

**Küçük Modüler  
Reaktörler  
Bilgilendirme Notu**

Ekim 2022

## Hazırlayanlar

Berkay Örmeci – Kurumsal Finansman

Damla Özçelik Yanık – Finansal ve Teknik Danışmanlık

Orçun Yıldızca – Mühendislik

## İÇİNDEKİLER

Şekil Listesi .....	1
Tablo Listesi.....	1
Kısaltmalar .....	2
1. Yönetici Özeti.....	3
2. Küçük Modüler Reaktörler (SMR'ler) Hakkında Genel Bilgi.....	4
2.1.SMR'nin Tarihçesi .....	4
2.2.SMR Teknolojisi.....	4
2.3.SMR Yakıt Türü ve Dağılımı .....	7
2.4.SMR Santral Tipleri .....	8
3. Dünyada SMR Gelişmeleri .....	10
3.1.SMR Uygulamaları .....	10
3.2.SMR Finansmanı .....	13
4. Türkiye'de SMR Potansiyeli .....	16
4.1.SMR Potansiyelini Öne Çıkaran Ekonomik Faktörler .....	17
4.2.Enerji ve İklim Politikasına Dayalı Faktörler.....	18
5. Genel Değerlendirme.....	20

## Şekil Listesi

Şekil 1. Nükleer Filyon Tepkimesi.....	5
Şekil 2. Yüksek Sıcaklık SMR Örneği.....	6
Şekil 3. Yüksek Sıcaklık SMR Örneği.....	7
Şekil 4. SMR'nin Temel Ekonomik Etkenleri ve Büyük Ölçekli Nükleer Enerji Santralleri ile Karşılaştırılması .....	14

## Tablo Listesi

Tablo 1. Örnek Küresel SMR Projeleri.....	12
---	----

## Kısaltmalar

<b>AB</b>	Avrupa Birliği
<b>ABD</b>	Amerika Birleşik Devletleri
<b>Ar-Ge</b>	Araştırma-Geliştirme
<b>FLiBe</b>	Lityum-Berilyum Florür
<b>FNR</b>	Hızlı Nötron Spektrum Reaktörü
<b>GW</b>	Gigavat
<b>HTGR</b>	Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör
<b>HWR</b>	Ağır Su Reaktörü
<b>IAEA</b>	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
<b>IEA</b>	Uluslararası Enerji Ajansı
<b>JRC</b>	Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Konseyi
<b>kWh</b>	Kilovatsaat
<b>LFTR</b>	Sıvı Florür Toryum Reaktörü
<b>LWR</b>	Hafif Su Reaktörü
<b>MSR</b>	Ergimiş Tuz Reaktörü
<b>MW<sub>e</sub></b>	Megavat Elektrik
<b>MWh</b>	Megavatsaat
<b>SMR</b>	Küçük Modüler Reaktör
<b>SSCB</b>	Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
<b>TWh</b>	Teravatsaat
<b>WNA</b>	Dünya Nükleer Birliği

## 1. Yönetici Özeti

Küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi seviyelerin azami 2°C altında sınırlandırılmasına yönelik Paris Anlaşması hedefine ulaşabilmek için dünyanın tüm düşük karbonlu enerji kaynaklarından yararlanması gerekmektedir. Bu minvalde, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, nükleer enerji, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin ekonomik çıktılarının iyileştirilmesinde ve aynı zamanda ihtiyaç duyulan istikrarlı ve güvenilir enerji ihtiyacının sağlanmasında halen önemli bir rol oynamaktadır. Sürekli biçimde baz yük katkısı yapabilecek niteliğiyle nükleer güç santralleri pek çok ülke tarafından değerlendirilmektedir. Büyük hidroelektrik santrallerin bile baz yük katkısının süreklilik göstermemesi, kimi durumlarda orta yük ve pik yüklerle sınırlı kalması, fosil yakıtlara karşı alternatiflerin sayısını azaltmaktadır ve bu da kesintisiz elektrik arzında güvenli bir alternatif olarak nükleer santrallerin ön plana çıkmasına sebep olmaktadır.

