Yönelik Eleştirel Değerlendirme

SMR ekonomisine yönelik eleştirel literatür, iyimser maliyet tahminlerine karşı sistematik ve dikkate alınması gereken argümanlar üretmektedir. Bu eleştirilerin temelinde, nükleer sektörün geçmiş projelerde maliyetleri ve inşaat sürelerini çoğu zaman başlangıç tahminlerinden daha düşük gösterme eğilimi bulunduğu iddiası yer almaktadır. Schneider ve Froggatt'ın (2025) Dünya Nükleer Sektörü Durum Raporu, SMR projelerine ilişkin maliyet beklentilerinin de benzer bir iyimserlik riski taşıdığını vurgulamakta ve nükleer sektörün geçmişteki maliyet aşımı örüntülerinin SMR alanında da tekrarlanabileceğine dikkat çekmektedir. Lovins (2023) ise SMR'lerin hem büyük ölçekli nükleer santrallerden hem de yenilenebilir enerji-depolama kombinasyonlarından daha pahalı kalacağını; bu nedenle sınırlı iklim finansmanının daha hızlı ve daha düşük maliyetli karbon azaltım seçeneklerinden uzaklaştırılması riskini doğurabileceğini ileri sürmektedir.

Bu eleştiriler belirli ölçüde güçlü ve gerçekçi temellere sahiptir. Özellikle küçük ölçek dezavantajı (*diseconomies of scale*) argümanı, SMR ekonomisinin en temel zayıf noktalarından birine işaret etmektedir. Büyük reaktörler, kurulu güç başına daha geniş ölçek ekonomilerinden yararlanırken, küçük reaktörlerde reaktör kabı, kontrol sistemleri, güvenlik sistemleri, lisanslama maliyetleri, mühendislik çalışmaları ve saha altyapısı gibi bazı maliyet kalemleri kapasiteyle aynı oranda küçülmemektedir. Bu nedenle SMR'lerin birim kurulu güç başına daha yüksek sermaye maliyetine sahip olma riski bulunmaktadır. Fabrika üretimi, modüler inşaat ve seri üretim öğrenmesi bu dezavantajı azaltabilir; ancak bu avantajların gerçekten ne ölçüde ortaya çıkacağı, yalnızca ilk ticari projelerin tamamlanması ve sonraki ünitelerde maliyet düşüşünün gözlenmesiyle anlaşılabilir.

Bu noktada SMR ekonomisine ilişkin temel sorun epistemik belirsizliktir. Başka bir ifadeyle, SMR'lerin ekonomik başarısızlığa mahkûm olduğu kesin olarak söylenemeyeceği gibi, seri üretim yoluyla düşük maliyetli bir nükleer çözüm sunacağı da henüz kanıtlanmış değildir. Mevcut maliyet tahminlerinin önemli bir bölümü geliştirici beyanlarına, mühendislik varsayımlarına veya ilk tesis öncesi modellere dayanmaktadır. Bu nedenle politika yapıcılar, SMR'leri iklim ve enerji güvenliği stratejilerinde tamamen dışlamamalı; ancak tüm yatırım ve planlama kapasitesini bu teknolojiye bağlayan “tek seçenek” yaklaşımından da kaçınmalıdır. SMR politikası, teknoloji portföyü çeşitlendirmesi ve aşamalı doğrulama mantığı üzerine kurulmalıdır.

Bununla birlikte eleştirel perspektifin bazı sınırlılıklarını kaydetmek de analitik dürüstlük açısından gereklidir. Yenilenebilir enerji-depolama kombinasyonunun her koşulda daha ucuz ve yeterli olduğu iddiası, enerji sistemlerinin tüm ihtiyaçlarını aynı anda açıklamakta yetersiz kalabilir. Kısa süreli batarya depolama maliyetleri hızla düşmüş olsa da, büyük ölçekli uzun süreli ve mevsimlik enerji depolama çözümleri hâlen ticari ve teknik açıdan tam olgunluğa ulaşmış değildir. Yüksek yenilenebilir penetrasyon senaryolarında uzun süreli düşük rüzgâr ve düşük güneş üretimi dönemleri, şebeke güvenilirliği açısından ciddi sistem maliyetleri yaratabilmektedir. Bu bağlamda düzenlenebilir, düşük karbonlu ve yüksek kapasite faktörlü kaynaklara duyulan ihtiyaç tamamen ortadan kalkmamaktadır.

Ayrıca SMR'lerin ekonomik değeri yalnızca merkezi elektrik üretimiyle sınırlı düşünülmemelidir. Eleştirel literatür, SMR'leri çoğu zaman büyük şebekelere elektrik satan klasik nükleer santrallerle aynı piyasa segmentinde değerlendirmektedir. Oysa SMR'lerin potansiyel kullanım alanları daha çeşitlidir. Uzak bölgelerde enerji temini, madencilik sahaları, ada şebekeleri, veri merkezleri, savunma sanayii tesisleri, endüstriyel proses ısısı, deniz suyunun tuzdan arındırılması ve düşük karbonlu hidrojen üretimi gibi alanlarda SMR'lerin sistem değeri, yalnızca nominal LCOE kıyaslamasıyla ölçülemeyebilir. Bu alanlarda alternatif çözümlerin maliyeti, yakıt tedarik riski, karbon fiyatı, şebeke bağlantı maliyeti ve arz güvenilirliği gibi unsurlar birlikte değerlendirildiğinde SMR'ler belirli niş pazarlarda daha anlamlı hâle gelebilir.

Dolayısıyla SMR ekonomisine yönelik eleştiriler bütünüyle reddedilmemeli; aksine politika tasarımının merkezine yerleştirilmelidir. Maliyet iyimserliği, küçük ölçek dezavantajı, ilk tesis riski, finansman maliyeti ve öğrenme eğrisinin belirsizliği ciddi sınırlılıklardır. Ancak bu eleştiriler, SMR'lerin her koşulda ekonomik olarak anlamsız olduğu sonucuna da otomatik olarak götürmemelidir. Daha dengeli bir değerlendirme, SMR'lerin büyük ölçekli elektrik piyasalarında kısa vadede zorlanabileceğini; buna karşılık belirli stratejik, endüstriyel ve bölgesel uygulamalarda değer yaratma potansiyeli taşıdığını kabul etmelidir.

Sonuç olarak SMR ekonomisi, ne teknoloji geliştiricilerin sunduğu iyimser maliyet vaatleri üzerinden ne de eleştirel literatürün en olumsuz senaryoları üzerinden tek taraflı biçimde değerlendirilmelidir. Gerçekçi yaklaşım, SMR'leri koşullu bir ekonomik seçenek olarak ele almayı gerektirir. Bu koşullar; standart tasarım, seri üretim sürekliliği, güçlü tedarik zinciri, düşük finansman maliyeti, yüksek kapasite faktörü, güvenilir yakıt tedariki ve uygun kullanım alanlarının doğru seçilmesidir. Bu koşullar sağlanmadığında SMR'ler pahalı ve riskli projeler olarak kalabilir; sağlandığında ise enerji güvenliği, sanayi politikası ve düşük karbonlu dönüşüm açısından tamamlayıcı bir rol üstlenebilir.

6.4 Ekonomik Kırılma Noktaları: SMR'lerin Rekabetçi Olmaya Başladığı Koşullar

Yapılan ekonomik analiz, SMR'lerin rekabetçiliğinin tek bir maliyet göstergesiyle açıklanamayacağını göstermektedir. SMR'lerin ekonomik uygulanabilirliği; sermaye maliyeti, kapasite faktörü, finansman koşulları, yakıt tedarik güvenliği, karbon fiyatı, sistem entegrasyon maliyetleri ve enerji güvenliği değeri gibi çok sayıda değişkenin birlikte oluşmasına bağlıdır. Bu nedenle SMR'lerin hangi koşullarda rekabetçi hâle gelebileceğini ortaya koymak için bir “ekonomik kırılma noktası matrisi” oluşturmak faydalı olacaktır.

Birinci koşul, karbona gerçekçi bir fiyat biçilmesidir. Etkin bir karbon fiyatlandırma mekanizması —ister emisyon ticaret sistemi ister karbon vergisi aracılığıyla— fosil yakıt bazlı elektrik üretiminin iklim maliyetlerini içselleştirerek düşük karbonlu teknolojilerin görece rekabet gücünü artırmaktadır. Karbon fiyatı yükseldikçe doğal gaz ve kömür santrallerinin görünür maliyeti artmakta; buna karşılık nükleer enerji ve SMR'ler gibi düşük karbonlu, düzenlenebilir üretim kaynaklarının sistem içindeki ekonomik değeri daha belirgin hâle gelmektedir. AB Emisyon Ticaret Sistemi kapsamında karbon fiyatlarının son yıllarda yüksek seviyelerde seyretmesi, Avrupa pazarında bu etkinin kısmen ortaya çıkmaya başladığını göstermektedir (European Commission, 2024). Dolayısıyla karbon fiyatlandırması, SMR'lerin nominal LCOE dezavantajını azaltabilecek en önemli dışsal politika araçlarından biridir.

İkinci koşul, yenilenebilir enerji entegrasyon maliyetlerinin sistematik biçimde hesaba katılmasıdır. Rüzgâr ve güneş enerjisi birçok bölgede düşük LCOE değerlerine ulaşmış olsa da, yüksek yenilenebilir penetrasyon oranlarında şebeke esnekliği, yedek kapasite, iletim altyapısı, kısa ve uzun süreli depolama, dengeleme piyasaları ve arz güvenirliliği için ek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Bu maliyetler doğrudan yenilenebilir üretim maliyetine her zaman yansıtılmadığında, farklı teknolojiler arasındaki karşılaştırmalar eksik kalabilmektedir. SMR'ler yüksek kapasite faktörü, sürekli üretim kabiliyeti ve düşük karbonlu düzenlenebilir kapasite sağlamaları nedeniyle, sistem maliyeti perspektifinden değerlendirildiğinde daha anlamlı bir ekonomik konuma yerleşebilir.

Üçüncü koşul, enerji güvenliği priminin fiyatlanmasıdır. Geleneksel LCOE hesaplamaları, yakıt ithalatına bağımlılığın cari açık üzerindeki etkisini, dış fiyat şoklarına maruz kalma riskini, kriz dönemlerinde arz kesintisi olasılığını ve stratejik enerji bağımsızlığının ekonomik değerini yeterince hesaba katmamaktadır. Türkiye gibi enerji ithalat bağımlılığı yüksek, doğal gaz fiyat dalgalanmalarından doğrudan etkilenen ve cari açık baskısı yaşayan ülkelerde enerji güvenliği başlı başına ekonomik bir değerdir. Bu değer hesaba katıldığında, SMR'ler yalnızca piyasa fiyatı

üzerinden değil, uzun vadeli fiyat istikrarı, arz güvenliği ve stratejik dayanıklılık katkısı üzerinden de değerlendirilmelidir.

Dördüncü koşul, seri üretim döngüsünün başlatılmasıdır. SMR'lerin ekonomik vaadi, ilk tesis maliyetlerinden çok, aynı tasarımın çok sayıda üniteyle tekrarlanması sonucunda ortaya çıkacak öğrenme eğrisine dayanmaktadır. İlk ticari tesislerin tamamlanması, gerçek maliyet verilerinin ortaya çıkmasını, tedarik zincirinin olgunlaşmasını, düzenleyici kurumların deneyim kazanmasını ve yatırımcı güveninin artmasını sağlayacaktır. Ancak bu döngünün başlayabilmesi için ilk hareket riskinin kim tarafından üstlenileceği kritik bir sorudur. İlk projelerde devlet desteği, kalkınma finansmanı, kamu garantileri, uzun vadeli alım anlaşmaları ve kurumsal talep taahhütleri belirleyici rol oynayacaktır.

Beşinci koşul, doğru kullanım alanlarının seçilmesidir. SMR'lerin ekonomik olarak en güçlü olduğu alanlar, her zaman büyük şebekeye elektrik satan klasik baz yük santrali modeli olmayabilir. Uzak bölgeler, ada şebekeleri, madencilik sahaları, veri merkezleri, savunma sanayii tesisleri, endüstriyel proses ısısı, bölgesel ısıtma, deniz suyu arıtma ve düşük karbonlu hidrojen üretimi gibi alanlarda SMR'lerin sistem değeri daha yüksek olabilir. Bu uygulamalarda alternatif enerji seçeneklerinin yakıt lojistiği, karbon maliyeti, arz sürekliliği, şebeke bağlantısı ve yedek kapasite maliyetleri hesaba katıldığında, SMR'ler nominal LCOE düzeyinde pahalı görünse bile toplam sistem değeri açısından rekabetçi hâle gelebilir.

Altıncı koşul, finansman maliyetinin düşürülmesidir. Nükleer projelerde sermaye maliyeti, nihai elektrik maliyetinin en belirleyici unsurlarından biridir. Bu nedenle SMR'lerin rekabetçiliği yalnızca mühendislik maliyetlerinin düşmesine değil, aynı zamanda düşük faizli kredi, kamu garantisi, düzenlenmiş gelir modeli, uzun vadeli PPA, vergi teşviki ve devlet destekli filo siparişleri gibi finansman araçlarının etkin biçimde kullanılmasına bağlıdır. Finansman maliyetinin yüksek kaldığı ülkelerde SMR'lerin rekabetçi olması zorlaşırken, güçlü kamu desteği ve güvenilir gelir mekanizmaları olan piyasalarda ekonomik eşik daha ulaşılabilir hâle gelebilir.

Bu koşullar birlikte değerlendirildiğinde, SMR'lerin ekonomik kırılma noktası tek bir fiyat seviyesine indirgenemez. SMR'ler; karbon fiyatının güçlü olduğu, yenilenebilir entegrasyon maliyetlerinin görünür hâle geldiği, enerji güvenliği priminin dikkate alındığı, finansman maliyetlerinin kamu politikasıyla düşürüldüğü ve seri üretim döngüsünün başlatıldığı koşullarda rekabetçi olmaya yaklaşacaktır. Buna karşılık karbonun fiyatlanmadığı, enerji güvenliği değerinin hesaba katılmadığı, finansman maliyetinin yüksek kaldığı ve tekil projelerin seri üretim mantığına dönüşmediği piyasalarda SMR'lerin ekonomik dezavantajı devam edecektir.

Sonuç olarak SMR ekonomisi, mutlak bir başarı veya başarısızlık hikâyesi olarak değil, koşullu bir rekabetçilik problemi olarak değerlendirilmelidir. SMR'lerin rekabetçi olabilmesi için teknoloji maliyetlerinin düşmesi tek başına yeterli değildir; aynı zamanda piyasa tasarımı, karbon politikası, enerji güvenliği öncelikleri, finansman modeli ve sanayi stratejisinin aynı yönde çalışması gerekmektedir. Bu nedenle SMR'lerin ekonomik geleceği, yalnızca reaktör tasarımcılarının başarısına değil, devletlerin düşük karbonlu enerji sistemini nasıl tasarlayacağına ve hangi stratejik değerleri fiyatlandıracağına bağlı olacaktır.

7. TÜRKİYE'NİN ENERJİ GÜVENLİĞİ PROFİLİ VE SMR TEKNOLOJİLERİNİN STRATEJİK POTANSİYELİ

Türkiye'nin enerji politikasını belirleyen yapısal parametreler, yalnızca arz-talep dengesiyle açıklanamayacak kadar çok katmanlı ve dinamik bir nitelik taşımaktadır. Enerji ithalat bağımlılığının yarattığı kronik cari açık baskısı, fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı yüksek duyarlılık, elektrik talebindeki sürekli artış, sanayinin rekabetçi enerji ihtiyacı, coğrafi konumun sunduğu transit enerji güzergâhı avantajları ve iklim taahhütleriyle enerji güvenliği hedefleri arasındaki denge arayışı, Türkiye enerji politikasının temel koordinatlarını oluşturmaktadır. Türkiye, söz konusu çok boyutlu baskılarla başa çıkabilmek için son on beş yılda ciddi kurumsal ve yatırım kapasitesi geliştirmiş; bu süreçte hem yerli enerji üretimini artırmış hem de uluslararası enerji ortaklıklarını çeşitlendirmiştir.

Bu çerçevede Türkiye'nin enerji güvenliği sorunu yalnızca yeterli miktarda enerjiye erişim meselesi değildir. Aynı zamanda enerjinin hangi kaynaklardan, hangi maliyetle, hangi tedarikçiler aracılığıyla, hangi jeopolitik riskler altında ve ne ölçüde düşük karbonlu biçimde sağlanacağı sorusuyla doğrudan bağlantılıdır. Türkiye bu soruları etkin biçimde ele alan kapsamlı bir enerji politikası çerçevesi geliştirmiş; Ulusal Enerji ve Maden Politikası belgesi ile Ulusal Enerji Planı bu çerçevenin temel referans metinleri hâline gelmiştir. Söz konusu belgeler, enerji güvenliğini yalnızca teknik bir arz güvenliği sorunu olarak değil; ekonomik istikrar, dış politika, sanayi rekabetçiliği ve iklim politikasıyla iç içe geçmiş stratejik bir alan olarak konumlandırmaktadır.

SMR teknolojileri bu bağlamda Türkiye için yalnızca yeni bir elektrik üretim seçeneği olarak değil, enerji güvenliği stratejisine derinlik ve esneklik katabilecek potansiyel bir teknoloji alanı olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'nin zaten ortaya koyduğu güçlü yenilenebilir enerji büyümesi ve Akkuyu NGS projesine dayalı nükleer enerji kapasitesinin üzerine, SMR'ler daha kademeli kapasite ekleme, farklı bölgelere konuşlandırılabilme, sanayi tesisleriyle entegre çalışabilme ve düşük karbonlu sürekli güç sağlayabilme gibi tamamlayıcı avantajlar sunabilir. Türkiye bu teknolojiyi doğru politika araçlarıyla içselleştirdiği takdirde, enerji güvenliğini güçlendirirken aynı zamanda teknolojik kapasite ve sanayi katılımı açısından da stratejik kazanımlar elde edebilecektir.

7.1. Türkiye'nin Enerji Güvenliği Profili: Yapısal Kırılganlıkların Anatomisi

7.1.1. Enerji İthalat Bağımlılığı ve Makroekonomik Etkileri

Türkiye, son yıllarda enerji arzının yerli kaynaklardan karşılanması için hızlı adımlar atmakla birlikte, enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü hâlâ ithalat yoluyla karşılamaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı açıklamalarına göre Türkiye'nin enerji ithalat oranı, yenilenebilir enerji kapasitesinin güçlü büyümesine rağmen yüksek seyrini sürdürmektedir (ETKB, 2026). Bu oran, Türkiye'yi küresel fiyat şoklarına ve jeopolitik gerilimlere karşı duyarlı hâle getirmekle birlikte, son yıllarda hayata geçirilen politika önlemleri bu duyarlılığı kademeli olarak azaltmaktadır.

Enerji ithalat faturasının makroekonomik üzerindeki ağırlığı, küresel fiyat dalgalanmaları dönemlerinde en belirgin biçimde görülmektedir. Türkiye'nin enerji ithalat faturası, 2022'deki küresel enerji krizinin etkisiyle yaklaşık 96,5 milyar dolara yükselmiş; ancak akabinde küresel fiyatlardaki normalleşme ve uygulanan politika tedbirleri sayesinde 2024'te yaklaşık 65,6 milyar dolara gerilemiştir. Orta Vadeli Program 2025 için yaklaşık 64 milyar dolarlık bir enerji ithalat

faturası öngörmektedir (TÜİK, 2025; OVP, 2025). Bu düşüş eğilimi, hem küresel fiyat normalleşmesini hem de Türkiye'nin yerli üretim kapasitesini artırmaya yönelik somut başarılarını yansıtmaktadır.

Yerli üretim tarafındaki gelişmeler özellikle dikkat çekicidir. 2025 yılında Türkiye'nin yurt içi petrol üretimi %26 artışla 47,9 milyon varile, doğal gaz üretimi ise %39 artışla 3,2 milyar metreküpe yükselmiştir (ETKB, 2026). Bu artışlar, Türkiye'nin enerji arzında dışa bağımlılığı azaltma hedefine somut katkı sağlamaktadır. Karadeniz sahasındaki Sakarya Gaz Sahası keşfi ve akabinde başlatılan üretim süreci, Türkiye'nin bu alandaki stratejik kararlılığını ve mühendislik kapasitesini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte yıllık 60–70 milyar dolar aralığındaki enerji ithalat faturası, makroekonomik açıdan hâlen yönetilmesi gereken önemli bir kalem olma özelliğini korumaktadır. Bu tablonun temel politika sonucu açıktır: Enerji ithalat bağımlılığının kademeli olarak azaltılması, yalnızca bir enerji güvenliği hedefi değil, aynı zamanda sürdürülebilir büyüme ve makroekonomik istikrar açısından stratejik bir reform alanıdır. Türkiye bu hedefe ulaşmak için eş zamanlı olarak birden fazla strateji izlemekte; yerli üretimi artırmak, yenilenebilir kapasiteyi genişletmek, enerji verimliliği önlemleri almak ve Akkuyu gibi büyük ölçekli düşük karbonlu yatırımları hayata geçirmektedir.

Enerji maliyetleri, Türkiye'nin sanayi rekabetçiliği üzerinde de belirleyici bir rol oynamaktadır. Şeker ve Kılıç Çetin'in (2022) analizinde de ele alındığı üzere, enerji yoğun sektörlerde rekabet gücünün korunması, enerji güvenliği politikasının ekonomik boyutunu öne çıkarmaktadır. Demir-çelik, cam, seramik, çimento, alüminyum ve kimya gibi sektörler, enerji maliyetlerine karşı duyarlı olduğu kadar aynı zamanda Türkiye'nin küresel ihracat performansının da temel taşıyıcılarıdır. AB Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'nın (CBAM) 2026 itibarıyla kesin uygulama dönemine geçmesi, bu sektörlerde düşük karbonlu dönüşümü hem zorunlu hem de stratejik açıdan değerli hâle getirmektedir.