Büyük ve konvansiyonel nükleer reaktörlerden farklı olarak küçük modüler reaktör (SMR) tasarımlarının çoğu, gelişmiş ve doğal güvenlik özelliklerini benimsemekle birlikte tek veya çok modüllü bir tesis olarak ilgili sahada konumlandırılabilir. Su soğutmalı reaktörler, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler, hızlı nötron spektrumlu, sıvı metal, sodyum ve gaz soğutmalı reaktörler, ergimiş tuz reaktörleri ve günümüzde geliştirilen mikro reaktörler gibi tüm ana reaktör modelleri için SMR'ler geliştirilmektedir. SMR'lerin geliştirilmesindeki temel itici güçler, daha geniş bir kullanıcı ve uygulama yelpazesi için esnek enerji üretimi ihtiyacını karşılamak, eskiyen fosil yakıtlı santrallerin yerini almak, nükleer güvenlik performansını artırmak ve daha ekonomik nükleer enerji kaynağı sunmak olarak öne çıkmaktadır.

Dünyada SMR'lerin tasarımı ve lisanslanmasına yönelik adımların 2030'lu yıllara gelindiğinde artması beklenmektedir. Türkiye'de de nükleer enerji üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi, yan hizmetlerin sağlanması ve farkındalığın artırılması gibi gelişmeler Akkuyu Nükleer Güç Santrali ile birlikte hız kazanmıştır. Bunun sonucu olarak, gelişmekte olan SMR pazarına yönelik gerek kamu tarafında gerekse özel sektörde gelişmeler takip edilmektedir.

Küresel lisanslama çalışmalarında önemli mesafelerin kat edilmesi ve sınanmışlık ilkesi çerçevesinde, halihazırda çerçeve anlaşmaları ve kapasite geliştirme çalışmalarıyla SMR'lere ilişkin ilgisi ve deneyimi artmakta olan Türkiye'de ilerleyen yıllarda SMR teknolojilerine yönelik somut adımların atılması gündeme gelebilecektir.

## 2. Küçük Modüler Reaktörler (SMR'ler) Hakkında Genel Bilgi

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), 1900'lü yıllarda yapılan ve işletme halinde olan mevcut reaktörler dahil olmak üzere, 300 MW<sub>e</sub> kurulu gücün altındaki reaktörleri "küçük" ve yaklaşık 700 MW<sub>e</sub>'a kadar kurulu gücü olan reaktörleri ise "orta" büyüklükte olarak tanımlamaktadır.<sup>1</sup> Dolayısıyla, bu iki terim IAEA tarafından küçük ve orta ölçekli reaktörler olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan "SMR", daha yaygın olarak, kısa inşaat süresi ve modüler tasarımlar da dikkate alınarak "Küçük Modüler Reaktör"ün kısaltması olarak da kullanılmaktadır. Bu tanım, Dünya Nükleer Birliği (WNA) ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Nükleer Enerji Enstitüsü tarafından da benzer yaklaşımlarla kullanılmaktadır.

İşbu bilgilendirme notu, SMR'lerin tarihsel gelişimini, teknolojik altyapısını, dünyadan çeşitli örnekleri ve Türkiye'deki gelişmeleri aktarmakta olup çeşitli ülkelerin karbonsuzlaşma hedeflerinde SMR'lerin nasıl bir rol üstleneceğine dair özet bilgiler içermektedir.

### 2.1. SMR'nin Tarihçesi

SMR'lerin çalışma prensibi bilindiği üzere nükleer enerjiye dayanmaktadır. 18. yüzyılın sonunda uranyumun keşfinin ardından 19. yüzyılın sonunda x-ışınlarının üretilmesiyle birlikte iyonize radyasyon keşfedilmiştir. 20. yüzyıla gelindiğinde ise Henri Becquerel uranyum-radyum karışımı olan maddenin alfa ve beta parçacıkları yaydığını tespit etmiş, bu olaya Marie Curie-Pierre Curie "radyoaktivite" adını vermiştir. Ardından yapılan çalışmalar ise fisyon reaksiyonu, yani çekirdek bölünmesi üzerine yoğunlaşmış olup plütonyum üretimi ve sonrasında nükleer fisyon zincir reaksiyonlara ilişkin önemli projeler yürütülmüştür.

Elektrik üretimi amaçlı ilk nükleer reaktör, 1954 yılında Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nde (SSCB) 5MW<sub>e</sub> kurulu gücüyle Moskova'da faaliyete geçmiştir.

Günümüzde devrim niteliğinde bir teknoloji olarak kabul edilmelerine rağmen SMR'ler, küresel nükleer enerji teknolojisi alanında yeni bir gelişme olarak karşımıza çıkmamaktadır. 1950'lerin sonlarından itibaren hafif su reaktörü (LWR) teknolojisine dayalı olarak geliştirilen ve kullanılan ilk ticari reaktörler, küçük nükleer denizaltı reaktörlerinin büyütülmüş versiyonlarıydı. Aynı dönemde, hükümetler tarafından güvenlik ve askeri amaçlar için çok çeşitli küçük reaktörler inşa edilmektedir.

Günümüze gelindiğinde ise, elektrik üretim amaçlı SMR'lerin tasarım süreçleri devam etmekte olup ticari olarak faaliyete geçen bir tesis bulunmamaktadır. Bu anlamda, nükleer reaktör üretiminde öncü olan pek çok ülkede araştırma ve tasarım geliştirme çalışmalarının ardından düzenleyici kuruluşlar tarafından lisanslama faaliyetlerinin tamamlanması beklenmektedir.

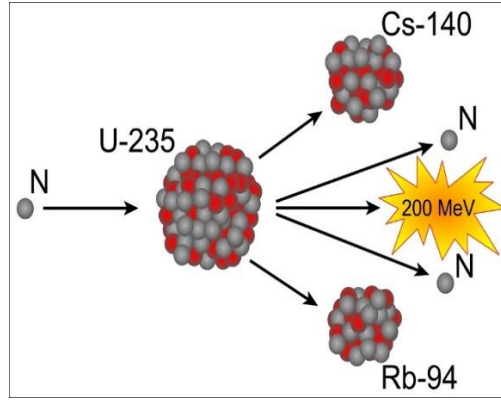
### 2.2. SMR Teknolojisi

SMR'lerde enerji üretimi temel olarak nükleer fisyonla dayanmaktadır. Nükleer fisyon, bir atom çekirdeğinin iki veya daha fazla miktardaki küçük ve hafif çekirdeğe bölünmesidir. Bölünen atom, ısı ve radyasyon olarak büyük miktarda enerji yaymaktadır. Bu durum, nükleer güç üretmek için sürdürülmesi

<sup>1</sup> IAEA (2021), "Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors", TECDOC-1972

gereken bir zincirleme reaksiyona neden olmaktadır. Nükleer fisyon tepkimesinde genel olarak uranyum ve plütonyum kullanılmaktadır.

Nükleer fisyon reaksiyonlarında, her bir fisyon olayı tarafından salınan serbest nötronlar, daha fazla reaksiyonu tetikleyebilmekte ve bu da daha fazla nötron salarak daha fazla fisyonu neden olmaktadır (Şekil 1). Bir fisyon zincir reaksiyonunu sürdürebilen kimyasal element izotoplarına nükleer yakıt adı verilmektedir. En yaygın nükleer yakıtlar Uranyum-235 ( $^{235}\text{U}$ ) ve Plütonyum-239 ( $^{239}\text{Pu}$ )'dur. Bunlar, uranyum ve plütonyumun kütle numaralarına bağlı ilgili izotoplarıdır. Bir nükleer reaktördeki fisyon olaylarının büyük çoğunluğu, bir önceki fisyon reaksiyonları tarafından üretilen nötronun başka bir parçacıkla bombardımanı tarafından oluşmaktadır. Bölünebilir yakıtlarda nükleer fisyon, bölünebilir bir çekirdeğin bir nötronu yakaladığı zaman üretilen nükleer eksitasyon (uyarma) enerjisinin sonucudur. Nötron yakalamasıyla oluşan bu enerji, nötron ve çekirdek arasında hareket eden çekici nükleer kuvvetten kaynaklanmaktadır.