Bu çerçevede SMR teknolojileri, Türkiye'nin enerji ithalat bağımlılığını azaltabilecek, fiyat oynaklığına karşı tampon oluşturabilecek ve sanayiye uzun vadeli fiyat öngörülebilirliği sağlayabilecek bir seçenek olarak değerlendirilmelidir. Nükleer enerjinin yakıt maliyetinin toplam üretim maliyeti içindeki payının düşük olması, bu açıdan önemli bir rekabet avantajı sunmaktadır. SMR'ler ise büyük ölçekli nükleer santrallere kıyasla daha esnek ve kademeli bir kapasite ekleme imkânı sunarak Türkiye'nin enerji güvenliği stratejisine tamamlayıcı bir derinlik katabilir.

7.1.2. Doğal Gaz Bağımlılığının Derinliği ve Çok Boyutlu Riskleri

Türkiye'nin enerji ithalat tablosunda doğal gaz hem hacim hem de stratejik yönetim açısından özel ilgi gerektiren bir kalem olma özelliğini korumaktadır. Karadeniz sahası kaynaklı yerli doğal gaz üretiminde son yıllarda kayda değer artışlar yaşanmakla birlikte, toplam tüketimin büyük bölümü ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Türkiye bu durumu yönetmek için doğal gaz tedarik sepetini çeşitlendirme stratejisini kararlı biçimde uygulamaktadır.

Türkiye'nin doğal gaz tedarik yapısı; Rusya, Azerbaycan, İran ve LNG kaynakları arasında çeşitlenmiş görünmekte olup bu çeşitlendirme yaklaşımı gerçek bir stratejik tercih olarak değerlendirilmelidir (Washington Institute, 2025; BOTAŞ, 2024). Türk Akımı ve Mavi Akım boru hatları üzerinden gelen Rus gazı önemli bir kaynak olmayı sürdürse de Azerbaycan Şah

Deniz sahasından gelen TANAP-TAP güzergâhı ve küresel LNG pazarına bağlanan terminal altyapısı bu çeşitliliği pekiştirmektedir. Türkiye, enerji arzını tek bir tedarikçiye bağlamaktan kaçınma stratejisini son on yılda sistematik biçimde uygulamış ve bu stratejiyi kurumsal mekanizmalarla güçlendirmiştir. Bu çerçevede BOTAŞ'ın 2025 yılında Mercuria ile imzaladığı uzun vadeli LNG tedarik anlaşması, Türkiye'nin çeşitlendirme stratejisinin somut bir göstergesidir. 2026–2045 dönemini kapsayan ve toplamda yaklaşık 70 milyar metreküp doğal gaz eşdeğeri LNG tedarikini öngören bu anlaşma, Türkiye'nin arz güvenliğini uzun vadede güçlendirmeyi ve kaynak çeşitliliğini artırmayı hedeflemektedir. LNG'nin boru gazı alternatifi olarak stratejik esneklik sağlaması, Türkiye'nin enerji güvenliği politikasında önemli bir araç hâline gelmiştir.

Doğal gazın elektrik üretimindeki rolü de dikkatle değerlendirilmektedir. 2025 yılında Türkiye elektrik üretiminin önemli bir bölümü yerli ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmış; güneş ve rüzgârın toplam üretimdeki payı tarihsel olarak yüksek seviyelere ulaşmıştır (ETKB, 2026). Bu gelişme, doğal gazın elektrik sistemi içindeki ağırlığını kademeli olarak azaltmayı hedefleyen politikaların meyvelerini verdiğini göstermektedir. Doğal gaz santralleri, özellikle kış pik talebi ve yenilenebilir üretimin yetersiz kaldığı dönemlerde sistem dengeleme açısından işlevini korumakla birlikte, bu role olan yapısal bağımlılığın azaltılması tutarlı bir politika yönelimini yansıtmaktadır.

Sönmez ve Tekçe'nin (2023) çalışmasında ele alınan sanayi elektrik fiyatlarındaki oynaklık meselesi, Türkiye'nin yeni kapasite yatırımlarını çeşitlendirirken enerji fiyat istikrarını da gözettiğini hatırlatmaktadır. Bu bağlamda SMR teknolojileri, uzun vadede doğal gazın elektrik üretimi ve sanayi enerji tüketimi içindeki payını azaltabilecek düşük karbonlu ve fiyat öngörülebilirliği yüksek bir alternatif olarak Türkiye'nin enerji dönüşüm stratejisini tamamlayabilir.

7.1.3. Yenilenebilir Enerji Dönüşümünün Başarıları ve Yapısal Sınırlılıkları

Türkiye'nin yenilenebilir enerji alanında kaydettiği ilerleme, son on yılın en dikkat çekici enerji politikası başarılarından birini oluşturmaktadır. 2025 yılı sonu itibarıyla Türkiye'nin elektrik tüketimi yaklaşık 361 TWh'a, üretimi ise yaklaşık 363 TWh'a ulaşmıştır (ETKB, 2026). Bu seviye, Türkiye elektrik sistemi açısından tarihsel bir zirveyi ifade etmektedir.

Üretim karmasındaki dönüşüm özellikle dikkat çekicidir. 2025 yılında güneş enerjisinin payı %10,5'e, rüzgâr enerjisinin payı ise %10,7–10,9 aralığına yükselmiş; iki kaynağın toplam payı yıllık bazda ilk kez %21'i geçmiştir. Toplam elektrik üretiminin %56,7'sinin yerli ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanması, Türkiye'nin enerji bağımsızlığı hedefine yönelik somut bir başarı olarak öne çıkmaktadır (ETKB, 2026). Kurulu güç tarafında da paralel bir ivme gözlenmektedir: 2025 sonu itibarıyla toplam kurulu güç 122.519 MW'a ulaşmış; yenilenebilir enerjinin bu içindeki payı %62,3 olarak gerçekleşmiştir. Güneş enerjisi, 25.109 MW ile kurulu güçte ikinci sıraya yükselmiş; rüzgâr enerjisi ise 14.774 MW ile büyümesini sürdürmüştür (ETKB, 2026). Bu veriler, Türkiye'nin yenilenebilir enerji yatırımlarında küresel ölçekte rekabetçi bir profil sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Ulusal Enerji Planı'na göre elektrik tüketiminin 2030'da 455,3 TWh'a, 2035'te ise 510,5 TWh'a ulaşması beklenmektedir. Bu büyük ölçekli talep artışını karşılamak için Türkiye'nin yenilenebilir kapasite artışını hızlandırması; bununla birlikte şebeke esnekliği, depolama yatırımları ve düzenlenebilir düşük karbonlu kaynaklarla desteklenen entegre bir sistem planlaması yürütmesi

gerekmektedir. Haas ve diğerlerinin (2023) çalışmasında da vurgulandığı üzere yüksek yenilenebilir penetrasyonlu sistemlerde düzenlenebilir düşük karbonlu kaynaklar, güvenilir bir elektrik arzının olmazsa olmaz tamamlayıcısı hâline gelmektedir.

Bu bağlamda SMR'ler, Türkiye'nin yenilenebilir enerji başarısını ikame eden değil; yüksek yenilenebilir penetrasyonuna sahip bir elektrik sisteminde arz güvenliği, fiyat istikrarı ve düzenlenebilir düşük karbonlu kapasite sağlayarak onu tamamlayan bir teknoloji olarak değerlendirilmelidir. Türkiye'nin bu iki stratejiyi sinerjik biçimde işleteceği bütüncül bir enerji planlaması hem enerji güvenliğini güçlendirecek hem de 2053 net sıfır hedefine giden yolu daha sağlam temellere oturtacaktır.

7.2. Türkiye'nin Elektrik Talebi Projeksiyonları: Büyümenin Yapısı ve Hızı

7.2.1. Tarihsel Büyüme Eğilimi ve Yapısal Dinamikler

Türkiye'nin elektrik talebi, son çeyrek yüzyılda güçlü ve süreklilik gösteren bir büyüme eğilimi sergilemiştir. 2000 yılında yaklaşık 130 TWh düzeyinde olan elektrik tüketimi, 2025 yılında yaklaşık 361 TWh'a ulaşmış; böylece yirmi beş yılda yaklaşık 2,8 kat artmıştır (ETKB, 2026). Bu büyüme, Türkiye'nin sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı, gelir düzeyi yükselişi ve hizmet sektörünün genişlemesiyle bağlantılı dinamik kalkınma sürecini yansıtmaktadır.

Türkiye'nin elektrik talebi, Avrupa'nın görece durağan talep profilinden ayrılarak büyüme sürecini kararlılıkla sürdürmektedir. Kişi başına elektrik tüketiminin hâlen AB ortalamasının altında seyretmesi, Türkiye ekonomisinin orta ve uzun vadede ek talep artış potansiyeli barındırdığına işaret etmekte; bu durum yatırım planlaması açısından bir güçlük değil, büyüme fırsatı olarak ele alınmalıdır.

TEİAŞ projeksiyonları ve Türkiye Ulusal Enerji Planı, bu büyüme eğiliminin orta vadede devam edeceğini öngörmektedir. Baz senaryoda elektrik tüketiminin 2030'da yaklaşık 455 TWh'a, 2035'te ise yaklaşık 510 TWh'a ulaşması beklenmektedir (ETKB, 2026). Washington Institute'un (2025) değerlendirmesinde yer alan ve Türkiye'nin elektrik ihtiyacının önümüzdeki otuz yıl içinde yaklaşık 1.000 TWh düzeyine çıkabileceğine işaret eden uzun vadeli senaryo ise elektrifikasyonun hızlanması durumunda talep büyümesinin ne denli önemli olabileceğini göstermektedir.

Bu talebi besleyen yapısal dinamikler beş ana eksenle ele alınabilir. Birinci eksen, ulaştırma sektörünün elektrifikasyonudur. Türkiye'de elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması, yerli elektrikli otomobil girişimi TOGG'un üretim ve pazar sürecine girmesi ve Avrupa'nın içten yanmalı motorlardan çıkış eğilimi, otomotiv ekosisteminin dönüşümünü hızlandırmaktadır. İkinci eksen, sanayinin elektrifikasyonudur. AB Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması gibi dış ticaret düzenlemeleri, enerji yoğun sektörleri üretim süreçlerini daha düşük karbonlu hâle getirmeye yönlendirmekte; bu dönüşüm elektrik talebini yapısal olarak artırmaktadır. Üçüncü eksen, binalarda ısıtma ve soğutma talebinin dönüşümüdür. Enerji verimliliği politikaları, ısı pompası teknolojilerinin gelişmesi ve artan iklimlendirme talebi, binalarda elektrik tüketiminin stratejik önemini artırmaktadır. Dördüncü eksen, dijitalleşme ve veri merkezi büyümesidir. Yapay zekâ, bulut bilişim ve bölgesel bağlantı altyapıları, sürekli ve yüksek kaliteli elektrik talebi yaratmaktadır. Beşinci eksen ise yeşil hidrojen üretimi ve yeni sanayi kullanım alanlarıdır.

Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda geliştireceği elektroliz kapasitesi, 2030 sonrasında elektrik talebini önemli ölçüde artıracak bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Bu dinamikler bir arada değerlendirildiğinde, Türkiye'nin elektrik sisteminin gelecekte daha büyük, daha karmaşık ve daha çeşitli bir talep profiline kavuşacağı görülmektedir. Türkiye'nin bu artışı düşük karbonlu, güvenilir, fiyat istikrarlı ve jeopolitik riskleri azaltan kaynaklarla karşılama kapasitesi oluşturması, hem ekonomik kalkınma hem de enerji güvenliği açısından belirleyici bir öneme sahiptir. SMR teknolojileri bu çerçevede, artan elektrik talebinin yönetilmesinde yüksek kapasite faktörü, sürekli üretim kabiliyeti ve sanayiyle entegre kullanım potansiyeliyle tamamlayıcı bir rol üstlenebilir.

7.2.2. 2053 Net Sıfır Hedefi ile Kapasite Gereksinimi Arasındaki Açık

Türkiye, Paris İklim Anlaşması çerçevesinde 2053 yılı için net sıfır emisyon hedefini taahhüt etmiş ve bu hedefi uzun vadeli kalkınma vizyonunun merkezî unsurlarından biri hâline getirmiştir. Türkiye'nin 2053 Uzun Dönemli İklim Stratejisi, enerji, sanayi, ulaşım, binalar ve tarım gibi temel sektörlerde kapsamlı bir düşük karbonlu dönüşüm hedeflemektedir. 2025 yılında yürürlüğe giren İklim Kanunu, Türkiye'nin iklim politikalarını emisyon ticareti sistemi ve kurumsal düzenlemeler üzerinden daha sağlam bir yasal zemine oturtmuştur. Bu gelişmeler, Türkiye'nin net sıfır hedefine yönelik kurumsal kararlılığını somut politika araçlarıyla pekiştirdiğini ortaya koymaktadır.

2025 yılı itibarıyla elektrik üretiminde yerli ve yenilenebilir kaynakların payının %56,7'ye ulaşması, Türkiye'nin bu hedef doğrultusunda kayda değer bir ivme yakaladığının göstergesidir (ETKB, 2026). Yenilenebilir enerji kapasite büyümesi devam ederken, net sıfır hedefinin kapsamı yalnızca elektrik sektörüyle sınırlı olmayıp sanayi, ulaştırma, konut ısıtması ve proses ısısı gibi diğer sektörlerdeki dönüşümü de kapsamaktadır. Bu durum, 2053 hedefine ulaşmanın yenilenebilir enerji yatırımlarının yanı sıra çok daha kapsamlı bir sektörel dönüşüm stratejisi gerektirdiğini göstermektedir.

Toklu ve Evrendilek'in (2024) Türkiye için hazırladığı uzun dönem enerji modeli çalışması, net sıfır 2053 hedefine ulaşabilmek için 2040'a kadar ilave düşük karbonlu ve düzenlenebilir kapasiteye ihtiyaç duyulacağını ortaya koymaktadır. Bu kapasite açığının kapatılmasında yenilenebilir enerji yatırımları temel bileşen olmayı sürdürecektir; bununla birlikte şebeke esnekliği, uzun süreli depolama, enerji verimliliği, düşük karbonlu sanayi dönüşümü ve nükleer enerji gibi tamamlayıcı teknolojilerin entegre planlanması da stratejik önem taşıyacaktır.

Akkuyu NGS'nin dört reaktörünün kademeli olarak devreye girmesiyle ulaşılabilecek 4.800 MWe nükleer kapasite, Türkiye'nin düşük karbonlu elektrik portföyü açısından önemli ve somut bir başlangıç katkısını temsil etmektedir. Türkiye'nin toplam elektrik sistemi ölçeği ve 2053 net sıfır hedefi birlikte değerlendirildiğinde ise nükleer enerji stratejisinin uzun vadede büyük ölçekli santrallerin yanı sıra daha esnek SMR seçeneklerini de kapsamaması, kapasite planlamasına stratejik bir derinlik katacaktır. Bu çerçevede SMR'ler, Türkiye'nin net sıfır stratejisinde tek başına belirleyici çözüm olmaktan öte; kademeli kapasite geliştirme, sanayi karbonsuzlaşması ve enerji güvenliği hedeflerini aynı anda destekleyebilecek stratejik bir tamamlayıcı teknoloji olarak değerlendirilmelidir.

7.3. SMR'lerin Türkiye'de Potansiyel Uygulama Alanları: Sistematik Analiz

7.3.1. Savunma Sanayii ve Kritik Güvenlik Altyapısı

Türkiye'nin savunma sanayii, son on beş yılda gerçekleştirilen köklü dönüşümle küresel ölçekte rekabetçi ve görünür bir konuma yükselmiştir. İnsansız hava araçları, elektronik harp sistemleri, hava savunma platformları, zırhlı araçlar, füze sistemleri, deniz platformları ve komuta-kontrol altyapıları gibi alanlarda gelişen yerli üretim kapasitesi, hem Türk Silahlı Kuvvetleri'nin modernizasyonuna hem de savunma ihracatının önemli ölçüde artmasına katkı sağlamaktadır. Bu dönüşüm aynı zamanda ileri teknoloji üretim tesislerinin, test merkezlerinin, hassas imalat hatlarının, veri işleme altyapılarının ve savunmaya özgü lojistik sistemlerin enerji güvenilirliğine olan talebi de artırmaktadır.

Savunma sanayii tesisleri, klasik sanayi yapılarından farklı olarak yalnızca enerji maliyetine değil; enerji arzının sürekliliğine, güvenilirliğine ve güvenlik koşullarına da yüksek duyarlılık göstermektedir. ASELSAN, TUSAŞ, ROKETSAN, HAVELSAN ve MKE gibi kurumların faaliyet alanları, hassas üretim süreçleri ve kritik test altyapıları nedeniyle güç kalitesi ve kesintisiz enerji sağlama açısından özel bir enerji planlaması gerektirmektedir. Bu özelliklerin bütünü, savunma sanayiini SMR teknolojilerinin Türkiye'deki potansiyel uygulama alanları arasında stratejik açıdan değerli bir başlık olarak öne çıkarmaktadır.

SMR'lerin bu bağlamda sunabileceği ilk değer, kritik tesisler için yüksek güvenilirlikli ve düşük karbonlu enerji arzıdır. Güvenli endüstri bölgeleri veya kritik altyapı kümeleriyle entegre edilmiş kontrollü sahalarda konuşlandırılan SMR tabanlı enerji sistemleri, savunma sanayii tesislerinin şebeke kesintilerine, doğal afetlere ve bölgesel enerji krizlerine karşı daha dayanıklı hâle gelmesine katkıda bulunabilir. Özellikle mikro şebeke konseptiyle desteklenen uygulamalar, kritik üretim ve komuta-kontrol süreçlerinde enerji sürekliliğini güçlendirebilecek bir model sunmaktadır.

İkinci değer, savunma sanayiindeki mevcut teknik yetkinlikler ile nükleer tedarik zinciri gereksinimleri arasındaki olası örtüşmedir. Türkiye'nin savunma firmalarının sahip olduğu kalite güvencesi, hassas imalat, ileri malzeme bilgisi, kontrol-otomasyon sistemleri ve sistem entegrasyonu alanlarındaki birikim, SMR tedarik zincirine belirli alt sistemler ve mühendislik hizmetleri üzerinden katkı sağlayabilecek bir başlangıç zemini oluşturmaktadır. Gerekli sertifikasyon, düzenleyici uyum ve kalite güvence süreçleri tamamlandığı takdirde bu köprü, Türkiye'nin savunma sanayii birikimini nükleer enerji sektörüne aktarmasının somut bir yolunu açabilir.

Türkiye açısından en gerçekçi model, savunma sanayii bölgeleri, kritik üretim kümeleri, veri merkezleri ve stratejik lojistik altyapılar için SMR, yenilenebilir enerji, batarya depolama, yedek güç sistemleri ve gelişmiş mikro şebeke yönetimini birlikte içeren hibrit enerji merkezleri geliştirmektir. Böyle bir yapı, savunma sanayiinin enerji dayanıklılığını artırabilir ve Türkiye'nin SMR ekosistemi etrafında yerli mühendislik kapasitesi oluşturmaya güçlü bir katkı sunabilir.

7.3.2. Organize Sanayi Bölgeleri ve Endüstriyel Küme Uygulamaları

Türkiye'de organize sanayi bölgeleri, sanayi üretiminin mekânsal yoğunlaşmasını sağlayan en önemli kurumsal yapılardan biridir. 2024–2025 dönemi itibarıyla 400'ü aşan OSB sayısı ve bu bölgelerdeki sürekli artan fabrika sayısı ile istihdam, OSB modelinin Türkiye sanayisinin temel taşıyıcısı hâline geldiğini göstermektedir (OSBÜK, 2024). OSB'lerin yüksek ve düzenli elektrik

talebi, süreklilik gerektiren proses ısı ve buhar ihtiyacı ile sanayi karbonsuzlaşması hedefleri, bu bölgeleri SMR teknolojileri açısından potansiyel olarak en güçlü uygulama alanlarından biri hâline getirmektedir.

SMR'lerin OSB entegrasyonu açısından en güçlü aday alanları, enerji yoğun sektörlerin yoğunlaştığı sanayi kümeleridir. Demir-çelik, kimya, petrokimya, cam, seramik, çimento ve alüminyum gibi sektörler, hem yüksek elektrik tüketimine hem de önemli ölçüde ısı ve proses enerjisi ihtiyacına sahiptir. Karabük, Ereğli, İskenderun, Kocaeli, Bursa, İzmir ve Gaziantep gibi sanayi merkezleri, enerji yoğun üretim yapıları nedeniyle SMR tabanlı endüstriyel enerji çözümlerinin değerlendirilebileceği bölgeler arasında öne çıkmaktadır.

SMR'lerin OSB'lerde sağlayabileceği birinci katkı, düşük karbonlu ve sürekli elektrik arzıdır. Yüksek kapasite faktörüyle çalışabilen SMR'ler, enerji yoğun OSB'lerde uzun vadeli elektrik fiyat öngörülebilirliği sunabilecek ve doğal gaz fiyat oynaklığına karşı tampon işlevi görebilecek bir seçenek olarak değer taşımaktadır. İkinci katkı, AB Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması bağlamında ihracat rekabetçiliğinin korunmasıdır. OSB'lerde SMR, yenilenebilir enerji, batarya depolama ve yeşil hidrojen üretimini bir araya getiren hibrit enerji merkezleri, sanayi üretiminin karbon yoğunluğunu azaltabilecek ve AB pazarındaki rekabet gücünü pekiştirebilecek bir model sunmaktadır. Üçüncü katkı ise finansman açısından ortaya çıkmaktadır: OSB'lerin kurumsal yapısı, tekil sanayi tesislerine kıyasla ortak enerji yatırımları için daha uygun bir zemin oluşturmakta; sanayi kullanıcılarından uzun vadeli enerji alım anlaşmaları, SMR finansmanının en kritik koşullarından olan talep garantisini kısmen sağlayabilecektir.

Türkiye açısından en gerçekçi yaklaşım, doğrudan geniş ölçekli OSB konuşlandırmalarına geçmeden önce pilot endüstriyel enerji bölgesi modeli geliştirmektir. Yüksek elektrik talebi olan, ihracat odaklı ve altyapı bakımından uygun bir sanayi kümesinde kapsamlı bir fizibilite çalışması yürütülmesi hem teknik uygulanabilirliği hem ekonomik modeli hem de düzenleyici gereksinimleri test etme imkânı sunacak; Türkiye'nin bu alandaki deneyimini hızla artırmasına katkı sağlayacaktır.

7.3.3. Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da Uzak Bölge ve Madencilik Uygulamaları

Türkiye'nin doğu ve güneydoğu bölgeleri, enerji altyapısı açısından kendine özgü koşullar barındırmaktadır. Dağlık topografya, uzun iletim hatları ve bazı bölgelerde sınırlı şebeke altyapısı, bu bölgelerde enerji arz güvenliğinin özellikle dikkatli yönetilmesini gerektirmektedir. Söz konusu bölgeler aynı zamanda zengin doğal kaynaklar ve stratejik madencilik potansiyeli açısından da önemli bir konuma sahiptir.

Bu bölgelerde SMR teknolojileri, özellikle madencilik ve kritik mineral işleme faaliyetleri bağlamında uzun vadeli bir stratejik seçenek olarak değerlendirilmelidir. Mardin-Mazıdağı çevresindeki fosfat ve gübre sanayii potansiyeli, Siirt-Madenköy bakır sahası ve Doğu Anadolu'daki çeşitli metalik cevherleşme alanları, enerji yoğun madencilik ve işleme süreçleri açısından öne çıkmaktadır. Uzak konumlu büyük madencilik tesislerinde enerji maliyeti toplam işletme giderleri içinde yüksek bir paya ulaşabildiğinden, düşük karbonlu ve kesintisiz enerji sağlayabilecek SMR tabanlı modeller işletme maliyetlerini azaltma ve üretim sürekliliğini güçlendirme açısından stratejik değer taşıyabilir.

SMR'lerin bu alandaki en önemli katkısı, ham cevher çıkarımını yerinde işleme, zenginleştirme ve katma değerli sanayi üretimine dönüştürecek bir enerji altyapısı sağlamasıdır. Güvenilir ve düşük karbonlu enerji arzı, bölgesel istihdamı artırabilir, lojistik maliyetleri azaltabilir ve Türkiye'nin kritik mineral tedarik güvenliğine katkı sunabilir. Bu potansiyelin hayata geçirilmesi için kapsamlı bölgesel fizibilite çalışmaları yürütülmesi; saha güvenliği, nüfus yoğunluğu, su kaynakları, deprem riski, çevresel etki ve acil durum planlaması gibi parametrelerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

7.3.4. Yeşil Hidrojen Üretim Altyapısı

Türkiye'nin 2023 yılında açıkladığı Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda hidrojenin sanayi, enerji depolama, ulaştırma ve ihracat rekabetçiliği açısından stratejik bir araç olarak kullanılmasını öngörmektedir. Yol haritasında elektrolizör kurulu güç kapasitesinin 2030'da 2 GW'a, 2035'te 5 GW'a ve 2053'te 70 GW'a çıkarılması hedeflenmektedir (ETKB, 2023). Bu hedefler, Türkiye'nin hidrojen ekonomisini uzun vadede büyük ölçekte geliştirme konusundaki stratejik kararlılığını yansıtmaktadır.

SMR teknolojileri, Türkiye'nin hidrojen stratejisine birbirleriyle ilişkili iki önemli katkı sunabilir. İlk olarak SMR'ler, yüksek kapasite faktörüyle sürekli düşük karbonlu elektrik sağlayarak elektrolizörlerin daha düzenli ve ekonomik çalışmasına destek olabilir. Yalnızca yenilenebilir enerjiye bağlı çalıştırıldığında kapasite faktörü düşük kalan elektrolizörlerin verimini artırması, SMR destekli hibrit hidrojen üretim modellerinin temel avantajlarından biridir. Bu yaklaşımda yenilenebilir üretimin yüksek olduğu dönemlerde yenilenebilir elektrik, üretimin düşük olduğu dönemlerde ise nükleer kaynaklı düşük karbonlu elektrik devreye girerek kesintisiz bir üretim sürekliliği sağlanabilir. İkinci olarak bazı ileri SMR tasarımları, yüksek sıcaklık buhar elektrolizi (HTSE) veya termokimyasal hidrojen üretim döngüleri için ısı sağlayabilme potansiyeli taşımaktadır. Bu yöntemlerin geleneksel düşük sıcaklık elektrolizine kıyasla daha yüksek verimlilik sunabileceği değerlendirilmekle birlikte, bu potansiyelin gerçekleştirilmesi belirli reaktör tasarımlarıyla sınırlıdır.

Türkiye açısından en gerçekçi senaryo, yenilenebilir enerji, SMR, elektrolizör ve sanayi tüketimini bir araya getiren bölgesel hidrojen üretim merkezlerinin geliştirilmesidir. Güneydoğu Anadolu'daki yüksek güneş potansiyeli, Karadeniz ve Marmara rüzgârları, enerji yoğun sanayi bölgelerinin hidrojen talebi ve olası SMR kurulumları birlikte değerlendirildiğinde, bütüncül bir hidrojen altyapısı oluşturulabilir. Demir-çelik, kimya, gübre, rafineri ve ağır ulaştırma sektörleri bu altyapının ilk talep merkezleri olarak öne çıkmaktadır. Böyle bir modelde SMR'ler, yenilenebilir enerjiye rakip değil; yüksek hacimli, güvenilir ve düşük karbonlu hidrojen üretimini destekleyen tamamlayıcı bir teknoloji seçeneği olarak konumlanacaktır.

7.3.5. Veri Merkezleri ve Dijital Altyapı

Türkiye'nin Avrupa, Orta Doğu, Kafkasya ve Orta Asya arasındaki stratejik konumu, fiber bağlantı kapasitesi ve büyük iç pazarı, ülkeyi bölgesel veri merkezi yatırımları açısından giderek daha cazip bir destinasyon hâline getirmektedir. Bulut bilişim, yapay zekâ, finansal teknoloji altyapıları, kamu dijitalleşmesi, savunma sanayii veri sistemleri ve bölgesel bağlantı hatları, yüksek güvenilirlikli ve kesintisiz elektrik talebini artırmakta; bu talep Türkiye'nin dijital altyapı stratejisini enerji güvenliği politikasıyla doğrudan ilişkilendirmektedir.

Küresel ölçekte büyük teknoloji şirketlerinin enerji stratejilerinde yaşanan dönüşüm, bu ilişkinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Microsoft, Google ve Amazon gibi şirketler, veri merkezi operasyonları için giderek artan oranda 7/24 düşük karbonlu enerji tedarikine yönelmektedir. Özellikle yapay zekâ kaynaklı elektrik talebi artışı, teknoloji şirketlerini SMR'ler, uzun süreli depolama ve hibrit enerji altyapıları gibi sürekli düşük karbonlu çözümlere daha yakından yöneltmektedir. Bu eğilim, SMR'lerin veri merkezi enerji tedarik modellerinde küresel ölçekte nasıl konumlandığını ortaya koymakta ve Türkiye için önemli dersler barındırmaktadır.

Türkiye'de büyük ölçekli veri merkezi kampüslerinin uzun vadede yenilenebilir enerji anlaşmaları, depolama sistemleri ve düşük karbonlu düzenlenebilir kaynaklarla desteklenmesi stratejik önem taşımaktadır. Bu çerçevede en gerçekçi model, SMR tesisinin güvenlik ve lisanslama açısından uygun bir sahada konuşlandırılması ve veri merkezi kampüslerinin uzun vadeli elektrik alım anlaşmaları yoluyla bu düşük karbonlu üretimden yararlanması olabilir. Böyle bir yapı, hem veri merkezi işletmecilerine 7/24 düşük karbonlu enerji temini sağlayabilir hem de SMR projeleri için güçlü ve kredi değeri yüksek kurumsal talep yaratabilir. SMR, yenilenebilir enerji, batarya depolama ve gelişmiş soğutma sistemlerinden oluşan hibrit enerji çözümleri, Türkiye'nin uzun vadeli dijital altyapı rekabetçiliği açısından bütüncül ve gerçekçi bir çerçeve sunmaktadır.

7.4. Türkiye'nin Mevcut Nükleer Programı ve SMR'lerin Tamamlayıcı Rolü

Akkuyu NGS projesi, Türkiye'nin nükleer enerji alanına girişinin en somut ve en kapsamlı adımını temsil etmekte; bu alanda oluşturulan kurumsal birikim, Türkiye'nin enerji politikasında tarihsel bir dönüm noktasını işaretlemektedir. Mersin'de inşa edilen dört adet VVER-1200 reaktörü, toplam 4.800 MWe kurulu güçle Türkiye'nin elektrik arz portföyüne önemli miktarda düşük karbonlu baz yük kapasitesi ekleyecektir. İlk ünitenin devreye alınması için 2026 yılı hedeflenmekte; projenin tamamlandığında Türkiye'nin yıllık elektrik ihtiyacının yaklaşık %10'unu karşılaması öngörülmektedir (Rosatom, 2024).

Akkuyu'nun Türkiye açısından stratejik katkıları çok boyutludur. Proje, Türkiye'ye ticari ölçekte nükleer santral işletme deneyimi kazandıracak; nükleer düzenleyici kapasitenin gelişmesine, insan kaynağı oluşumuna, tedarik zinciri farkındalığının artmasına ve nükleer enerjinin kamu politikası gündeminde kalıcı biçimde yer edinmesine zemin hazırlayacaktır. Nükleer enerjinin yüksek kapasite faktörüyle çalışabilen ve uzun vadede fiyat istikrarı sunan üretim profili, Türkiye'nin doğal gaz bağımlılığını azaltma ve elektrik arz güvenliğini güçlendirme hedefleriyle güçlü bir uyum içindedir. Bu nedenle Akkuyu, Türkiye'nin enerji dönüşümünde hem stratejik hem de kurumsal açıdan vazgeçilmez bir başlangıç noktasını oluşturmaktadır.

Akkuyu'nun büyük ölçekli ve merkezi yapısı, Türkiye elektrik sistemine önemli miktarda baz yük kapasitesi sağlamakla birlikte; dağıtık enerji güvenliği, sanayi kümelerine yakın düşük karbonlu güç sağlama, veri merkezleri, kritik altyapılar ve endüstriyel proses ısısı gibi farklı uygulama alanlarında daha esnek çözümlere ihtiyaç duyulmaya devam edilecektir. SMR'lerin tamamlayıcı değeri tam da bu noktada ortaya çıkmaktadır: büyük ölçekli nükleer santrallerin sağlayamadığı kademeli kapasite ekleme, bölgesel konuşlandırma ve sanayile entegre çalışabilme imkânını sunma.

Yeşilada ve Efeğil'in (2022) çalışmasında da ele alındığı üzere, Türkiye'nin gelecekteki nükleer stratejisinde tedarikçi çeşitlendirmesi, yerli sanayi katılımı ve teknoloji transferi mekanizmaları

giderek daha fazla önem kazanmaktadır. SMR teknolojileri bu strateji için önemli bir fırsat penceresi açmaktadır: Birden fazla teknoloji ailesi ve tedarikçi ülkeden seçim yapılabilmesi, hem tedarikçi bağımlılığını azaltacak hem de Türkiye'nin nükleer mühendislik kapasitesinin farklı tasarım felsefeleriyle çeşitlenmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak Akkuyu NGS, Türkiye'nin nükleer enerji tarihinde kritik ve dönüştürücü bir adımdır. Bu deneyimin üzerine inşa edilen SMR stratejisi ise Türkiye'nin enerji güvenliği portföyünü genişletecek, yeni uygulama alanları açacak ve uzun vadede daha esnek, daha çeşitlendirilmiş ve daha yüksek yerli katılım içeren bir nükleer enerji modelinin kurulmasına zemin hazırlayacaktır. Türkiye'nin enerji güvenliği profili; stratejik potansiyeli, artan elektrik talebi, net sıfır taahhütleri, sanayi karbonsuzlaşması hedefleri ve Akkuyu ile oluşturulan nükleer birikim bir arada değerlendirildiğinde, SMR teknolojileri için belirgin ve gerçekçi bir stratejik alan ortaya çıkmaktadır. Bu potansiyelin somut bir politika başarısına dönüşebilmesi ise hedefleri, öncelikli eylem alanlarını, teknoloji seçim kriterlerini, finansman modellerini ve kurumsal sorumlulukları bütüncül biçimde ele alan kapsamlı bir yol haritasını zorunlu kılmaktadır.

8. TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK YOL HARİTASI: 2026-2053 POLİTİKA ÇERÇEVESİ

Bir stratejik yol haritasının entelektüel ve pratik değeri, yalnızca hangi adımların atılması gerektiğini belirtmesinden değil; bu adımların neden belirli bir sırayla, hangi öncelik hiyerarşisi içinde ve hangi kurumsal sorumluluk dağılımıyla uygulanması gerektiğini açıklamasından kaynaklanmaktadır. SMR teknolojileri gibi yüksek sermaye gerektiren, uzun vadeli, düzenleyici açıdan karmaşık ve jeopolitik sonuçlar doğuran bir alanda yol haritası, yalnızca teknik bir planlama belgesi değil; enerji güvenliği, sanayi politikası, iklim hedefleri, nükleer güvenlik ve dış politika arasında koordinasyon kuran stratejik bir çerçeve niteliği taşımaktadır.

Bu bölüm, Türkiye'nin SMR teknolojilerine yönelik kapsamlı politika çerçevesini üç zaman dilimi üzerinden yapılandırmaktadır: kısa vade (2026–2030), orta vade (2030–2040) ve uzun vade (2040–2053). Bu dönemlendirme, SMR teknolojilerinin ticari olgunluk düzeyi, Türkiye'nin mevcut nükleer kapasitesi, enerji talep projeksiyonları, net sıfır hedefi ve kurumsal hazırlık gereksinimleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Her dönem, bir önceki dönemin öğrenimleri, kurumsal kapasite birikimi ve piyasa tecrübeleri üzerine inşa edilmekte; böylece kümülatif ve öz-pekiştirmeli bir stratejik ilerleme mantığı kurulmaktadır.

Kısa vadede temel amaç, SMR seçeneklerini sağlıklı biçimde değerlendirebilecek kurumsal, teknik ve düzenleyici altyapıyı oluşturmaktır. Orta vadede hedef, pilot uygulamalar, teknoloji seçimi, tedarikçi çeşitlendirmesi ve yerli sanayi katılımı üzerinden SMR programını somutlaştırmaktır. Uzun vadede ise SMR teknolojilerinin Türkiye'nin enerji güvenliği, sanayi karbonsuzlaşması, hidrojen üretimi, kritik altyapı dayanıklılığı ve bölgesel teknoloji diplomasisi hedefleriyle bütünlüştürmüş bir nükleer portföy unsuru hâline gelmesi amaçlanmaktadır.

Bu yol haritasında önerilen her adım, yalnızca “yapılması gereken” bir politika tavsiyesi olarak değil; gerekçesi, sorumlu aktörleri, ölçülebilir başarı göstergeleri ve beklenen çıktılarıyla birlikte ele alınmalıdır. Böyle bir yaklaşım, SMR politikasının soyut bir teknoloji vizyonu olarak kalmasını engelleyecek; aksine uygulanabilir, izlenebilir ve gerektiğinde revize edilebilir bir kamu politikası alanına dönüşmesini sağlayacaktır. Türkiye açısından kritik mesele, SMR teknolojilerine erken ve plansız biçimde yönelmek değil; doğru zamanda, doğru teknolojiyle, doğru finansman modeliyle ve doğru kurumsal kapasiteyle ilerleyebilmektir.

8.1 Kısa Vade (2026-2030): Stratejik Temellerin İnşası

Kısa vadeli dönem, Türkiye'nin SMR teknolojilerini gerçekçi biçimde değerlendirebilmesi ve ilerleyen aşamalarda daha somut yatırım kararları alabilmesi için zorunlu ön koşulların oluşturulduğu temel inşa aşamasını temsil etmektedir. Bu dönemin temel amacı, doğrudan büyük ölçekli SMR yatırımlarına girişmekten ziyade; teknoloji izleme, düzenleyici hazırlık, insan kaynağı geliştirme, tedarik zinciri analizi, saha ön değerlendirmesi ve finansman modeli tasarımı gibi kritik hazırlık alanlarında kurumsal kapasite oluşturmaktır.

Bu aşamada atılacak adımların geciktirilmesi, 2030 sonrası dönemde Türkiye'nin SMR teknolojileri olgunlaştığında hızlı ve bilinçli karar alma kapasitesini zayıflatabilir. SMR projeleri, klasik enerji yatırımlarından farklı olarak uzun lisanslama süreçleri, nükleer güvenlik gereklilikleri, yakıt tedarik anlaşmaları, saha seçimi, kamuoyu kabulü ve uluslararası iş birliği mekanizmaları

gerektirmektedir. Bu nedenle kısa vadede yapılacak hazırlıklar, orta ve uzun vadeli stratejinin başarısı açısından belirleyici niteliktedir.

Bu dönemde Türkiye'nin önceliği, tek bir tedarikçiye veya tek bir teknoloji ailesine erken aşamada bağlanmak olmamalıdır. Bunun yerine farklı SMR tasarımlarını teknik, ekonomik, güvenlik, yakıt tedariki, yerli sanayi katılımı ve jeopolitik bağımlılık kriterleriyle karşılaştırabilecek bağımsız bir değerlendirme kapasitesi geliştirilmelidir. Böyle bir kapasite, Türkiye'nin gelecekteki teknoloji seçimlerinde yalnızca geliştirici şirketlerin beyanlarına değil, ulusal çıkarları esas alan bütüncül bir analiz çerçevesine dayanmasını sağlayacaktır.

8.1.1 Ulusal SMR Strateji Belgesi'nin Hazırlanması ve Resmi Onayı

Türkiye'nin nükleer enerji hedefleri içinde SMR teknolojilerine yönelik ilginin giderek arttığı görülmekle birlikte, henüz SMR'lere özgü, bütünlük ve kamuoyuna açık bir ulusal strateji belgesinin bulunmaması önemli bir politika boşluğu yaratmaktadır. Mevcut durumda SMR teknolojileri izlenmekte, uluslararası gelişmeler takip edilmekte ve farklı teknoloji sağlayıcılarıyla temaslar yürütülmektedir. Ancak bu faaliyetlerin uzun vadeli teknoloji seçimi, finansman modeli, yerli sanayi katılımı, yakıt tedarik güvenliği ve düzenleyici hazırlık gibi başlıkları kapsayan bütünlük bir politika çerçevesine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Bu boşluk, kaynak tahsisinin dağınık kalmasına, kurumlar arası koordinasyonun zayıflamasına ve uluslararası ortaklık müzakerelerinde stratejik netliğin eksik olmasına yol açabilir. SMR teknolojileri, yalnızca enerji üretim kapasitesiyle ilgili bir konu değildir; aynı zamanda nükleer güvenlik, sanayi politikası, yakıt zinciri, kritik altyapı güvenliği, ihracat potansiyeli, insan kaynağı ve jeopolitik bağımlılık gibi çok sayıda alanla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle Türkiye'nin SMR politikasının proje bazlı ve parçalı girişimler yerine, resmî olarak tanımlanmış ulusal bir strateji belgesi etrafında şekillendirilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda 2027 yılı sonuna kadar hazırlanması ve Cumhurbaşkanlığı düzeyinde onaylanması hedeflenecek Ulusal SMR Strateji Belgesi, Türkiye'nin 2053 enerji ve net sıfır hedefleriyle uyumlu biçimde tasarlanmalıdır. Belge, öncelikle Türkiye'nin SMR teknolojilerinden ne beklediğini açık biçimde tanımlamalıdır: Bu teknolojiler yalnızca elektrik üretimi için mi değerlendirilecektir, yoksa sanayi bölgeleri, veri merkezleri, hidrojen üretimi, kritik altyapılar, uzak bölge enerji arzı ve savunma sanayii gibi özel uygulama alanlarında da stratejik rol üstlenecek midir? Bu soruya verilecek yanıt, teknoloji seçimi ve finansman modelinin temelini oluşturacaktır.

Strateji belgesinin ilk ana başlığı teknoloji öncelikleri olmalıdır. Türkiye, hafif su reaktörü temelli SMR'ler, yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler, erimiş tuz reaktörleri, hızlı reaktörler ve mikro reaktörler gibi farklı teknoloji ailelerini; güvenlik, lisanslanabilirlik, yakıt tedariki, ticari olgunluk, maliyet, yerli sanayi katkısı ve jeopolitik bağımlılık kriterleri üzerinden karşılaştırmalıdır. Bu değerlendirme sonucunda kısa vadede izlenecek, orta vadede pilot uygulama için aday gösterilecek ve uzun vadede Ar-Ge düzeyinde takip edilecek teknoloji sınıfları ayrı ayrı belirlenmelidir.

İkinci ana başlık kapasite hedefleri olmalıdır. Türkiye'nin 2053 yılı için öngördüğü toplam nükleer kapasite hedefi içinde SMR'lerin hangi paya sahip olabileceği açık biçimde tanımlanmalıdır. Bu hedef, kesin ve değişmez bir kurulu güç rakamı olarak değil; farklı talep, maliyet ve teknoloji olgunluğu senaryolarına göre güncellenebilir bir kapasite aralığı olarak belirlenmelidir. Böylece

SMR programı hem uzun vadeli yatırım sinyali üretebilir hem de teknoloji ve piyasa gelişmelerine göre esnekliğini koruyabilir.

Üçüncü ana başlık uluslararası ortaklık modelleridir. Türkiye, SMR alanında tek bir tedarikçi ülkeye veya tek bir teknoloji ailesine erken aşamada bağımlı hâle gelmekten kaçınmalıdır. Bunun yerine ABD, Kanada, Birleşik Krallık, Güney Kore, Fransa, Japonya ve diğer potansiyel teknoloji sağlayıcılarıyla farklı iş birliği kanalları oluşturulmalı; ancak bu iş birlikleri yalnızca reaktör alımıyla sınırlı tutulmamalıdır. Teknoloji değerlendirme, düzenleyici kapasite geliştirme, yakıt tedarik güvenliği, yerli üretim, mühendislik hizmetleri, insan kaynağı eğitimi ve üçüncü ülkelere yönelik ortak proje geliştirme gibi alanlar da ortaklık çerçevesine dâhil edilmelidir.

Dördüncü ana başlık finansman araçları olmalıdır. SMR projelerinin salt piyasa dinamikleriyle finanse edilmesi kısa ve orta vadede gerçekçi görünmemektedir. Bu nedenle strateji belgesi; kamu-özel ortaklığı, uzun vadeli elektrik alım anlaşmaları, düzenlenmiş gelir modelleri, kalkınma finansmanı, ihracat kredileri, yeşil finansman araçları, sanayi kullanıcılarıyla ortak yatırım modelleri ve pilot demonstrasyon fonları gibi farklı finansman seçeneklerini değerlendirmelidir. Özellikle OSB'ler, veri merkezleri, hidrojen üretim tesisleri ve kritik altyapılar için geliştirilecek SMR projelerinde talep tarafının finansmana nasıl dâhil edileceği açık biçimde tanımlanmalıdır.

Beşinci ana başlık kurumsal sorumluluk yapısı olmalıdır. Ulusal SMR Strateji Belgesi'nin hazırlanma sürecinde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı koordinatör kurum olarak konumlandırılmalı; TENMAK, Nükleer Düzenleme Kurumu, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Savunma Sanayii Başkanlığı, Dışişleri Bakanlığı, TEİAŞ, EPDK ve ilgili kamu kurumları sürece dâhil edilmelidir. Bunun yanında TÜBİTAK, üniversiteler, TOBB, OSBÜK, TÜSİAD, MÜSİAD, ilgili meslek odaları ve enerji yoğun sektör temsilcileri de danışma mekanizmasının parçası olmalıdır.

Bu belgenin hazırlanma süreci dışlayıcı değil, kapsayıcı biçimde tasarlanmalıdır. Nükleer enerji ve SMR teknolojileri, kamuoyu güveni ve toplumsal meşruiyet olmadan sürdürülebilir bir politika alanına dönüşemez. Bu nedenle bağımsız akademisyenler, uzman kuruluşlar, çevre örgütleri, yerel yönetimler ve sivil toplum temsilcileri belirli aşamalarda görüş verme sürecine dâhil edilmelidir. Böyle bir katılım mekanizması, strateji belgesinin niteliğini artıracak gibi uygulama aşamasında ortaya çıkabilecek toplumsal dirençleri azaltmaya da katkı sağlayacaktır.

Ulusal SMR Strateji Belgesi, devlet tekeli anlayışıyla değil, kamu öncülüğünde fakat özel sektör, akademi ve sanayi ekosistemini içeren çoğulcu bir modelle tasarlanmalıdır. Devletin rolü; stratejik yönü belirlemek, düzenleyici altyapıyı güçlendirmek, ilk tesis risklerini azaltmak, uluslararası ortaklıkları yönlendirmek ve güvenlik standartlarını korumak olmalıdır. Özel sektörün rolü ise mühendislik, imalat, finansman, işletme, veri merkezi ve sanayi uygulamaları gibi alanlarda kademeli biçimde artırılmalıdır. Bu yaklaşım, Türkiye'nin SMR teknolojilerini yalnızca ithal eden değil, zaman içinde belirli bileşenlerde ve hizmet alanlarında değer üreten bir ülke hâline gelmesine katkı sağlayabilir.

Strateji belgesinin başarısı, yalnızca yayımlanmasına değil, uygulanabilir ve izlenebilir olmasına bağlıdır. Bu nedenle belge; her eylem için sorumlu kurumları, zaman çizelgesini, bütçe ihtiyacını, performans göstergelerini ve izleme-değerlendirme mekanizmasını içermelidir. 2027 sonunda belgenin yayımlanması, 2028'de uygulama eylem planının hazırlanması ve 2030'a kadar ilk

ilerleme değerlendirme raporunun kamuoyuyla paylaşılması, sürecin kurumsallaşması açısından anlamlı bir takvim sunabilir.

Sonuç olarak Ulusal SMR Strateji Belgesi, Türkiye'nin SMR alanındaki dağınık ilgisini bütünleşik bir devlet politikasına dönüştürecek ilk temel adımdır. Bu belge, Türkiye'nin hangi teknolojileri neden izleyeceğini, hangi uygulama alanlarına öncelik vereceğini, hangi ülkelerle nasıl ortaklık kuracağını, finansman risklerini nasıl yöneteceğini ve yerli sanayi kapasitesini nasıl geliştireceğini açık biçimde ortaya koymalıdır. Strateji belgesi yönelimi ve çerçeveyi belirleyecektir; ancak bu çerçevenin işlerlik kazanabilmesi için temel kurumsal aktörlerin, özellikle TENMAK ve NDK'nin, SMR çağının gerektirdiği teknik, düzenleyici ve kurumsal dönüşümü gerçekleştirmesi gerekmektedir.

8.1.2 TENMAK ve NDK'nin Kurumsal Kapasite Dönüşümü

Türkiye'nin nükleer kurumsal yapısı, son yıllarda araştırma-geliştirme işlevleri ile düzenleyici-denetleyici işlevlerin birbirinden ayrıştırılması yönünde önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun tarihsel olarak taşıdığı araştırma, teknoloji geliştirme, radyasyon uygulamaları ve düzenleyici işlevler; yeni kurumsal mimaride farklı kurumlar arasında yeniden dağıtılmıştır. Bu çerçevede enerji, nükleer ve maden teknolojilerine ilişkin araştırma-geliştirme, teknoloji geliştirme ve bilimsel kapasite oluşturma faaliyetleri Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) bünyesinde toplanırken; nükleer güvenlik, radyasyon güvenliği, lisanslama, yetkilendirme, denetim ve düzenleyici kontrol işlevleri Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) tarafından yürütülmektedir.

Bu kurumsal ayrışma, nükleer düzenleyici bağımsızlık açısından olumlu bir zemin oluşturmaktadır. Ancak SMR teknolojileri, mevcut kurumsal kapasitenin yalnızca korunmasını değil, yeni teknolojik gerçekliklere göre derinleştirilmesini gerektirmektedir. SMR'lerin modüler üretim mantığı, fabrika ortamında bileşen imalatı, farklı soğutucu teknolojileri, uzun ömürlü yakıt çevrimleri, HALEU kullanımı, mikro şebeke entegrasyonu, dağıtık konuşlandırma ve bazı tasarımlarda yenilikçi güvenlik sistemleri gibi özellikleri, klasik büyük ölçekli hafif su reaktörlerine göre daha farklı bir düzenleyici hazırlık gerektirmektedir. Bu nedenle kurumsal dönüşüm, yalnızca mevzuat güncellemesiyle sınırlı kalmamalı; insan kaynağı, teknik analiz kabiliyeti, uluslararası iş birliği, dijital altyapı ve güvenlik kültürü boyutlarını da kapsamalıdır.

Bu dönüşümün ilk önceliği, Türkiye koşullarına uyarlanmış bir SMR lisanslama çerçevesinin hazırlanması olmalıdır. NDK, Kanada Nükleer Güvenlik Komisyonu'nun ön lisanslama ve satıcı tasarım değerlendirmesi uygulamaları ile ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu'nun ileri reaktörler için geliştirdiği risk-temelli ve teknoloji-kapsayıcı düzenleyici yaklaşımları sistematik biçimde incelemelidir. Bu inceleme sonucunda 2028 yılı sonuna kadar SMR'lere özgü bir lisanslama ve değerlendirme rehberi hazırlanmalı; bu rehber tasarım olgunluğu, reaktör tipi, yakıt yapısı, güç seviyesi, saha özellikleri ve kullanım amacı gibi kriterlere göre farklılaştırılmış gereklilikler içermelidir.

İkinci öncelik, NDK bünyesinde SMR'lere ve ileri reaktörlere odaklanan uzmanlaşmış bir lisanslama ve denetleme biriminin kurulmasıdır. Bu birim; hafif su SMR'leri, yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler, erimiş tuz reaktörleri, hızlı reaktörler ve mikro reaktörler gibi farklı teknoloji ailelerini değerlendirebilecek disiplinlerarası uzmanlığa sahip olmalıdır. Birimin görevleri yalnızca başvuru dosyası incelemekle sınırlı kalmamalı; tasarım değerlendirmesi, saha uygunluğu,

probabilistik güvenlik analizi, siber güvenlik, fiziksel koruma, acil durum planlaması, yakıt güvenliği ve güvence-denetim gerekliliklerini bütüncül biçimde kapsmalıdır.

Üçüncü öncelik, fabrika üretimi ve modüler inşaat süreçlerine yönelik denetim kapasitesinin geliştirilmesidir. SMR'lerin ekonomik vaadi büyük ölçüde standart modül üretimine dayandığından, düzenleyici denetim yalnızca santral sahasında değil, kritik bileşenlerin üretildiği fabrikalarda da etkin biçimde yürütülmelidir. Bu kapsamda NDK'nin nükleer kalite güvence, tedarik zinciri izlenebilirliği, imalat sertifikasyonu, kaynak ve malzeme doğrulama, dijital ikiz uygulamaları ve fabrika kabul testleri gibi alanlarda özel denetim prosedürleri geliştirmesi gerekmektedir. Böyle bir yaklaşım, Türkiye'nin ileride SMR bileşen üretimine katılabilmesi için de temel kalite altyapısını oluşturacaktır.

Dördüncü öncelik, TENMAK'ın SMR araştırma ve teknoloji değerlendirme kapasitesinin güçlendirilmesidir. TENMAK, doğrudan düzenleyici rol üstlenmeden; SMR teknolojilerinin teknik analizini yapabilecek, yakıt çevrimi seçeneklerini değerlendirebilecek, reaktör fiziği ve termohidrolik modelleme çalışmaları yürütebilecek, malzeme dayanımı ve radyasyon hasarı gibi alanlarda araştırma kapasitesi oluşturabilecek bir ulusal teknik merkez hâline getirilmelidir. Bu kapsamda TENMAK bünyesinde SMR ve ileri reaktör teknolojilerine odaklanan özel bir araştırma programı kurulmalı; üniversiteler, TÜBİTAK, sanayi kuruluşları ve uluslararası araştırma merkezleriyle ortak projeler geliştirilmelidir.

Beşinci öncelik, TENMAK ve NDK arasında açık görev ayırımına dayalı fakat koordinasyon içeren bir çalışma mekanizması kurulmasıdır. NDK'nin düzenleyici bağımsızlığı korunmalı; TENMAK'ın araştırma ve teknoloji geliştirme faaliyetleri lisanslama kararları üzerinde doğrudan yönlendirici bir baskıya dönüşmemelidir. Buna karşılık teknik bilgi paylaşımı, uzman havuzu oluşturma, uluslararası toplantılara ortak katılım, veri tabanı geliştirme ve eğitim programları gibi alanlarda iki kurum arasında yapılandırılmış koordinasyon sağlanmalıdır. Bu denge, hem düzenleyici bağımsızlığı hem de teknik kapasite birikimini güçlendirecektir.

Altıncı öncelik, uluslararası kapasite geliştirme programlarına sistematik katılımdır. TENMAK'ın IAEA'nın SMR ve ileri reaktörlere ilişkin koordineli araştırma projelerine, teknik toplantılarına ve eğitim programlarına daha aktif katılımı sağlanmalıdır. NDK ise IAEA'nın düzenleyici kapasite geliştirme programları, SMR güvenlik standartları çalışmaları ve uluslararası düzenleyici iş birlikleriyle daha yakın temas içinde olmalıdır. Ayrıca Kanada, ABD, Birleşik Krallık, Güney Kore ve Fransa gibi SMR lisanslama deneyimi gelişen ülkelerin düzenleyici kurumlarıyla ikili teknik iş birliği mekanizmaları kurulmalıdır. Bu sayede Türk uzmanların yalnızca belge takibi yapan değil, uluslararası düzenleyici tartışmalara katkı sunan aktörler hâline gelmesi mümkün olabilir.

Yedinci öncelik, dijital ve analitik altyapının güçlendirilmesidir. SMR tasarımlarının değerlendirilmesi, ileri hesaplama araçları, reaktör fiziği kodları, termohidrolik simülasyonlar, olasılıksal güvenlik analizleri, yakıt performans modellemeleri, siber güvenlik test altyapıları ve acil durum senaryo modellemeleri gerektirmektedir. Türkiye'nin bu alanlarda dışa bağımlı kalması, teknoloji seçim sürecinde bağımsız değerlendirme kapasitesini zayıflatabilir. Bu nedenle TENMAK ve NDK'nin modern hesaplama altyapısı, yazılım lisansları, veri güvenliği sistemleri ve uzman eğitim programlarıyla desteklenmesi gerekmektedir.

Bu kurumsal dönüşümün ölçülebilir başarı göstergeleri açık biçimde tanımlanmalıdır. 2028 yılına kadar SMR lisanslama rehberinin yayımlanması, NDK bünyesinde ileri reaktörler biriminin kurulması, TENMAK'ta SMR araştırma programının başlatılması, en az üç uluslararası düzenleyici iş birliği protokolünün imzalanması, belirli sayıda uzmanın IAEA ve yabancı düzenleyici kurum eğitimlerine gönderilmesi ve 2030'a kadar ilk kapsamlı Türkiye SMR teknoloji değerlendirme raporunun yayımlanması bu göstergeler arasında yer alabilir.

Sonuç olarak TENMAK ve NDK'nin kurumsal kapasite dönüşümü, Türkiye'nin SMR stratejisinin uygulanabilirliği açısından merkezi öneme sahiptir. Strateji belgesi yönü belirleyebilir; ancak bu yönün gerçek bir teknoloji politikasına dönüşebilmesi, araştırma-geliştirme kapasitesi güçlü bir TENMAK ve bağımsız, uzmanlaşmış, teknik açıdan yetkin bir NDK yapısına bağlıdır. Kurumsal kapasite ne kadar güçlendirilirse güçlendirilsin, bu kurumları taşıyacak uzman insan kaynağı olmadan dönüşüm sürdürülebilir olamayacaktır. Bu nedenle insan kaynağı meselesi, SMR yol haritasında bağımsız ve öncelikli bir eylem alanı olarak ele alınmalıdır.

8.1.3 Nükleer Mühendislik Kapasitesinin Genişletilmesi

İnsan kaynağı, SMR programının en kritik ve en geç sonuç veren uzun vadeli yatırım alanlarından biridir. Nükleer enerji teknolojileri; reaktör fiziği, termohidrolik, nükleer güvenlik, yakıt çevrimi, radyasyon korunumu, malzeme bilimi, kontrol sistemleri, siber güvenlik, kalite güvence ve düzenleyici analiz gibi çok sayıda uzmanlık alanını aynı anda gerektirmektedir. Bu nedenle SMR stratejisinin başarısı yalnızca teknoloji seçimine veya finansman modeline değil, bu teknolojileri değerlendirecek, lisanslayacak, işletecek, denetleyecek ve yerli sanayiye aktarabilecek nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesine bağlıdır.

Türkiye'de nükleer mühendislik eğitiminin mevcut kapasitesi, iddialı ve çok boyutlu bir nükleer program için sınırlı bir başlangıç zemini sunmaktadır. Lisans düzeyinde nükleer enerji mühendisliği programlarının sayısı oldukça azdır ve yıllık mezun havuzu, büyük ölçekli nükleer santraller, SMR programları, düzenleyici kurumlar, araştırma merkezleri ve yerli tedarik zinciri ihtiyaçları birlikte düşünüldüğünde yetersiz kalma riski taşımaktadır. Nükleer alanda yetişmiş insan kaynağı yalnızca santral işletmecileri için değil; NDK, TENMAK, üniversiteler, tedarikçi firmalar, kalite güvence kuruluşları, çevresel izleme ekipleri ve acil durum yönetimi kurumları için de gereklidir.

Bu nedenle Türkiye'nin nükleer insan kaynağı stratejisi dar anlamda "nükleer mühendis sayısını artırma" hedefiyle sınırlı tutulmamalıdır. SMR teknolojileri, klasik nükleer mühendisliğin yanında makine mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, malzeme bilimi, bilgisayar mühendisliği, kimya mühendisliği, fizik, enerji sistemleri mühendisliği ve endüstri mühendisliği gibi alanlardan gelen uzmanların da nükleer teknoloji ekosistemine kazandırılmasını gerektirmektedir. Özellikle SMR'lerin fabrika üretimi, modüler inşaat, dijital kontrol, siber güvenlik, ileri malzemeler ve tedarik zinciri yönetimi boyutları, disiplinlerarası insan kaynağını zorunlu kılmaktadır.

Kısa vadede ilk öncelik, mevcut nükleer enerji mühendisliği programlarının güçlendirilmesi olmalıdır. Hacettepe Üniversitesi ve Sinop Üniversitesi gibi lisans düzeyinde nükleer enerji mühendisliği eğitimi veren kurumların akademik kadroları, laboratuvar altyapıları, araştırma fonları ve öğrenci kontenjanları dikkatli biçimde desteklenmelidir. Ancak kontenjan artışı tek başına yeterli değildir; öğretim üyesi kapasitesi, laboratuvar olanakları, staj imkânları, simülasyon

araçları ve sanayi bağlantıları aynı anda güçlendirilmeden yapılacak hızlı kontenjan artışları eğitim kalitesini zayıflatabilir. Bu nedenle büyüme, nitelik güvence sistemiyle birlikte planlanmalıdır.

İkinci öncelik, nükleer mühendisliği destekleyecek disiplinlerarası lisansüstü programların yaygınlaştırılmasıdır. ODTÜ, İTÜ, Ankara Üniversitesi, Ege Üniversitesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi ve benzeri araştırma kapasitesine sahip üniversitelerde doğrudan yeni lisans programları açmak yerine; reaktör fiziği, nükleer termohidrolik, nükleer güvenlik, radyasyon ölçüm teknikleri, nükleer malzeme bilimi, yakıt çevrimi, nükleer enerji ekonomisi ve enerji politikası gibi alanlarda lisansüstü programlar ve uzmanlaşma modülleri oluşturulabilir. Böylece mevcut mühendislik ve fen bilimleri altyapısı, nükleer teknoloji ihtiyaçlarına daha hızlı ve esnek biçimde uyarlanabilir.

Üçüncü öncelik, SMR odaklı ulusal burs ve uzman yetiştirme programının oluşturulmasıdır. TENMAK, TÜBİTAK, YÖK ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı iş birliğiyle “SMR ve İleri Nükleer Teknolojiler İnsan Kaynağı Programı” başlatılmalıdır. Bu program; lisans öğrencileri için yaz okulları, yüksek lisans ve doktora bursları, yurt dışı araştırma destekleri, düzenleyici kurum stajları, sanayi-üniversite ortak tezleri ve zorunlu uygulamalı eğitim modüllerini içermelidir. Bursların yalnızca akademik başarıya değil, stratejik uzmanlık alanlarına göre yönlendirilmesi önemlidir. Örneğin reaktör fiziği, nükleer güvenlik analizi, HALEU yakıt çevrimi, nükleer kalite güvence, siber güvenlik ve ileri malzeme alanları özel öncelik başlıkları olarak belirlenebilir.

Dördüncü öncelik, uluslararası eğitim ve değişim kanallarının kurumsallaştırılmasıdır. Kanada, ABD, Fransa, Güney Kore, Japonya ve Birleşik Krallık gibi nükleer mühendislik ve SMR alanında güçlü kurumlara sahip ülkelerle değişim programları, ortak yüksek lisans-doktora anlaşmaları ve düzenleyici kurum stajları geliştirilmelidir. Bu programların amacı yalnızca öğrencileri yurt dışına göndermek değil, Türkiye’ye geri dönecek ve ulusal nükleer ekosisteme katkı sağlayacak uzman havuzu oluşturmaktır. Bu nedenle yurt dışında doktora veya doktora sonrası çalışma yapan Türk araştırmacılar için dönüş hibeleri, laboratuvar kurulum destekleri ve üniversite-kamu araştırma merkezi kadroları tasarlanmalıdır.

Beşinci öncelik, TENMAK bünyesindeki Çekmece yerleşkesinin ve mevcut nükleer araştırma altyapısının SMR eğitim ve simülasyon kapasitesini kapsayacak biçimde modernize edilmesidir. Bu kapsamda reaktör simülatörleri, sanal gerçeklik tabanlı eğitim sistemleri, termohidrolik deney düzenekleri, radyasyon ölçüm laboratuvarları, nükleer güvenlik analiz yazılımları ve acil durum senaryo eğitim merkezleri kurulmalıdır. SMR teknolojilerinin farklı tasarım ailelerini karşılaştırabilecek dijital simülasyon altyapısı, hem üniversite öğrencileri hem de düzenleyici kurum uzmanları için ortak eğitim platformu olarak kullanılabilir.

Altıncı öncelik, sanayi odaklı nükleer kalite güvence eğitimlerinin yaygınlaştırılmasıdır. SMR tedarik zincirine katılım yalnızca nükleer mühendislerle sınırlı değildir. Makine imalatçıları, malzeme üreticileri, kaynak mühendisleri, kontrol sistemi geliştiricileri, yazılım uzmanları, inşaat firmaları ve test-laboratuvar kuruluşları da nükleer kalite kültürüne ihtiyaç duyacaktır. Bu nedenle ASME, ISO, nükleer kalite güvence, izlenebilirlik, dokümantasyon, radyasyon güvenliği ve tedarik zinciri denetimi gibi alanlarda sertifika programları oluşturulmalıdır. Bu eğitimler OSB’ler, savunma sanayii firmaları ve enerji ekipmanı üreticileriyle iş birliği içinde yürütülmelidir.

Yedinci öncelik, NDK için özel düzenleyici insan kaynağı programıdır. Nükleer düzenleyici kurum uzmanlığı, santral işletmeciliğinden farklı bir bilgi ve mesleki kültür gerektirir. NDK bünyesinde SMR ve ileri reaktör tasarımlarını değerlendirebilecek uzmanların yetiştirilmesi için uzun süreli teknik eğitim, yabancı düzenleyici kurumlarda staj, IAEA programlarına katılım ve doktora destekleri sağlanmalıdır. Bu uzmanlar yalnızca mevzuat yorumlayan personel değil; güvenlik analizi, probabilistik risk değerlendirmesi, termohidrolik modelleme, yakıt davranışı, siber güvenlik ve fiziksel koruma konularında teknik değerlendirme yapabilecek nitelikte olmalıdır.

Bu insan kaynağı programının başarısı için ölçülebilir hedefler belirlenmelidir. 2030 yılına kadar SMR ve ileri nükleer teknolojiler alanında belirli sayıda yüksek lisans ve doktora öğrencisinin desteklenmesi, en az birkaç üniversitede disiplinlerarası nükleer teknoloji lisansüstü modülünün açılması, TENMAK bünyesinde SMR simülasyon ve eğitim altyapısının kurulması, NDK personelinin uluslararası düzenleyici eğitim programlarına sistematik katılımının sağlanması ve sanayiye yönelik nükleer kalite güvence sertifikası programlarının başlatılması bu hedefler arasında yer alabilir.

Sonuç olarak Türkiye'nin SMR stratejisinin sürdürülebilirliği, insan kaynağı kapasitesinin ne kadar erken ve ne kadar sistematik biçimde geliştirileceğine bağlıdır. Reaktör teknolojisi ithal edilebilir; ancak teknolojiyi anlayacak, denetleyecek, güvenli işletecek, yerli sanayiye aktaracak ve uzun vadede geliştirecek insan kaynağı kısa sürede ithal edilemez. Bu nedenle nükleer mühendislik kapasitesinin genişletilmesi, Türkiye'nin SMR yol haritasında en öncelikli ve en stratejik yatırım alanlarından biri olarak görülmelidir.

8.1.4 Pilot Proje Fizibilite Çalışmaları

Strateji belgesi, düzenleyici çerçeve ve insan kaynağı hazırlıklarıyla paralel biçimde, 2026–2030 döneminde Türkiye'de SMR teknolojilerinin farklı kullanım senaryolarını değerlendirecek kapsamlı pilot proje fizibilite çalışmaları başlatılmalıdır. Bu çalışmaların amacı, kısa vadede doğrudan SMR inşasına geçmek değil; Türkiye'nin hangi uygulama alanlarında, hangi teknik koşullar altında ve hangi finansman modeliyle SMR teknolojilerinden en yüksek stratejik faydayı sağlayabileceğini nesnel biçimde ortaya koymaktır. Bu nedenle pilot fizibilite süreci, teknoloji seçimi öncesinde yürütülecek kritik bir karar destek mekanizması olarak tasarlanmalıdır.

Bu kapsamda 2030 yılına kadar en az üç farklı pilot uygulama senaryosu için ayrıntılı fizibilite raporu hazırlanmalıdır. Birinci senaryo, enerji yoğun organize sanayi bölgesi veya büyük sanayi kompleksi uygulaması olmalıdır. Karabük, Aliğa, Payas-İskenderun, Kocaeli veya benzeri yüksek elektrik ve proses enerjisi talebine sahip sanayi bölgeleri, bu çalışma için değerlendirilebilecek aday alanlar arasında yer alabilir. Bu fizibilite çalışmasında SMR'lerin sanayiye düşük karbonlu elektrik, buhar, hidrojen üretimi veya bölgesel enerji merkezi hizmeti sağlama potansiyeli incelenmelidir. Ayrıca OSB'lerin uzun vadeli elektrik alım anlaşmaları yoluyla projeye gelir güvencesi sağlayıp sağlayamayacağı da analiz edilmelidir.

İkinci senaryo, Doğu veya Güneydoğu Anadolu'da uzak bölge ve madencilik/endüstriyel küme uygulaması olmalıdır. Şebeke bağlantısının görece zayıf olduğu, enerji yoğun madencilik veya tarım-sanayi faaliyetlerinin bulunduğu bölgelerde SMR'lerin arz güvenliği, üretim maliyeti, karbon azaltımı ve bölgesel kalkınma açısından sağlayabileceği katkı değerlendirilmelidir. Bu senaryoda fosfat, bakır, krom, çinko-kurşun veya diğer kritik mineral sahalarına yakın endüstriyel

enerji ihtiyacı öncelikli olarak incelenebilir. Ancak saha seçimi yapılırken deprem riski, su kaynakları, yerleşim yoğunluğu, güvenlik altyapısı, ulaşım imkânları ve acil durum müdahale kapasitesi gibi kriterler mutlaka dikkate alınmalıdır.

Üçüncü senaryo, kritik altyapı ve yüksek güvenlik gerektiren sanayi uygulaması olmalıdır. Bu çalışma doğrudan hassas savunma tesislerinin içine SMR yerleştirme varsayımına dayanmamalı; bunun yerine savunma sanayii, veri merkezleri, stratejik lojistik altyapılar ve kritik kamu hizmetleri için güvenli, düzenlenmiş ve çok kurumlu denetime açık enerji merkezleri kurulup kurulamayacağını analiz etmelidir. Bu senaryoda temel soru, SMR'lerin mikroşebeke, ada modu işletimi, yedek güç, siber dayanıklılık ve düşük karbonlu kesintisiz enerji arzı açısından ne ölçüde değer yaratabileceğidir.

Her pilot fizibilite çalışması teknik, ekonomik, çevresel, sosyal, hukuki ve güvenlik boyutlarını birlikte kapsamalıdır. Teknik analiz kapsamında reaktör tipi, güç seviyesi, soğutma ihtiyacı, şebeke bağlantısı, saha uygunluğu, yakıt tedariki, acil durum planlaması ve işletme modeli değerlendirilmelidir. Ekonomik analizde sermaye maliyeti, LCOE, finansman modeli, karbon fiyatı varsayımları, alternatif enerji seçenekleriyle karşılaştırma, uzun vadeli alım anlaşmaları ve yerli sanayi katkısı dikkate alınmalıdır. Çevresel ve sosyal analizde su kullanımı, atık yönetimi, arazi kullanımı, yerel kabul, kamuoyu iletişimi ve çevresel etki değerlendirmesi başlıkları yer almalıdır.

Bu fizibilite raporlarının güvenilirliği açısından bağımsız doğrulama mekanizması kurulmalıdır. Çalışmalar yalnızca teknoloji tedarikçilerinin sunduğu verilerle sınırlı kalmamalı; üniversiteler, TENMAK, NDK, TEİAŞ, ilgili bakanlıklar, bağımsız mühendislik kuruluşları ve uluslararası uzman danışmanlar tarafından çapraz biçimde değerlendirilmelidir. Böylece Türkiye, SMR teknolojileri konusunda geliştirici şirketlerin iyimser maliyet ve performans beyanlarına doğrudan bağımlı kalmadan kendi ulusal teknik-ekonomik değerlendirme kapasitesini oluşturabilir.

Pilot fizibilite sürecinin kurumsal koordinasyonu Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülmeli; NDK güvenlik ve lisanslama boyutunda, TENMAK teknik analiz ve araştırma boyutunda, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı yerli sanayi ve OSB boyutunda, Hazine ve Maliye Bakanlığı finansman boyutunda, TEİAŞ şebeke entegrasyonu boyutunda ve ilgili yerel yönetimler saha/kamuoyu boyutunda sürece dâhil edilmelidir. Savunma sanayii veya kritik altyapı senaryolarında ise Savunma Sanayii Başkanlığı, AFAD, siber güvenlik kurumları ve ilgili güvenlik birimlerinin koordinasyonu ayrıca sağlanmalıdır.

Bu eylem alanı için ölçülebilir hedefler açık biçimde belirlenmelidir. 2027 yılı sonuna kadar pilot lokasyon seçim kriterleri ve ön değerlendirme metodolojisi hazırlanmalı; 2028 yılında üç aday senaryo için ön fizibilite raporları tamamlanmalı; 2030 yılına kadar ise en az bir sanayi/OSB, bir uzak bölge-madencilik ve bir kritik altyapı senaryosu için bağımsız doğrulanmış kapsamlı fizibilite raporu yayımlanmalıdır. Bu raporlar, 2030 sonrası dönemde hangi pilot SMR projesinin önceliklendirileceğine ilişkin karar sürecinin temelini oluşturmalıdır.

Sonuç olarak pilot proje fizibilite çalışmaları, Türkiye'nin SMR stratejisinde teorik vizyon ile somut yatırım kararı arasındaki kritik köprüyü oluşturacaktır. Bu çalışmalar sayesinde Türkiye, SMR teknolojilerinin hangi bölgelerde, hangi sektörlerde ve hangi koşullar altında gerçek stratejik değer üretebileceğini nesnel biçimde değerlendirebilir. Böylece SMR politikası, genel bir teknoloji

ilgisi olmaktan çıkarak veri temelli, karşılaştırmalı ve uygulanabilir bir ulusal enerji güvenliği aracına dönüşebilir.

8.1.5 Hukuki Altyapının Yeniden Yapılandırılması

Türkiye'nin mevcut nükleer mevzuatı, büyük ölçüde Akkuyu NGS gibi büyük ölçekli ve merkezi nükleer santral projelerinin lisanslanması, güvenliği, denetimi ve sorumluluk rejimi etrafında şekillenmiştir. 7381 sayılı Nükleer Düzenleme Kanunu, nükleer faaliyetlerin yetkilendirilmesi, düzenleyici kontrolü ve nükleer zarar sorumluluğu açısından temel çerçeveyi oluşturmakta; TENMAK'ın 2020'de kurulması ise araştırma-geliştirme boyutunda yeni kurumsal yapıyı temsil etmektedir.

Ancak SMR teknolojileri; çoklu yatırımcı yapısı, kamu-özel ortaklığı, proje finansmanı, modüler üretim, fabrika sertifikasyonu, farklı mülkiyet modelleri ve dağıtık konuşlandırma gibi özellikleri nedeniyle mevcut çerçevenin bazı alanlarda güncellenmesini gerektirmektedir. Bu nedenle 2029 yılına kadar SMR'leri de kapsayan kapsamlı bir Nükleer Enerji Yatırım ve Uygulama Kanunu hazırlanmalıdır.

Bu kanun; yabancı ve yerli yatırımcılar için öngörülebilir bir yatırım çerçevesi, SMR'lere özgü lisanslama ve ÇED süreçleri, nükleer sorumluluk ve sigorta mekanizmaları, atık yönetimi ilkeleri, yakıt tedarik güvenliği, yerli sanayi katılımı ve kamu-özel ortaklığı modellerini açık biçimde düzenlemelidir. Böylece Türkiye, SMR yatırımlarında hem yatırımcı güvenini artırabilir hem de güvenlik, şeffaflık ve kamu yararı ilkelerini koruyan sağlam bir hukuki temel oluşturabilir.

8.2 Orta Vadeli Hedefler (2030-2040): İlk Ticari Konuşlandırma ve Tedarik Zinciri

8.2.1 Teknoloji Seçimi ve Birinci SMR Tesisinin İnşaatı

Orta vadeli dönemin en somut ve belirleyici hedefi, Türkiye'nin ilk ticari SMR tesisi için teknoloji seçimini tamamlaması, yatırım kararını alması, inşaat sürecini başlatması ve 2038–2040 döneminde ticari işletmeye geçişi hedeflemesidir. Bu aşama, kısa vadede oluşturulacak strateji belgesi, düzenleyici hazırlık, insan kaynağı programı ve pilot fizibilite çalışmalarının üzerine inşa edilmelidir. Dolayısıyla ilk SMR tesisi, aceleyle alınacak tekil bir yatırım kararı değil; teknik, ekonomik, hukuki ve jeopolitik kriterlerin birlikte değerlendirildiği uzun vadeli bir teknoloji seçimi sürecinin sonucu olmalıdır.

Türkiye'nin teknoloji seçiminde gözetmesi gereken ilk kriter, ticari olgunluk ve referans tesis deneyimidir. 2030'ların başında değerlendirilecek SMR tasarımlarının yalnızca kâğıt üzerinde vaatler sunması yeterli olmayacaktır. Seçilecek tasarımın lisanslama sürecinde ilerlemiş, inşaat veya işletme deneyimi kazanmış ve güvenlik analizleri bağımsız düzenleyici kurumlarca test edilmiş olması gerekmektedir. BWRX-300 gibi Kanada'daki Darlington projesi üzerinden saha deneyimi kazanması beklenen tasarımlar, Rolls-Royce SMR gibi devlet destekli endüstriyel programlar veya o tarihe kadar ticari olgunluk gösteren diğer seçenekler bu çerçevede karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir. Ancak hiçbir tasarım yalnızca politik yakınlık veya firma beyanı üzerinden seçilmemeli; referans tesis performansı, maliyet gerçekleştirmeleri, inşaat süresi, lisanslama başarısı ve işletme güvenilirliği temel karar ölçütleri olmalıdır.

İkinci kriter, teknoloji transferi ve yerli içerik taahhütleridir. Türkiye'nin ilk SMR tesisi, yalnızca ithal bir reaktör projesi olarak tasarlanmamalıdır. Seçilecek tedarikçi firmanın Türk mühendislik, imalat, inşaat, kontrol-otomasyon, kalite güvence ve bakım-onarım ekosistemine somut katılım alanları açması müzakere önceliği olmalıdır. Bu kapsamda belirli bileşenlerin Türkiye'de sertifikalı biçimde üretilmesi, Türk mühendislerin tasarım ve saha uygulama ekiplerine dâhil edilmesi, üniversite-sanayi eğitim programlarının kurulması ve sonraki ünitelerde yerli içerik oranının kademeli biçimde artırılması sözleşmeye bağlanmalıdır.

Üçüncü kriter, yakıt tedarik güvenliğidir. SMR teknolojisi seçilirken yalnızca reaktör tasarımına değil, bu tasarımın ihtiyaç duyduğu yakıt zincirine de bakılmalıdır. Yakıtın LEU veya HALEU gerektirmesi, tedarikçi ülke sayısı, zenginleştirme kapasitesi, yakıt fabrikasyonu, taşıma, depolama ve geri alma seçenekleri teknoloji seçiminin ayrılmaz parçası olmalıdır. Özellikle HALEU gerektiren tasarımlar, ileri reaktör performansı açısından avantajlar sunsa da, 2030'ların başında yakıt arz güvenliği bakımından hâlen önemli bir kısıt oluşturabilir. Bu nedenle Türkiye, yakıt tedariki tek bir ülkeye veya dar bir tedarikçi grubuna bağımlı olan tasarımlara karşı daha ihtiyatlı yaklaşmalıdır.

Dördüncü kriter, finansman esnekliği ve risk paylaşımıdır. İlk SMR tesisinin yatırım kararı, yalnızca teknik uygunlukla değil, finansman modelinin sürdürülebilirliğiyle de belirlenecektir. Teknoloji sağlayıcı ülkenin ihracat kredisi, kalkınma finansmanı, kamu garantisi, uzun vadeli alım anlaşması veya proje finansmanı desteği sunup sunamayacağı ekonomik fizibilite açısından belirleyicidir. Türkiye açısından ideal model, tüm riskin kamu üzerinde kaldığı bir yapıdan ziyade; kamu, özel sektör, teknoloji tedarikçisi ve uzun vadeli enerji alıcıları arasında dengeli risk paylaşımı sağlayan karma bir finansman modeli olmalıdır.

İnşaat sürecinde Türk mühendislik ve inşaat firmalarının mümkün olan en yüksek düzeyde yer alması sağlanmalıdır. İlk SMR tesisinde elde edilecek saha deneyimi, sonraki ünitelerin maliyetini düşürmek ve yerli tedarik zincirini geliştirmek açısından kritik önemdedir. Akkuyu projesinden çıkarılması gereken temel derslerden biri, yerli içerik, teknoloji transferi ve insan kaynağı kazanımı konularında somut ve ölçülebilir taahhütlerin en baştan sözleşmeye dâhil edilmesinin stratejik önemidir. Bu nedenle ilk SMR tesisinde teknoloji tedarikçisiyle yapılacak anlaşmalar, yalnızca reaktör teslimi ve işletme takvimiyle sınırlı kalmamalı; yerli katkı oranı, eğitim programları, tedarikçi sertifikasyonu ve sonraki üniteler için sanayi katılımı hedeflerini açık biçimde içermelidir.

Sonuç olarak Türkiye'nin ilk SMR tesisi, yalnızca elektrik üretim kapasitesi ekleyen bir proje olarak değil, ulusal nükleer ekosistemin ikinci aşamasını başlatacak bir öğrenme platformu olarak tasarlanmalıdır. Doğru teknoloji seçimi, güvenilir yakıt tedariki, sürdürülebilir finansman modeli ve yerli sanayi katılımı birlikte sağlanabilirse, ilk ticari SMR tesisi Türkiye'nin enerji güvenliği, sanayi politikası ve nükleer teknoloji kapasitesi açısından stratejik bir dönüm noktası olabilir. Ancak bu başarının kalıcı hâle gelmesi, ilk tesiste kazanılan deneyimin sistemli biçimde yerli tedarik zincirine aktarılmasına bağlıdır.

8.2.2 Yerli Tedarik Zincirinin Sistemik Gelişimi

SMR tedarik zincirinin yurt içinde geliştirilmesi, Türkiye açısından hem ekonomik hem de stratejik önem taşımaktadır. Yerli tedarik zinciri; projelerin döviz maliyetini azaltabilir, nitelikli

istihdam yaratabilir ve uzun vadede ihracat potansiyeli doğurabilir. Stratejik açıdan ise bakım, yedek parça ve kritik bileşenlerde dışa bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini güçlendirebilir.

Türkiye'nin ağır makine imalatı, özel çelik, boru sistemleri, kaynak teknolojileri, kontrol-otomasyon ve savunma sanayii alanlarındaki mevcut kapasitesi, SMR tedarik zinciri için önemli bir başlangıç zemini sunmaktadır. Ancak bu kapasitenin nükleer sektöre aktarılabilmesi için firmaların nükleer kalite güvence, izlenebilir üretim, sertifikasyon ve bağımsız denetim süreçlerine uyum sağlaması gerekmektedir.

Bu nedenle orta vadede “Nükleer Tedarikçi Geliştirme Programı” oluşturulmalıdır. TENMAK, NDK, TÜBİTAK, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve ilgili sektör kuruluşları koordinasyonunda yürütülecek bu program; firmalara sertifikasyon desteği, Ar-Ge teşvikleri, test altyapısı ve nükleer kalite eğitimi sağlamalıdır. İlk SMR projesinin sözleşmelerinde de yerli katkı oranı, teknoloji transferi ve Türk firmalarının tedarik zincirine aşamalı katılımı açık biçimde güvence altına alınmalıdır.

Sonuç olarak Türkiye'nin hedefi kısa vadede tüm SMR teknolojilerini yerleştirmek değil; belirli bileşenlerde, mühendislik hizmetlerinde, bakım-onarım kapasitesinde ve kalite güvence süreçlerinde kademeli yetkinlik kazanmaktır. Bu yaklaşım, ilk SMR projesini yalnızca bir enerji yatırımı olmaktan çıkararak Türkiye'nin nükleer sanayi ekosistemini geliştiren stratejik bir öğrenme platformuna dönüştürebilir.

8.2.3 Uluslararası Ortaklık Mimarisinin Kurulması

Türkiye'nin orta vadeli SMR programının başarısı, teknoloji seçimi kadar uluslararası ortaklık ağının doğru yapılandırılmasına da bağlıdır. Bu ortaklık mimarisi; teknoloji edinimi, lisanslama deneyimi, finansman erişimi, yakıt tedarik güvenliği ve yerli sanayi katılımı hedeflerini birlikte destekleyecek biçimde tasarlanmalıdır. Türkiye, tek bir tedarikçi ülkeye bağımlı kalmayan, çok taraflı ve dengeli bir iş birliği modeli benimsemelidir.

Bu çerçevede ABD ile kurulacak ortaklık; SMR teknolojileri, ileri reaktör programları, ihracat finansmanı ve düzenleyici deneyim paylaşımı açısından önem taşımaktadır. DOE Nükleer Enerji Ofisi, ABD Ticaret Bakanlığı, EXIM Bank ve DFC gibi kurumlarla geliştirilecek iş birlikleri; teknoloji değerlendirme, finansman ve proje geliştirme alanlarında Türkiye'ye önemli imkânlar sağlayabilir. Mevcut nükleer iş birliği çerçevesinin SMR teknolojilerine uyarlanması da bu ilişkinin stratejik boyutunu güçlendirebilir.

Kanada ile iş birliği, özellikle düzenleyici kapasite ve lisanslama deneyimi açısından öncelikli görülmelidir. CNSC'nin aşamalı tasarım değerlendirme yaklaşımı ve BWRX-300/Darlington sürecinden elde edilecek deneyimler, NDK'nin SMR lisanslama kapasitesinin gelişmesine katkı sağlayabilir. Güney Kore ile ortaklık ise KAERI-TENMAK araştırma iş birliği, KHNP'nin inşaat yönetimi deneyimi ve Kore'nin nükleer ihracat kapasitesi üzerinden değerlendirilebilir. Bu üç ülkeyle kurulacak ilişkiler, Türkiye'nin teknoloji, düzenleme ve finansman boyutlarını birlikte geliştirmesine olanak tanıyacaktır.

Dördüncü ortaklık boyutu IAEA platformları üzerinden kurulmalıdır. Türkiye; IAEA'nın SMR ve ileri reaktörlere ilişkin koordineli araştırma projelerine, teknik toplantılarına ve eğitim programlarına aktif biçimde katılmalı; ARIS (*Advanced Reactors Information System*) veri tabanını teknoloji değerlendirme sürecinde sistematik olarak kullanılmalıdır. Ayrıca bölgesel SMR

güvenliği, düzenleyici kapasite ve insan kaynağı geliştirme çalışmalarında daha görünür bir rol üstlenmelidir.

Sonuç olarak Türkiye'nin uluslararası SMR ortaklık mimarisi, yalnızca reaktör satın almaya dayalı bir yaklaşım olmamalıdır. Asıl hedef; lisanslama bilgisi, insan kaynağı, yakıt tedariki, finansman, yerli sanayi katılımı ve teknoloji öğrenmesini birlikte içeren çok boyutlu bir iş birliği ağı kurmak olmalıdır. Böyle bir yapı, Türkiye'nin SMR alanında bağımlı bir teknoloji alıcısı değil, zaman içinde bölgesel iş birliği ve uygulama kapasitesi geliştiren stratejik bir aktör hâline gelmesini sağlayabilir.

8.2.4 Finansman Çerçevesinin Oluşturulması

Orta vadeli dönemde SMR programının ilerleyebilmesi için özel olarak tasarlanmış bir finansman çerçevesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla Türkiye Varlık Fonu, Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası, Hazine ve Maliye Bakanlığı ve uluslararası kalkınma finansmanı kuruluşlarının katılımına açık bir SMR Kalkınma Fonu kurulmalıdır. Bu fon; ilk SMR tesisinin finansmanı, lisanslama süreçleri, Ar-Ge destekleri, yerli tedarik zinciri sertifikasyonu ve insan kaynağı geliştirme programları için bütünlük bir kaynak mekanizması sağlayabilir.

Fonun temel amacı, ilk ticari SMR projesinin yüksek teknoloji ve finansman riskini azaltmak olmalıdır. İlk tesislerde maliyet belirsizliği, lisanslama riski ve uzun geri ödeme süresi özel sermaye için caydırıcı olacağından, kamu destekli bir finansman yapısı zorunlu görünmektedir. Ancak bu yapı tamamen kamu kaynaklarına dayanmamalı; özel sektör, teknoloji tedarikçileri, sanayi kullanıcıları ve yabancı finans kuruluşlarıyla risk paylaşımı sağlayacak biçimde tasarlanmalıdır.

Uzun vadeli güç satın alma anlaşmaları (*Power Purchase Agreements* — PPA), bu çerçevenin en önemli araçlarından biri olmalıdır. Enerji yoğun sanayi kuruluşları, organize sanayi bölgeleri ve veri merkezi işletmecileri; 20–25 yıllık sabit veya öngörülebilir fiyatlı PPA sözleşmeleriyle projeye talep güvencesi sağlayabilir. Böylece SMR projeleri yalnızca kamu yatırımı olmaktan çıkarak, düşük karbonlu ve kesintisiz enerjiye ihtiyaç duyan büyük tüketicilerle desteklenen karma bir finansman modeline dönüşebilir.

Sonuç olarak Türkiye'nin SMR finansman stratejisi; kamu desteği, uzun vadeli alım garantileri, kalkınma finansmanı ve özel sektör katılımını birleştiren esnek bir model üzerine kurulmalıdır. Bu çerçeve oluşturulmadan ilk ticari SMR yatırımının piyasa koşullarıyla finanse edilmesi gerçekçi görünmemektedir.

8.3 Uzun Vadeli Hedefler (2040-2053): Teknolojik Egemenlik ve Bölgesel Nükleer Merkez

8.3.1 Türkiye Orijinli SMR Tasarımına Doğru

2040 sonrası dönemin en iddialı hedeflerinden biri, Türkiye'nin kendi SMR tasarımını geliştirebilecek teknik ve kurumsal kapasiteye ulaşmasıdır. Bu hedef, kısa vadede gerçekleştirilebilecek bir teknoloji atılımı olarak değil; 2026–2040 döneminde oluşturulacak insan kaynağı, düzenleyici kapasite, yerli tedarik zinciri, araştırma altyapısı ve uluslararası ortaklıkların üzerine inşa edilecek uzun vadeli bir teknoloji egemenliği hedefi olarak değerlendirilmelidir.

Dolayısıyla Türkiye orijinli SMR tasarımı, ancak önceki aşamalarda sistemli bir öğrenme ve kapasite birikimi sağlanırsa gerçekçi hâle gelebilir.

Türkiye'nin savunma sanayiinde son yirmi yılda kaydettiği dönüşüm, bu hedef açısından anlamlı bir karşılaştırma zemini sunmaktadır. 2000'li yılların başında büyük ölçüde dışa bağımlı olan Türk savunma sanayii, uzun vadeli kamu desteği, yerli tedarik zinciri geliştirme, Ar-Ge yatırımları ve ihracat odaklı sanayi politikası sayesinde 2020'lerde özgün platformlar geliştiren ve ihraç eden bir aktöre dönüşmüştür. Benzer stratejik kararlılık ve süreklilik, nükleer teknoloji alanında da sonuç üretebilir; ancak nükleer sektörün güvenlik, lisanslama, yakıt ve uluslararası denetim boyutları nedeniyle savunma sanayiinden daha uzun ve daha sıkı bir gelişim patikası gerektirdiği unutulmamalıdır (Egeli vd., 2024).

Türkiye için en gerçekçi giriş noktası, tamamen sıfırdan bir SMR tasarımı geliştirmek değil, lisanslı ve sahada kanıtlanmış bir temel tasarımdan başlayarak kademeli biçimde "Türkiye versiyonu"na geçiş sağlamaktır. Bu yaklaşım; önce teknoloji edinimi, ardından yerli bileşen üretimi, daha sonra mühendislik uyarlamaları ve en sonunda özgün tasarım geliştirme adımlarından oluşan aşamalı bir kapasite inşasını gerektirir. Güney Kore'nin yabancı lisanslı reaktör teknolojilerinden başlayarak zamanla yerli tasarım ve ihracat kapasitesine ulaşması, bu tür bir kademeli öğrenme modelinin nükleer alanda uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Bu hedefin kurumsal zemini, üniversite–TENMAK–sanayi iş birliğine dayalı güçlü bir araştırma altyapısıyla oluşturulmalıdır. Bu amaçla 2040'a kadar "Nükleer Teknoloji Ulusal Araştırma Merkezi" kurulması stratejik bir adım olacaktır. Merkez; reaktör fiziği, termohidrolik, nükleer malzeme, yakıt çevrimi, dijital kontrol sistemleri, güvenlik analizi, SMR simülasyonları ve nükleer kalite güvence alanlarında uzmanlaşmalıdır. Böyle bir yapı, Türkiye'nin yalnızca teknoloji ithal eden değil, zaman içinde belirli tasarım ve mühendislik alanlarında katkı üretebilen bir ülkeye dönüşmesini sağlayabilir.

Sonuç olarak Türkiye orijinli SMR tasarımı hedefi iddialı fakat tamamen gerçek dışı değildir. Ancak bu hedefin gerçekleşmesi, kısa vadeli siyasi söylemden çok uzun vadeli kurumsal istikrar, sürekli Ar-Ge finansmanı, nitelikli insan kaynağı, uluslararası öğrenme süreçleri ve yerli tedarik zincirinin olgunlaşmasına bağlıdır. Türkiye için en rasyonel yol, doğrudan özgün tasarım iddiasıyla başlamak değil; lisanslı teknolojiyle öğrenen, yerli katkıyı artıran ve zamanla kendi mühendislik tasarım kapasitesini geliştiren aşamalı bir strateji izlemektir.

8.3.2 Bölgesel SMR Merkezi Vizyonu: Gerçekçi Hedefler ve Kritik Koşullar

Türkiye'nin bölgesel SMR merkezi olma vizyonu; coğrafi konumu, gelişen nükleer insan kaynağı, sanayi altyapısı ve çevre bölgelerin artan enerji talebiyle bağlantılı stratejik bir hedefdir. Ancak bu vizyon, yalnızca siyasi bir iddia olarak değil, somut referans tesisler, nitelikli insan kaynağı, düzenleyici güvenilirlik ve sertifikalı tedarik zinciri üzerine kurulmalıdır.

Bu vizyonun ilk bileşeni, Türkiye'nin bölgesel nükleer eğitim ve kapasite geliştirme merkezi hâline gelmesidir. Orta Doğu, Balkanlar, Kafkasya ve Orta Asya'daki ülkelerin nükleer mühendislik, düzenleyici kapasite ve güvenlik kültürü alanlarında uzman desteğine ihtiyaç duyması, Türkiye için önemli bir fırsat yaratabilir. Türkiye merkezli eğitim programları, yaz okulları, düzenleyici kurum stajları ve ortak yüksek lisans programları hem teknik kapasite geliştirme hem de uzun vadeli yumuşak güç aracı olarak değerlendirilebilir.

İkinci bileşen, mühendislik ve proje yönetimi hizmet ihracatıdır. Türkiye'nin ilk SMR tesislerinden elde edeceği lisanslama, inşaat, işletme ve bakım deneyimi; yakın coğrafyadaki ülkelerin nükleer projelerinde danışmanlık, saha mühendisliği, eğitim ve işletme desteği sunabilmesi için kritik bir referans oluşturacaktır. Ancak referans tesis deneyimi olmadan böyle bir hizmet ihracatı iddiası sınırlı kalacaktır.

Üçüncü bileşen, SMR tedarik zincirinde belirli bileşenlerin bölgesel üretimidir. Türkiye'nin ağır sanayi, savunma sanayii, kontrol-otomasyon, çelik ve makine imalatı alanlarındaki kapasitesi; nükleer kalite güvence ve sertifikasyon süreçleri tamamlandığı takdirde SMR tedarik zincirine katkı sunabilir. Bu hedef, tüm reaktör teknolojilerini üretmekten çok, belirli alt bileşenlerde ve mühendislik hizmetlerinde bölgesel tedarikçi konumuna yükselmeyi amaçlamalıdır.

Potansiyel pazar coğrafyası açısından Orta Doğu, Balkanlar, Kafkasya ve Orta Asya Türkiye için öncelikli alanlar olarak değerlendirilebilir. Suudi Arabistan, BAE ve Mısır gibi ülkelerin nükleer enerjiye ilgisi; Romanya ve Bulgaristan gibi Balkan ülkelerinin düşük karbonlu baz yük arayışları; Kazakistan ve Özbekistan'ın büyüyen elektrik talebi Türkiye için ortaklık fırsatları yaratabilir. Ancak bu ülkelerle kurulacak ilişkiler, doğrudan teknoloji ihracatından önce eğitim, danışmanlık, mühendislik ve tedarik zinciri iş birliği üzerinden gelişmelidir.

Bu vizyonun gerçekleşmesi için en kritik koşul, Türkiye'nin 2040 sonrasında kendi topraklarında işletmede olan en az iki veya üç SMR referans tesisine sahip olmasıdır. Referans tesis, yalnızca teknik başarı değil; düzenleyici güvenilirlik, işletme tecrübesi, maliyet performansı ve yerli sanayi katılımı açısından da kanıt niteliği taşıyacaktır. Bu temel oluşmadan bölgesel SMR merkezi olma iddiası gerçekçi olmayacaktır.

Sonuç olarak Türkiye'nin bölgesel SMR merkezi vizyonu mümkündür; ancak bu hedef, yalnızca coğrafi avantajla değil, somut teknoloji deneyimi, güvenilir düzenleyici kapasite, yetişmiş insan kaynağı ve sertifikalı sanayi altyapısıyla desteklenirse anlam kazanacaktır. Türkiye için gerçekçi hedef, kısa vadede reaktör ihracatçısı olmak değil; uzun vadede nükleer eğitim, mühendislik, danışmanlık ve belirli bileşen üretiminde bölgesel merkez konumuna yükselmektir.

9. SONUÇ: BÜYÜK DÖNÜŞÜMÜN EŞİĞİNDE SMR TEKNOLOJİSİ VE TÜRKİYE'NİN STRATEJİK SEÇİMİ

Bu raporun hazırlandığı tarih itibarıyla küresel enerji sistemi; iklim hedefleri, enerji güvenliği, teknolojik rekabet ve hızla artan elektrik talebi baskılarının aynı anda yoğunlaştığı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Rusya-Ukrayna Savaşı sonrasında enerji arz güvenliği yeniden stratejik öncelik hâline gelirken, yenilenebilir enerji kapasitesindeki hızlı artışa rağmen sistem esnekliği, düşük karbonlu baz yük ve uzun süreli arz güvenliği sorunları önemini korumaktadır. Buna ek olarak yapay zekâ, veri merkezleri ve sanayi elektrifikasyonu kaynaklı yeni elektrik talebi, enerji sistemlerinin yalnızca daha temiz değil, aynı zamanda daha güvenilir ve daha dirençli biçimde yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu bağlamda Küçük Modüler Reaktörler, çağdaş enerji politikalarının en dikkat çekici ancak en tartışmalı teknoloji başlıklarından biri olarak öne çıkmaktadır. SMR'ler; düşük karbonlu üretim, modüler inşaat, pasif güvenlik sistemleri, esnek yer seçimi ve sanayi uygulamalarına entegrasyon potansiyeliyle önemli fırsatlar sunmaktadır. Bununla birlikte maliyet belirsizliği, lisanslama süreçleri, yakıt tedariki, nükleer güvenlik, atık yönetimi ve jeopolitik bağımlılık gibi kritik sorunlar, bu teknolojinin otomatik bir çözüm olarak görülmesini engellemektedir. Dolayısıyla SMR'ler ne enerji dönüşümünün tek başına kurtarıcı teknolojisi ne de göz ardı edilebilecek marjinal bir seçenek olarak değerlendirilmelidir.

9.1 SMR'ler Gerçekten Enerji Dönüşümünün Yeni Paradigması Olabilir mi? Koşullu Bir Evet'in Gerekçeleri

Bu soruya verilecek yanıtın akademik dürüstlüğü, SMR'lere yönelik iyimser beklentiler ile meşru eleştirileri aynı analitik dikkatle ele almayı gerektirmektedir. SMR'lerin enerji dönüşümünde gerçekten yapısal bir bileşen hâline gelip gelmeyeceği; teknolojik olgunluk, ekonomik uygulanabilirlik ve sosyo-politik kabul olmak üzere üç temel boyut üzerinden değerlendirilmelidir.

Teknolojik performans açısından bakıldığında SMR'ler artık yalnızca kavramsal tasarım aşamasında değildir. Rusya'nın küçük reaktör deneyimi, özellikle yüzer nükleer santral uygulamaları ve RITM-200 tabanlı deniz reaktörü teknolojileri üzerinden önemli bir pratik işletme birikimi sunmaktadır (Rosatom, 2024). Çin'in ACP100/Linglong One projesi ise kara konuşlu ticari SMR uygulamaları açısından en ileri örneklerden biri olarak öne çıkmakta ve SMR teknolojilerinin gerçek saha uygulamalarına taşındığını göstermektedir (CNNC, 2023). Bununla birlikte bu örnekler, tüm SMR tasarımlarının ticari olarak kanıtlandığı anlamına gelmemektedir. Mevcut tablo, teknolojinin konsept aşamasını geride bırakmaya başladığını; ancak geniş ölçekli ticari kanıt zincirinin hâlâ oluşum sürecinde olduğunu göstermektedir.

Ekonomik gerçeklik boyutunda ise tablo daha nüanslıdır. NuScale/UAMPS projesinin maliyet artışları ve iptali, ilk nesil ticari SMR projelerinde finansman, talep belirsizliği ve maliyet kontrolü risklerinin ne kadar belirleyici olabileceğini ortaya koymuştur (Haas vd., 2023). Bu deneyim, seri üretim ve modüler inşaat yoluyla maliyet düşüşü sağlanacağı yönündeki beklentinin kendiliğinden gerçekleşmeyeceğini göstermektedir. Ancak tek bir başarısız proje örneğini, SMR teknolojilerinin ekonomik uygulanabilirliğini bütünüyle dışlayan kesin bir kanıt olarak yorumlamak da metodolojik açıdan doğru değildir. Nükleer, havacılık ve savunma sanayilerinde ilk ticari

nesillerin yüksek maliyetli olması olağan bir durumdur; asıl ekonomik test, aynı tasarımın tekrarlı inşaa süreçlerinde maliyet ve süre performansının iyileşip iyileşmeyeceğidir.

Bu bağlamda öğrenme eğrisi varsayımı kritik önem taşımaktadır. OECD NEA'nın değerlendirmeleri, standart tasarım, seri üretim, düzenleyici istikrar ve yeterli sipariş hacmi sağlandığında SMR'lerde birim maliyetlerin kademeli olarak düşebileceğini ortaya koymaktadır (OECD NEA, 2023). Ancak bu maliyet düşüşünün gerçekleşmesi için yalnızca teknolojik tasarım yeterli değildir; güçlü proje yönetimi, öngörülebilir lisanslama süreçleri, tedarik zinciri olgunluğu ve finansman güvencesi de gereklidir. Dolayısıyla SMR ekonomisi bugün için kesin bir başarı hikâyesi değil, saha verileriyle sınanması gereken koşullu bir vaattir.

Sosyo-politik kabul boyutunda ise belirsizlik daha derindir. Enerji güvenliği kaygıları, iklim hedefleri, yapay zekâ ve veri merkezleri kaynaklı yeni elektrik talebi ile büyük teknoloji şirketlerinin düşük karbonlu elektrik arayışı, nükleer enerjinin yeniden tartışılabilir bir seçenek hâline gelmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte Fukushima sonrası oluşan toplumsal güvensizlik, nükleer atık yönetimi, güvenlik kültürü ve yayılma riski gibi başlıklar önemini korumaktadır. SMR'lerin daha küçük ölçeği ve pasif güvenlik özellikleri bu kaygıları azaltabilir; ancak tamamen ortadan kaldırmaz. Özellikle HALEU yakıtı, dağıtık konuşlandırma modelleri ve güvence denetimleri, SMR tartışmalarında dikkatle ele alınması gereken başlıklar olmaya devam etmektedir (Squassoni, 2023).

Bu üç boyut birlikte değerlendirildiğinde, SMR'lerin enerji dönüşümünün yeni paradigması olarak ancak koşullu biçimde savunulabileceği sonucuna ulaşılmaktadır. SMR'ler her ülke ve her enerji sistemi için tek başına çözüm değildir; fakat düşük karbonlu baz yük, sanayi elektrifikasyonu, hidrojen üretimi, veri merkezleri, uzak bölgeler ve yüksek yenilenebilir payına sahip elektrik sistemlerinde tamamlayıcı ve stratejik bir araç hâline gelebilir. Bu potansiyelin gerçekleşmesi; ilk ticari projelerin maliyet kontrolünü sağlamasına, lisanslama süreçlerinin öngörülebilir ilerlemesine, yakıt tedarik zincirinin güvence altına alınmasına ve toplumsal güvenin şeffaf süreçlerle inşa edilmesine bağlıdır.

Sonuç olarak SMR'ler ne abartıldığı kadar risksiz ve kesin bir çözüm ne de görmezden gelinebilecek marjinal bir teknolojidir. En doğru değerlendirme, SMR'lerin enerji dönüşümünde koşullu, bağlama bağlı ve tamamlayıcı bir paradigma adayı olduğu yönündedir. Bu nedenle ülkeler için asıl soru, SMR'lerin "iyi" ya da "kötü" olup olmadığı değil; hangi koşullarda, hangi ölçeklerde, hangi finansman modeliyle ve hangi stratejik hedefler için anlamlı hâle geleceğidir.

9.2 Türkiye Neden SMR Teknolojilerini Stratejik Öncelik Haline Getirmelidir? Üç Temel Gerekçe

Bu raporun ulaştığı temel sonuçlardan biri, Türkiye'nin SMR teknolojilerine stratejik öncelik vermesi gerektiği yönündeki argümanın yalnızca enerji arzı gerekçesiyle değil, birbirini tamamlayan üç bağımsız gerekçe sistemiyle savunulabileceğidir. Enerji güvenliği, teknolojik egemenlik ve jeopolitik konumlanma başlıkları birlikte değerlendirildiğinde, SMR politikası Türkiye açısından yalnızca bir elektrik üretim tercihi değil, uzun vadeli bir stratejik kapasite inşası meselesi hâline gelmektedir.

Birinci gerekçe, enerji güvenliği rasyonalitesidir. Türkiye'nin yüksek enerji ithalat faturası ve özellikle doğal gaza olan yapısal bağımlılığı, makroekonomik istikrar ve sanayi rekabetçiliği

üzerinde sürekli bir baskı oluşturmaktadır. Şeker ve Kılıç Çetin'in (2022) bulgularına göre enerji fiyatlarındaki artış, Türk sanayi rekabetçiliğini olumsuz yönde etkilemektedir. 2022 küresel enerji fiyat şoku da bu kırılganlığın en güncel örneklerinden biri olmuştur. SMR'ler; uzun vadeli yakıt maliyet öngörülebilirliği, düşük karbonlu baz yük kapasitesi ve tedarikçi çeşitlendirmesi yoluyla bu yapısal kırılganlığa kısmi fakat stratejik bir yanıt sunabilir.

Bu enerji güvenliği gerekçesi, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefiyle de doğrudan bağlantılıdır. Artan elektrik talebi, sanayi elektrifikasyonu, hidrojen üretimi ve veri merkezi yatırımları dikkate alındığında Türkiye'nin yalnızca yenilenebilir enerji kapasitesiyle değil, aynı zamanda düzenlenebilir düşük karbonlu kaynaklarla da desteklenen bir enerji portföyüne ihtiyaç duyacağı görülmektedir. Toklu ve Evrendilek'in (2024) modelleme çalışması, Türkiye'nin net sıfır senaryosunda ek düşük karbonlu baz yük kapasitesine ihtiyaç duyabileceğini ortaya koymaktadır. SMR'ler bu açığın tamamını tek başına kapatmasa da, enerji sisteminin güvenilirliğini artıran tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

İkinci gerekçe, teknolojik egemenlik ve sanayi politikası rasyonalitesidir. Kritik teknolojilere bağımlılığın yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda stratejik ve güvenlik boyutları da bulunmaktadır (Edler vd., 2020). Akkuyu projesi aracılığıyla Rusya ile kurulan derin nükleer ilişki, Türkiye'ye önemli bir nükleer işletme deneyimi kazandırmakla birlikte, tek tedarikçi bağımlılığının yaratabileceği stratejik sınırlılıkları da göstermektedir. SMR teknolojilerine yönelik özgün ve çok taraflı bir yatırım stratejisi, bu bağımlılığı çeşitlendirme, yerli tedarik zinciri oluşturma ve zaman içinde belirli mühendislik alanlarında özgünleşme imkânı sağlayabilir.

Bu çerçevede SMR politikası, enerji sektörünün ötesine geçen bir sanayi politikası aracı olarak da görülmelidir. Nükleer kalite güvence, hassas imalat, ileri malzemeler, kontrol-otomasyon sistemleri, dijital ikiz teknolojileri ve güvenlik analizleri gibi alanlar; savunma sanayii, havacılık, ileri makine imalatı ve yüksek teknoloji üretimiyle kesişmektedir. Kılıç ve Ögütçü'nün (2023) Türk savunma sanayii dönüşümüne ilişkin değerlendirmesi, uzun vadeli kamu kararlılığı, Ar-Ge desteği ve yerli tedarik zinciri geliştirme politikalarının stratejik sektörlerde önemli sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Benzer bir yaklaşımın nükleer alanda da dikkatli, aşamalı ve güvenlik odaklı biçimde uygulanması mümkündür.

Üçüncü gerekçe, jeopolitik konumlanma ve bölgesel etki rasyonalitesidir. SMR piyasasının 2030'larda ticari olarak olgunlaşması hâlinde, erken konumlanan ülkeler teknoloji edinimi, finansman, lisanslama deneyimi ve insan kaynağı açısından daha güçlü bir pazarlık pozisyonuna sahip olacaktır. Türkiye'nin Orta Doğu, Balkanlar, Kafkasya ve Orta Asya ile sahip olduğu coğrafi, ekonomik ve diplomatik bağlar; SMR alanında eğitim, mühendislik, danışmanlık ve belirli tedarik zinciri hizmetleri için bölgesel fırsatlar yaratabilir. Kim'in (2021) BAE-Güney Kore nükleer ortaklığına ilişkin çalışması, nükleer enerji projelerinin yalnızca elektrik üretim yatırımı değil, uzun vadeli stratejik ortaklık mekanizması hâline gelebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak Türkiye'nin SMR teknolojilerini stratejik öncelik olarak ele alması, tek bir gerekçeye dayanmamaktadır. Enerji güvenliği, teknolojik kapasite inşası ve bölgesel jeopolitik konumlanma birbirinden bağımsız fakat birbirini güçlendiren üç temel dayanak oluşturmaktadır. Bu nedenle Türkiye açısından en rasyonel yaklaşım, SMR'leri kısa vadede kesin ve risksiz bir çözüm olarak görmek değil; uzun vadeli enerji güvenliği, sanayi politikası ve dış politika hedefleriyle uyumlu

biçimde aşamalı, seçici ve kurumsal olarak yönetilen stratejik bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektir.

9.3 Türkiye'nin Geç Kalması Durumunda Ortaya Çıkabilecek Riskler: Sessiz Stratejik Erozyon

“Geç kalma” olgusu, enerji ve teknoloji politikalarında çoğu zaman dramatik tek bir kararla değil, zaman içinde biriken sessiz bir stratejik erozyonla ortaya çıkmaktadır. SMR teknolojileri açısından bu erozyon; teknoloji standartlarının dışında kalma, insan kaynağı yetiştirme zamanlamasını kaçırma, tedarik zinciri fırsatlarını kaybetme ve uygun siyasi karar penceresini değerlendirememesi gibi birbirini güçlendiren mekanizmalar üzerinden gelişebilir.

Birinci mekanizma, teknoloji standardizasyon sürecinin dışında kalmaktır. SMR piyasası ticari olgunluğa yaklaştıkça belirli reaktör tipleri, yakıt seçenekleri, güvenlik yaklaşımları ve lisanslama protokolleri fiili standartlara dönüşmektedir. Bu sürece erken katılmayan ülkeler, daha sonra kendi düzenleyici çerçevelerini dışarıda şekillenmiş standartlara uyarlamak zorunda kalabilir. Bu durum hem zaman kaybı hem de teknik kapasite eksikliği yaratır. IAEA'nın SMR koordineli araştırma projelerine erken katılımın düzenleyici öğrenme süreçlerini hızlandırabileceğini gösteren çalışmaları, bu mekanizmanın önemini ortaya koymaktadır (IAEA, 2023a).

İkinci mekanizma, insan kaynağı yetiştirme zamanlamasının kaçırılmasıdır. Nükleer mühendislik, yalnızca lisans eğitimiyle değil; lisansüstü uzmanlaşma, saha deneyimi, güvenlik kültürü ve düzenleyici bilgi birikimiyle olgunlaşan uzun vadeli bir kapasite alanıdır. Bu nedenle 2026–2030 döneminde başlatılmayan bir insan kaynağı programının sonuçları, ancak 2030'ların ortası ve sonrasında alınabilecektir. Gecikme yalnızca mezun sayısını değil, kritik karar dönemlerinde ihtiyaç duyulacak deneyimli uzman havuzunu da sınırlayacaktır. Bu durum lisanslama, işletme, güvenlik analizi ve proje yönetimi süreçlerinde öğrenme maliyetlerini artırabilir.

Üçüncü mekanizma, tedarik zinciri pencerelerinin kapanmasıdır. SMR teknolojileri ticari ölçeğe yaklaştıkça önde gelen teknoloji sağlayıcıları, uzun vadeli tedarik sözleşmeleri, stratejik ortaklıklar ve sertifikalı tedarikçi ağları oluşturmaktadır. Bu ekosistemler olgunlaştıktan sonra sisteme dâhil olmak daha zor, daha maliyetli ve daha düşük pazarlık gücüyle mümkün hâle gelebilir. Kanada'da BWRX-300 projesi etrafında tedarik zinciri yapılanmasının 2024–2026 döneminde hız kazanması ve GE Hitachi ile yerel firmalar arasında sertifikasyon süreçlerinin başlaması, bu pencerenin nasıl şekillendiğini göstermektedir (OPG, 2024). Türk firmalarının benzer süreçlere geç katılması, ilerideki SMR projelerinde daha sınırlı rol almalarına yol açabilir.

Dördüncü mekanizma, siyasi karar penceresinin kaymasıdır. Büyük altyapı ve kritik teknoloji yatırımlarında kamuoyu ilgisi, siyasi irade, uluslararası ortaklık isteği ve finansman koşulları her zaman aynı anda elverişli olmaz. Bu unsurların kısmen örtüştüğü dönemler, stratejik karar pencereleri yaratır. Türkiye açısından Akkuyu projesiyle oluşan kurumsal deneyim, enerji güvenliği kaygılarının artması, net sıfır hedefinin politika gündeminde güçlenmesi ve SMR teknolojilerine yönelik küresel ilginin yükselmesi böyle bir pencereye işaret etmektedir. Bu pencerenin değerlendirilmemesi, ileride aynı koşulların yeniden oluşmasını zorlaştırabilir.

Sonuç olarak SMR alanında geç kalmak, yalnızca bir teknoloji fırsatını kaçırmak anlamına gelmez. Aynı zamanda düzenleyici öğrenme, insan kaynağı, sanayi sertifikasyonu, uluslararası ortaklık ve jeopolitik konumlanma alanlarında birikimli kayıplar yaratabilir. Bu nedenle Türkiye açısından

rasyonel strateji, belirsizlikler tamamen ortadan kalkana kadar beklemek değil; büyük yatırım kararlarını dikkatle zamanlarken kurumsal hazırlık, insan kaynağı ve tedarik zinciri geliştirme adımlarını geciktirmeden başlatmaktır.

9.4 SMR'ler Türkiye'nin Enerji Güvenliğine Nasıl Katkı Sağlayabilir? Çok Katmanlı Bir Değerlendirme

SMR'lerin Türkiye'nin enerji güvenliğine katkısı, yalnızca elektrik arzı güvencesi üzerinden değil, daha geniş bir enerji güvenliği çerçevesiyle değerlendirilmelidir. Goldthau ve Sovacool'un (2022) yaklaşımı, enerji güvenliğini erişilebilirlik, uygun fiyat, sürdürülebilirlik ve kabul edilebilirlik eksenleri üzerinden ele almakta; bu eksenler SMR teknolojilerinin Türkiye açısından farklı katkı mekanizmalarını görünür kılmaktadır.

Erişilebilirlik ekseninde SMR'ler, özellikle şebeke bağlantısı sınırlı veya enerji arz sürekliliği kritik olan sanayi tesisleri, maden sahaları, veri merkezleri, askeri ve stratejik altyapılar için güvenilir elektrik ve ısı sağlayabilecek bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Türkiye açısından bu katkı, genel elektrik erişiminden çok bölgesel sanayi kalkınması, kritik altyapı dayanıklılığı ve yüksek kesintisizlik gerektiren tesislerin enerji güvenliği bağlamında anlam kazanmaktadır. Bu nedenle SMR'ler, merkezi büyük santrallerin yerine geçmekten çok, belirli uygulama alanlarında enerji arz güvenliğini güçlendiren tamamlayıcı bir teknoloji olarak konumlandırılmalıdır.

Uygun fiyat ekseninde SMR'lerin temel katkısı, kısa vadeli düşük maliyetten ziyade uzun dönem fiyat istikrarı potansiyelidir. Nükleer yakıt maliyetinin toplam üretim maliyeti içindeki payının görece düşük olması, doğal gaz fiyat dalgalanmalarına kıyasla daha öngörülebilir bir maliyet yapısı sunabilir. Bu durum, özellikle enerji yoğun sanayi kuruluşları ve uzun vadeli elektrik alım sözleşmeleriyle çalışan büyük tüketiciler için stratejik değer taşımaktadır. Ancak bu katkının gerçekleşebilmesi, ilk yatırım maliyetlerinin kontrol altında tutulmasına ve finansman modelinin sürdürülebilir biçimde tasarlanmasına bağlıdır.

Sürdürülebilirlik ekseninde SMR'ler, düşük yaşam döngüsü emisyonları ve düzenlenebilir üretim karakteri sayesinde Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefiyle uyumlu bir tamamlayıcı seçenek sunabilir. Yüksek yenilenebilir enerji payına sahip bir sistemde SMR'ler; güneş ve rüzgâr üretiminin düşük olduğu dönemlerde düşük karbonlu baz yük ve sistem dengeleme katkısı sağlayabilir. Ayrıca sanayi elektrifikasyonu, düşük karbonlu hidrojen üretimi ve yüksek güvenilirlik gerektiren veri merkezi yatırımları için kesintisiz enerji arzı sunma potansiyeline sahiptir.

Kabul edilebilirlik eksenine ise SMR'lerin Türkiye'deki en kritik sınav alanıdır. Kamuoyunun nükleer enerjiye yönelik temkinli tutumu, özellikle Akkuyu projesinin Rusya ile ilişkilendirilmesi ve nükleer güvenlik konusundaki tarihsel kaygılar nedeniyle önemini korumaktadır. SMR'lerin daha küçük ölçekli ve pasif güvenlik özelliklerine sahip olması toplumsal kabulü kolaylaştırabilir; ancak bu özellikler tek başına yeterli değildir. Güvenlik şeffaflığı, bağımsız denetim mekanizmaları, açık veri paylaşımı ve yerel halkı gerçek anlamda bilgilendiren katılımcı iletişim süreçleri zorunludur.

Bu bağlamda BAE'nin Barakah NGS projesi, nükleer enerji projelerinde kamuoyu yönetimi, uluslararası denetim ve IAEA güvence sistemlerinin görünür biçimde kullanılması açısından incelenmeye değer bir örnek sunmaktadır (WNA, 2019). Türkiye açısından çıkarılacak temel ders,

SMR programının yalnızca teknik ve ekonomik bir proje olarak değil, aynı zamanda toplumsal güven inşası gerektiren uzun vadeli bir yönetim süreci olarak tasarlanması gerektiğidir.

Sonuç olarak SMR'ler Türkiye'nin enerji güvenliğine tek boyutlu değil, çok katmanlı katkılar sağlayabilir. Bu katkı; arz sürekliliği, fiyat istikrarı, düşük karbonlu üretim, kritik altyapı dayanıklılığı ve stratejik tedarik çeşitlendirmesi üzerinden ortaya çıkmaktadır. Ancak bu potansiyelin gerçekleşmesi, yalnızca reaktör teknolojisinin seçimine değil; finansman modeli, düzenleyici güvenilirlik, şeffaf denetim ve toplumsal kabul süreçlerinin birlikte yönetilmesine bağlıdır.

9.5 Türkiye Bölgesel SMR Merkezi Olabilir mi? Potansiyelin Nesnel Sınırları

Bölgesel SMR merkezi vizyonu, Türkiye açısından stratejik olarak çekici olmakla birlikte, gerçekçiliği hem avantajlar hem de kısıtlar üzerinden dengeli biçimde değerlendirilmelidir. Bu nedenle konu üç aşamalı bir çerçevede ele alınmalıdır: Türkiye'nin yapısal avantajları, mevcut sınırlılıkları ve bu iki alan arasındaki boşluğu kapatacak politika koşulları.

Türkiye'nin önemli yapısal avantajları bulunmaktadır. Avrupa, Orta Doğu, Kafkasya ve Orta Asya'nın kesişim noktasındaki coğrafi konumu; bölgesel enerji ve teknoloji iş birlikleri açısından doğal bir bağlantı alanı oluşturmaktadır. Geniş mühendislik insan kaynağı, köklü teknik üniversite altyapısı, demir-çelik, makine, savunma sanayii, kontrol-otomasyon ve hassas imalat alanlarındaki mevcut kapasite; SMR tedarik zinciri için başlangıç zemini sunmaktadır. Ayrıca Türkiye'nin bankacılık sistemi, kamu finansman araçları ve bölgesel diplomatik ağı, uzun vadeli nükleer iş birlikleri açısından belirli bir kurumsal avantaj yaratmaktadır.

Bununla birlikte gerçek kısıtlar da açık biçimde kabul edilmelidir. NDK'nin düzenleyici kapasitesi, kapsamlı bir SMR programının gerektirdiği teknik derinliğe ulaşmak için güçlendirilmelidir. TENMAK'ın araştırma kapasitesi ise ileri reaktör tasarımı, güvenlik analizi, yakıt çevrimi ve nükleer malzeme alanlarında daha uzun vadeli yatırımlara ihtiyaç duymaktadır. Nükleer mühendislik ve ilgili uzmanlık alanlarında insan kaynağı hâlâ sınırlıdır. Ayrıca Türkiye'nin henüz işletmede bir SMR referans tesisine sahip olmaması, bölgesel merkez iddiasının en önemli güvenilirlik açığını oluşturmaktadır.

Bu noktada temel sorun, Türkiye'nin potansiyelinin olup olmadığı değil; bu potansiyelin kurumsal, teknik ve ekonomik kapasiteye dönüştürülüp dönüştürülemeyeceğidir. Bölgesel merkez olmak için yalnızca coğrafi konum veya sanayi altyapısı yeterli değildir. Güvenilir düzenleyici kurumlar, sertifikalı tedarik zinciri, işletmede referans tesisler, nitelikli insan kaynağı, uzun vadeli finansman ve uluslararası güvenilirlik birlikte sağlanmalıdır.

Bu analiz, net bir sonuca işaret etmektedir: Türkiye bölgesel SMR merkezi olabilir; ancak bu statüye yalnızca irade beyanıyla değil, sahada kanıtlanmış tesislerle, güvenilir düzenleyici kapasiteyle, nükleer kalite standartlarına uyumlu sanayi altyapısıyla ve uluslararası düzeyde tanınan uzmanlıkla ulaşabilir. Bu nedenle ilk gerçek adım, bölgesel liderlik söylemi değil, ulusal kapasite inşası olmalıdır.

Sonuç olarak bölgesel SMR merkezi vizyonu Türkiye için ulaşılabilir fakat koşullu bir hedefdir. Türkiye, önce kendi SMR programını güvenilir biçimde başlatmalı, referans tesisler oluşturmalı, yerli tedarik zincirini sertifikalandırmalı ve insan kaynağını güçlendirmelidir. Bölgesel merkez

konumu, bu sürecin başlangıç noktası değil; başarılı ve sürdürülebilir bir ulusal SMR programının doğal sonucu olarak ortaya çıkacaktır.

9.6 Kapanış: Tarihin Hızlandığı Bir Anda Türkiye'nin Seçimi

Tarihsel kırılma dönemlerinde uzun vadeli stratejik kararlar, çoğu zaman belirsizliğin tamamen ortadan kalkması beklenmeden alınmak zorundadır. İklim krizinin derinleştiği, enerji jeopolitiğinin yeniden şekillendiği, yapay zekâ ve veri merkezleri kaynaklı elektrik talebinin arttığı ve büyük güçler arasındaki kritik teknoloji rekabetinin yoğunlaştığı bu dönemde Türkiye'nin SMR politikası yalnızca bir enerji tercihi olarak görülemez. Bu tercih; Türkiye'nin 2053 hedeflerinde nasıl bir konum alacağını, bölgesel enerji jeopolitiğinde ne tür bir aktör olacağını ve ulusal teknoloji kapasitesinde hangi boşlukları kapatmayı hedefleyeceğini belirleyen stratejik bir karar alanıdır.

Bu raporun ulaştığı temel sonuç, SMR teknolojilerinin Türkiye açısından stratejik bir öncelik olarak ele alınması gerektiğidir. Ancak bu sonuç, SMR'lere koşulsuz ve eleştirisiz bir destek anlamına gelmemektedir. SMR teknolojileri hâlâ maliyet, lisanslama, yakıt tedariki, atık yönetimi, toplumsal kabul ve jeopolitik bağımlılık gibi önemli belirsizlikler içermektedir. Dolayısıyla Türkiye'nin bu alandaki politikası, teknolojik iyimserliğe değil; riskleri tanıyan, koşulları açıkça belirleyen ve kurumsal kapasiteyi adım adım inşa eden gerçekçi bir stratejik yaklaşıma dayanmalıdır.

Bu açıdan Türkiye için en rasyonel tutum, SMR yatırımlarını hemen ve kontrolsüz biçimde başlatmak değil; fakat strateji, düzenleyici kapasite, insan kaynağı, tedarik zinciri, finansman modeli ve uluslararası ortaklık hazırlıklarını geciktirmeden başlatmaktır. Böyle bir yaklaşım, Türkiye'ye hem belirsizlikleri yönetme hem de gelecekteki teknoloji ve piyasa fırsatlarına daha güçlü bir konumdan katılma imkânı sağlayacaktır. SMR politikası, kısa vadeli siyasi döngülerin ötesinde, uzun vadeli ulusal çıkarlar, enerji güvenliği ve teknolojik egemenlik perspektifiyle ele alınması gereken bir stratejik kapasite inşası meselesidir.

KAYNAKÇA

- Amatullah, A., Permana, S., Irwanto, D., & Aimon, A. H. (2024). Comparative analysis on small modular reactor (SMR) with uranium and thorium fuel cycle. *Nuclear Engineering and Design*, 418, 112934. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112934>
- Amazon. (2023). Amazon invests in X-energy to advance small modular reactor deployment. <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-x-energy-nuclear-smr-investment>
- Balmaceda, M., Escribano, G., & Kakachia, K. (2023). The politics of energy security in the age of climate change and great power competition. *Energy Research & Social Science*, 97, 102984.
- BEIS [Department for Business, Energy and Industrial Strategy]. (2021). Nuclear energy: Advanced modular reactors and small modular reactors. UK Government. <https://www.gov.uk/guidance/nuclear-energy>
- Bellan, R. (2024). Microsoft taps Three Mile Island nuclear plant to power AI. TechCrunch. <https://techcrunch.com/2024/09/20/microsoft-taps-three-mile-island-nuclear-plant-to-power-ai/>
- BOTAŞ [Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş.]. (2024). Türkiye doğal gaz sektörü istatistikleri 2024. BOTAŞ.
- Bunn, M., Harrell, P., Kim, H., & Roth, N. (2024). HALEU: Opportunities and risks for advanced nuclear fuel supply. Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School.
- Carelli, M. D., & Garrone, P. (2022). Economics of small-medium sized nuclear reactors: A comprehensive review. *Progress in Nuclear Energy*, 154, 104479.
- Carlson, J. (2024). HALEU: Potential safeguards and non-proliferation implications. Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation (VCDNP). <https://vcdnp.org/haleu-potential-safeguards-and-non-proliferation-implications/>
- CNEA [Comisión Nacional de Energía Atómica]. (2024). CAREM-25 project status report. CNEA.
- CNNC [China National Nuclear Corporation]. (2023). Linglong One (ACP100) project construction and development report. CNNC Press Release.
- CNSC [Canadian Nuclear Safety Commission]. (2022). CNSC vendor design review process: Guidance document GD-385. CNSC.
- CNSC [Canadian Nuclear Safety Commission]. (2025). Licence to prepare site and construct a nuclear power plant at Darlington. CNSC.
- Constellation Energy. (2024). Constellation to launch Crane Clean Energy Center, restoring jobs and carbon-free power to the grid. <https://www.constellationenergy.com/news/2024/Constellation-to-Launch-Crane-Clean-Energy-Center-Restoring-Jobs-and-Carbon-Free-Power-to-The-Grid.html>
- Cowan, R. (1990). Nuclear power reactors: A study in technological lock-in. *Journal of Economic History*, 50(3), 541–567.

- Department for Energy Security and Net Zero. (2024). Great British Nuclear and small modular reactor competition updates. UK Government. <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-energy-security-and-net-zero>
- Diesendorf, M., & Elliston, B. (2018). The feasibility of 100% renewable electricity systems: A response to critics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 318–330.
- Diorio, C. (2016). The Megatons to Megawatts Program. In R. B. Laughlin (Ed.), *Introduction to nuclear energy (PH241)*. Stanford University.
- DOE [U.S. Department of Energy]. (2023). Pathways to commercial liftoff: Advanced nuclear. Office of Clean Energy Demonstrations. <https://www.energy.gov/oced/advanced-nuclear>
- DOE [U.S. Department of Energy]. (2024). HALEU availability program: Supporting advanced reactor deployment. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/ne/advanced-reactor-demonstration-program>
- Doosan Enerbility. (2025). Nuclear energy solutions and global project portfolio. <https://www.doosanenerbility.com/en/business/nuclear-energy>
- Downs, E. S., Becker, J., & DeGarmo, D. (2022). China's civil nuclear sector: Plowshares and swords. Center for Naval Analyses.
- Duncan, F. (1990). *Rickover and the nuclear navy: The discipline of technology*. Naval Institute Press.
- EDF [Électricité de France]. (2023). Nuward SMR: A French initiative for a competitive European SMR. EDF Group.
- Edler, J., Blind, K., Frietsch, R., Ruhland, S., Schimanski, N., Schubert, T., & Schuler, J. (2020). Technology sovereignty: From demand to concept. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI.
- Egeli, S., Güvenç, S., Kurç, Ç., & Mevlütoğlu, A. (2024). From client to competitor: The rise of Türkiye's defence industry. International Institute for Strategic Studies.
- Emirates Nuclear Energy Corporation. (2025). Barakah nuclear energy plant. <https://www.enec.gov.ae/our-work/barakah-nuclear-energy-plant/>
- Energy Northwest. (2024). Advanced nuclear project with X-energy. <https://www.energy-northwest.com/whoweare/Pages/Advanced-Nuclear.aspx>
- EPRI [Electric Power Research Institute]. (2024). Nuclear energy for data centers: A technical and economic assessment. EPRI.
- ETKB [Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı]. (2024). Türkiye enerji görünümü 2024. ETKB.
- ETKB [Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı]. (2025). Türkiye elektrik sektörü istatistikleri: Ekim 2025. ETKB. <https://enerji.gov.tr/infobank-energy-electricity>
- European Commission. (2024). EU Emissions Trading System (EU ETS) — carbon market data 2024. European Commission.
- European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). (2022). Threat landscape for critical infrastructure. <https://www.enisa.europa.eu/publications>

- Flournoy, M., & Sulmeyer, M. (2018). Battlefield internet: A plan for securing cyberspace. *Foreign Affairs*, 97(5), 40–48.
- Food and Agriculture Organization. (2023). Fertilizer use and food security. <https://www.fao.org/fertilizer-and-agriculture/en/>
- GE Hitachi Nuclear Energy. (t.y.). BWRX-300 small modular reactor development program. https://www.ge.com/content/dam/gepower-nuclear/global/en_US/documents/product-fact-sheets/BWRX-300_Fact_Sheet-2020.pdf
- GE Vernova. (2025). GE Hitachi's BWRX-300 small modular reactor approved for construction by the Province of Ontario and Ontario Power Generation [Press release]. <https://www.governova.com/news/press-releases/ge-vernova-hitachi-bwrx-300-small-modular-reactor-approved-construction-province-ontario-opg>
- GEH [GE-Hitachi Nuclear Energy]. (2024). BWRX-300 small modular reactor: Technology overview and deployment status. GEH.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2020). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50.
- Goldman Sachs. (2024). Generational growth: AI, data centers and the coming US power demand surge. Goldman Sachs Global Investment Research.
- Goldthau, A., & Sovacool, B. K. (2012). The uniqueness of the energy security, justice, and governance problem. *Energy Policy*, 41, 232–240.
- Google. (2024). Google partners with Kairos Power to advance nuclear energy technologies. <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/kairos-power-nuclear-energy-agreement/>
- Government of New Brunswick. (2023). Small modular reactor strategy and energy innovation roadmap. <https://www2.gnb.ca>
- Government of Saskatchewan. (2023). Saskatchewan SMR feasibility and decarbonization strategy. <https://www.saskatchewan.ca>
- Great British Nuclear. (2024). SMR technology selection process and preferred bidder announcement. <https://www.gov.uk/government/organisations/great-british-nuclear>
- Grubler, A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing. *Energy Policy*, 38(9), 5174–5188.
- Haas, R., Mez, L., & Ajanovic, A. (Eds.). (2023). *The technological and economic future of nuclear power*. Springer VS.
- Heide, D., von Bremen, L., Greiner, M., Hoffmann, C., Speckmann, M., & Bofinger, S. (2010). Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe. *Renewable Energy*, 35(11), 2483–2489.
- Hewlett, R. G., & Duncan, F. (1974). *Nuclear navy: 1946–1962*. University of Chicago Press.
- Howorth, J. (2018). Strategic autonomy and EU–NATO cooperation: Threat or opportunity for transatlantic defence relations? *Journal of European Integration*, 40(5), 523–537.

- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (1991). Small and medium power reactors: Project initiation study (Phase I) (IAEA-TECDOC-637). IAEA.
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2012). The Fukushima Daiichi accident: Report by the Director General. IAEA.
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2016). SMR safety and security template B. GNSSN ANNuR Workshop on Small Modular Reactor Safety and Licensing. IAEA. [https://gnssn.iaea.org/main/annur/Activity%20Documents%20%20Public/Workshop%20on%20Small%20Modular%20Reactor%20\(SMR\)%20Safety%20and%20Licensing/SMR_Safety_and_Security_TemplateB.pdf](https://gnssn.iaea.org/main/annur/Activity%20Documents%20%20Public/Workshop%20on%20Small%20Modular%20Reactor%20(SMR)%20Safety%20and%20Licensing/SMR_Safety_and_Security_TemplateB.pdf)
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2020). Advances in small modular reactor technology developments (2020 ed.). IAEA. <https://www.iaea.org/publications/13294>
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2022a). Hydrogen production using nuclear energy (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.2). IAEA.
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2022b). Advances in small modular reactor technology developments: A supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). IAEA.
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2023). Advances in small modular reactor technology developments: A supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System. IAEA.
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2024). Advances in small modular reactor technology developments: 2024 edition. IAEA. <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (2025). Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. IAEA. <https://www.iaea.org/publications/15494>
- IAEA [International Atomic Energy Agency]. (t.y.). What are small modular reactors (SMRs)? IAEA. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- IEA [International Energy Agency]. (2020). Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking. IEA.
- IEA [International Energy Agency]. (2021). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA [International Energy Agency]. (2023). Global hydrogen review 2023. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- IEA [International Energy Agency]. (2024a). Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026. IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>
- IEA [International Energy Agency]. (2024b). Nuclear power and secure energy transitions: Tracking progress. IEA. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>
- IEA [International Energy Agency]. (2025a). Energy and AI. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- IEA [International Energy Agency]. (2025b). The path to a new era for nuclear energy. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>

- IEA [International Energy Agency]. (2026a). Electricity 2026: Analysis and forecast to 2030. IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-2026>
- IEA [International Energy Agency]. (2026b). Global energy review 2026. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026>
- IEA [International Energy Agency]. (2026c). Key questions on energy and AI. IEA. <https://www.iea.org/reports/key-questions-on-energy-and-ai>
- Ingersoll, D. T., & Carelli, M. D. (Eds.). (2021). Handbook of small modular nuclear reactors (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- International Atomic Energy Agency. (2022). Computer security at nuclear facilities. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-security>
- International Atomic Energy Agency. (2023). Advances in small modular reactor technology development. <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- International Atomic Energy Agency. (2023). Advances in small modular reactor technology development. <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- International Atomic Energy Agency. (2023). Nuclear energy for hydrogen production. <https://www.iaea.org/topics/hydrogen-production>
- International Energy Agency. (2021). Ammonia technology roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizers. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
- International Energy Agency. (2023). Data centres and energy security. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- International Energy Agency. (2025). Energy and AI. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report. Cambridge University Press.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
- IRENA [International Renewable Energy Agency]. (2023). World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway. IRENA. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- Jenkins, J. D., Luke, M., & Thernstrom, S. (2018). Getting to zero carbon requires all the tools in the toolbox. *Joule*, 2(12), 2487–2510.
- Joskow, P. L. (2011). Comparing the costs of intermittent and dispatchable electricity generating technologies. *American Economic Review*, 101(3), 238–241.

- KAERI [Korea Atomic Energy Research Institute]. (2012). SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor): Standard design approval. KAERI.
- Kairos Power. (2024). Google and Kairos Power announce agreement to deploy advanced nuclear reactors. <https://kairospower.com/news/>
- Korea Electric Power Corporation. (t.y.). APR1400 reactor: Export and global nuclear project experience. <https://home.kepco.co.kr/kepco/indi/foreign/en/html/G/B/ENGBHP00102.html>
- Korea Hydro & Nuclear Power. (2025). APR1400 reactors and nuclear fleet overview. <https://www.khnp.co.kr/eng>
- Lévêque, F. (2014). Electricity liberalization in Europe: How free is a free electron? Cambridge University Press.
- Lovering, J., Baker, S., & Nordhaus, T. (2023). Small modular reactors: A primer. The Breakthrough Institute.
- Lovins, A. B. (2023). New nukes are not just costly and slow — they are unnecessary: A reply to pro-nuclear arguments. *Energy Research & Social Science*, 96, 102913.
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955–967.
- Meta. (2024). Request for proposals for 1–4 GW nuclear capacity. <https://about.fb.com/news/>
- METI [Ministry of Economy, Trade and Industry]. (2023). GX (Green Transformation) implementation council: Basic policy. METI.
- Mitsubishi Heavy Industries. (t.y.). Energy systems: Nuclear power and next-generation reactor development. <https://www.mhi.com/products/energy/nuclear.html>
- Mordor Intelligence. (2025). Data center market in Turkey — growth, trends, and forecasts (2025–2030). Mordor Intelligence Research & Advisory.
- Naterer, G. F., Suppiah, S., Lewis, M., Gabriel, K., Dincer, I., Rosen, M. A., Fowler, M., Rizvi, G., Easton, E. B., Ikeda, B. M., Kaye, M. H., Lu, L., Piro, I., Spekkens, P., Tremaine, P., Mostaghimi, J., Avsec, J., & Jiang, J. (2009). Recent Canadian advances in nuclear-based hydrogen production and the thermochemical Cu–Cl cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(7), 2901–2917.
- National Institute of Standards and Technology. (2024). Cybersecurity framework (CSF) 2.0. <https://www.nist.gov/cyberframework>
- NRC [U.S. Nuclear Regulatory Commission]. (2020). Final safety evaluation report for NuScale Power LLC standard plant design. NRC. <https://www.nrc.gov/reactors/advanced.html>
- NRC [U.S. Nuclear Regulatory Commission]. (2025a). Advanced reactors. NRC. <https://www.nrc.gov/reactors/advanced.html>
- NRC [U.S. Nuclear Regulatory Commission]. (2025b). Part 53: Risk-informed, technology-inclusive regulatory framework for advanced reactors. NRC. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/modernizing/rulemaking/part-53>

- NRC [U.S. Nuclear Regulatory Commission]. (2025c). Microreactors and advanced reactor licensing initiatives. NRC. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/microreactors.html>
- NRC [U.S. Nuclear Regulatory Commission]. (2025d). Fuel enrichment and new fuel licensing framework. NRC. <https://www.nrc.gov/materials/new-fuels>
- NuScale Power. (2024). VOYGR™ small modular reactor technology overview. <https://www.nuscalepower.com/technology/voygr-smr>
- Nye, J. S. (2011). The future of power. PublicAffairs.
- OECD NEA [Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency]. (2021). Small modular reactors: Challenges and opportunities (NEA No. 7560). OECD. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52716/small-modular-reactors
- OECD NEA [Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency]. (2023a). Long-term scenarios for the deployment of small modular reactors. NEA.
- OECD NEA [Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency]. (2023b). High-assay low-enriched uranium (HALEU): Availability and market perspectives for advanced reactors. NEA.
- OECD NEA [Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency]. (2024). SMR economics and learning curve analysis. NEA. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_91685/the-role-of-economics-in-smr-progress-and-deployment
- OECD Nuclear Energy Agency. (2024). Small modular reactors and deployment considerations. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15000/small-modular-reactors
- OECD Nuclear Energy Agency. (2024). The role of nuclear in low-carbon hydrogen and industrial decarbonisation. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15000/small-modular-reactors
- OPG [Ontario Power Generation]. (2024). Darlington new nuclear project: BWRX-300 licensing and development status. OPG.
- OPG [Ontario Power Generation]. (2025). Darlington SMR project updates. OPG. <https://www.opg.com/powering-ontario/projects/darlington-new-nuclear-project/>
- Ortiz, M. (2023). Why Navy Seabees built a nuclear power plant on Antarctica. We Are The Mighty. <https://www.wearethemighty.com/history/why-navy-seabees-built-a-nuclear-power-plant-on-antarctica/>
- OSBÜK [Organize Sanayi Bölgeleri Üst Kuruluşu]. (2024). Türkiye organize sanayi bölgeleri yıllık raporu 2024. OSBÜK.
- Pflugmann, F., & De Blasio, N. (2020). Geopolitical and market implications of renewable hydrogen: New dependencies in a low-carbon energy world. Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School.
- Plokhly, S. (2018). Chernobyl: History of a tragedy. Basic Books.
- Research and Markets. (2025). Turkey data center market report 2025: Size, share, and trends analysis. Research and Markets.

- Reuters. (2025a). Largest US public power supplier leads push for small reactors. Reuters. <https://www.reuters.com/business/energy/largest-us-public-power-supplier-leads-push-small-reactors--reeii-2025-10-29/>
- Reuters. (2025b). Sweden's Vattenfall shortlists SMR developers. Reuters. <https://www.reuters.com/business/energy/swedens-vattenfall-shortlists-smr-developers/>
- Rolls-Royce SMR. (2024). Rolls-Royce SMR selected as preferred bidder in UK SMR programme. <https://www.rolls-royce-smr.com/press-releases>
- Rosatom [State Atomic Energy Corporation Rosatom]. (2019). Floating nuclear power station Akademik Lomonosov: Commercial operation launch in Pevek [Press release]. Rosatom.
- Rosatom [State Atomic Energy Corporation Rosatom]. (2024). Akkuyu nuclear power plant construction progress report. Rosatom.
- Schneider, M., & Froggatt, A. (2025). World nuclear industry status report 2025. WNISR. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2025-v1.pdf>
- Schwartz, P. (1991). The art of the long view: Planning for the future in an uncertain world. Doubleday.
- Scoville, H. J. (1963). Nuclear power at McMurdo Station, Antarctica. U.S. Army Nuclear Power Program.
- Sovacool, B. K., Schmid, P., Stirling, A., Walter, G., & MacKerron, G. (2020). Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power. *Nature Energy*, 5(12), 928–935.
- Sönmez, Ö., & Tekçe, M. (2023). Industrial electricity price dynamics in Turkey: Drivers and policy implications. *Utilities Policy*, 82, 101568.
- Squassoni, S. (2023). Small modular reactors and nuclear proliferation risks: A net assessment. *Arms Control Today*, 53(5), 14–19.
- STM ThinkTech. (2022). Nükleer enerjinin yeni nesli: Küçük modüler reaktörler (Trend Analizi). https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1655983212_stmkucukmodulerr eaktorler.pdf
- Şeker, A., & Kılıç Çetin, S. (2022). Energy price volatility and industrial competitiveness in Turkey: A sector-level analysis. *Energy Economics*, 112, 106157.
- TEİAŞ [Türkiye Elektrik İletim A.Ş.]. (2024). Türkiye elektrik enerjisi istatistikleri 2024. TEİAŞ.
- TEİAŞ [Türkiye Elektrik İletim A.Ş.]. (2025). Türkiye elektrik enerjisi 10 yıllık üretim kapasite projeksiyonu 2025–2034. TEİAŞ.
- TerraPower. (2023). Sodium reactor technology: Integrated energy system overview. TerraPower.
- Toklu, E., & Evrendilek, F. (2024). Long-term energy scenarios for Turkey's net-zero transition: Capacity requirements and technology mix. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113921.
- TÜİK [Türkiye İstatistik Kurumu]. (2023). Dış ticaret istatistikleri 2022: Enerji ithalatı. TÜİK.

- Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB). (2022). Küçük modüler reaktörler bilgilendirme notu. Türkiye Sınai Kalkınma Bankası. <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/kucuk-moduler-reaktorler-bilgilendirme-notu.pdf>
- U.S. Congress. (2022). Inflation Reduction Act of 2022 (H.R.5376). 117th Congress. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>
- U.S. Congress. (2024). Accelerating Deployment of Versatile, Advanced Nuclear for Clean Energy (ADVANCE) Act of 2024 (S.870). 118th Congress. <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/870>
- U.S. Department of Energy. (2024). Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP). Office of Nuclear Energy. <https://www.energy.gov/ne/advanced-reactor-demonstration-program>
- U.S. Department of Homeland Security. (2023). Critical infrastructure sectors. <https://www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience>
- U.S. Energy Information Administration. (2024). Nuclear explained: U.S. nuclear power. EIA. <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/>
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2023). NuScale small modular reactor design certification information. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/nuscale.html>
- UK Department for Energy Security and Net Zero. (2024). Great British Nuclear SMR competition documentation. HM Government. <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-energy-security-and-net-zero>
- UK Government. (2024). Civil nuclear: Roadmap to 2050. HM Government.
- UK Government. (2025). Great British Nuclear: SMR technology selection. HM Government.
- UK Government. (2026). Great British Energy – Nuclear: Contract with Rolls-Royce SMR for fleet development. HM Government.
- Van der Heijden, K. (1996). Scenarios: The art of strategic conversation. John Wiley & Sons.
- Washington Institute for Near East Policy. (2025). Coal, oil, gas, and nuclear: Risks in Turkey's growing energy demands. The Washington Institute. <https://www.washingtoninstitute.org/policy-analysis/coal-oil-gas-and-nuclear-risks-turkeys-growing-energy-demands>
- WNA [World Nuclear Association]. (2019). South Korea and UAE to collaborate on new nuclear opportunities. World Nuclear News.
- WNA [World Nuclear Association]. (2025a). High-assay low-enriched uranium (HALEU). WNA. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>
- WNA [World Nuclear Association]. (2025b). Small nuclear power reactors. WNA. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>
- WNA [World Nuclear Association]. (2025c). World nuclear performance report 2025. WNA. <https://world-nuclear.org/news-and-media/press-statements/world-nuclear->

[performance-report-2025-nuclear-delivers-record-breaking-year-in-electricity-generation](#)

- World Bank. (2023). Critical infrastructure resilience and energy security. <https://www.worldbank.org/en/topic/energy>
- World Bank. (2023). Turkey economic and energy sector overview. <https://www.worldbank.org/en/country/turkey>
- World Nuclear Association. (2025). Hydrogen production and nuclear energy. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-nuclear-energy.aspx>
- World Nuclear Association. (2025). Small modular reactors (SMRs). <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- World Steel Association. (2023). Steel's role in a low carbon future: 2023 fact sheet. WSA.
- Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122–128.
- X-energy. (2023). X-energy and Amazon collaboration on advanced nuclear reactors. <https://x-energy.com/press-releases>
- Yergin, D. (2011). *The quest: Energy, security, and the remaking of the modern world*. Penguin Press.
- Yeşilada, B., & Efeğil, E. (2022). Turkey's energy security strategy: Between East and West. *Mediterranean Politics*, 27(4), 541–561.

TESPAM

Türkiye Enerji Stratejileri ve Politikaları Araştırma Merkezi

TESPAM Hakkında

Türkiye Enerji Stratejileri ve Politikaları Araştırma Merkezi (TESPAM), Türkiye'nin enerji güvenliği, enerji politikaları ve enerji geçişi alanlarında bağımsız, bilimsel temelli politika araştırmaları üretmek amacıyla kurulmuş bir düşünce kuruluşudur.

TESPAM; yerli ve yabancı akademisyenler, politika yapımcılar ve sektör uzmanlarından oluşan araştırmacı kadrosuyla Türkiye'nin enerji gündemini kapsamlı ve çok boyutlu biçimde analiz etmektedir. Merkez, enerji jeopolitiği, yenilenebilir enerji, nükleer enerji, enerji verimliliği, iklim politikası ve kritik altyapı güvenliği gibi alanlarda politika raporları, analiz belgeleri ve kitap yayımlamaktadır.

TESPAM'ın araştırma çıktıları; kamuoyu farkındalığının artırılmasına, akademik bilgi üretimine ve politika süreçlerine kanıt temelli katkı sağlanmasına odaklanmaktadır. Merkez, ülkemizin enerji bağımsızlığı ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine bilimsel araştırmalarla katkı vermeyi temel misyon olarak benimsemektedir.

Bu Rapor Hakkında

Küçük Modüler Reaktörler (SMR): Teknolojik Gelişim Süreci, Küresel Enerji Dönüşümündeki Rolü ve Türkiye'nin Enerji Politikaları Açısından Stratejik Önemi başlıklı bu rapor, Doç. Dr. Anıl Çağlar Erkan ve Sude Manka tarafından hazırlanmıştır. Her iki yazar da TESPAM bünyesinde araştırmacı olarak görev yapmaktadır.

Rapor; SMR teknolojilerinin teknik temellerini, küresel ülke stratejilerini ve Türkiye'nin bu alandaki stratejik seçimlerini kapsamlı biçimde ele almakta; kısa, orta ve uzun vadeli politika önerileri içeren bir yol haritası sunmaktadır. Bu çalışma, nükleer enerji politikası alanında Türkçe yazında önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.