Şekil 1. Nükleer Fisyon Tepkimesi

Kaynak: IAEA (2016)

Çoğu nükleer enerji santrali, tek geçişli soğutma sistemine<sup>2</sup> sahip olup yakıt döngüsünde zenginleştirilmiş uranyum içeren termal reaktörler kullanmaktadır. Nötronları absorbe eden atomların miktarı, bir zincirleme reaksiyonun artık sürdürülemeyeceği kadar büyük olduğunda (genellikle reaksiyonun başlangıcından 3 yıl sonra), yakıt çubukları sistemden çıkarılmaktadır. Daha sonra, uzun süreli depolamaya aktarılmadan önce kullanılmış yakıt, aynı alanda bulunan havuzlarda birkaç yıl soğutulmaktadır. Kullanılmış yakıt, hacim olarak düşük olmasına rağmen, yüksek seviyeli radyoaktivite içermektedir. Dolayısıyla, bozunma süresi yüzbinlerce yılı bulan bu atıkların biyosfer ile temas etmemesi gerekmektedir. Kullanılmış yakıtlar hala çoğunlukla bölünebilir malzeme içerdiğinden, bazı ülkeler (örneğin Fransa ve Rusya), kullanılmış yakıtı zenginleştirmekte ve zenginleştirilmiş yakıtın tekrar kullanılmasını sağlamaktadır. Fakat bu işlem, uranyum madenciliğinin ve uranyum kaynağını zenginleştirme işlemlerinin gelişmesiyle birlikte daha pahalı bir seçenek haline gelmiştir.

Reaktörlerde genel olarak tasarımlar, termal nötron reaktörlerini ve hızlı nötron reaktörlerini içermektedir. İkisi arasındaki fark, nötronların akış hızıdır. Termal-nötron reaktörleri, nötronların hareket

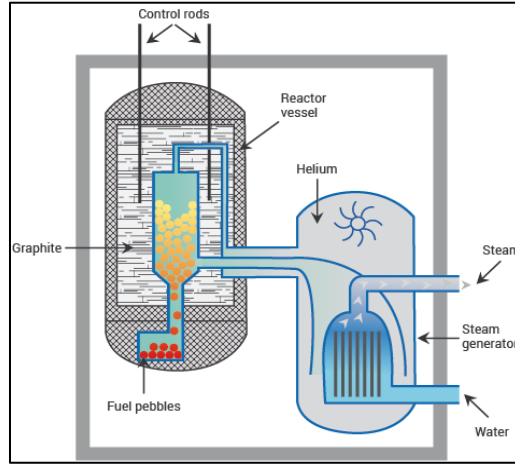
<sup>2</sup> Tek geçişli soğutma sistemi, bir nehirden, gölden veya okyanustan suyu almakta, sistemde soğutma amacıyla gerçekleştirilen termal operasyon sonrası oluşan buharı yoğunlaştırmak için suyu sistem içinde dolaştırmakta ve ardından su kaynağına geri deşarj etmektedir.

hızını yavaşlatmak için bir kontrol elemanına ihtiyaç duymakta ve bölünebilir malzeme olarak (yakıt) öncelikle uranyumu kullanmaktadır. Hızlı nötron reaktörleri ise kontrol elemanı kullanmamakta ve nükleer yakıtın daha yüksek hızlarda hareket eden nötronları absorbe edebilmesine dayanmaktadır. Hızlı nötron reaktörleri bölünebilir malzeme olarak genellikle plütonyum kullanmaktadır. Mevcut nükleer reaktörlerin çoğu termal-nötron yaklaşımını benimsemiştir.

Geleneksel nükleer reaktörler gibi SMR'ler de elektrik enerjisi üretmek için termal enerjiden yararlanmaktadır. Nükleer reaksiyon sonucu oluşan termal enerji, sistemden geçirilen suyu ısıtarak buhara dönüştürmekte ve oluşturulan buhar, türbine güç vererek elektrik enerjisinin üretilmesini sağlamaktadır.

Geleneksel reaktörlerde soğutucu olarak su kullanılırken, SMR'lerde soğutucu olarak su, sıvı metal, gaz ve ergimiş tuz kullanılmaktadır (Şekil 2). Soğutma sıvısının çeşidi, reaktör tipine, reaktör tasarımına ve seçilen reaktör uygulamasına göre belirlenmektedir. Büyük reaktörler, soğutucu olarak öncelikle hafif su kullanmakta ve bu yöntemin getirdiği tecrübe, sulu soğutma yönteminin SMR'lere kolayca uygulanmasına olanak tanımaktadır. Helyum, yüksek termal verimliliği ve yeterli miktarda reaktör ısı sağladığı için genellikle SMR'ler için gaz tipi soğutucu olarak değerlendirilmektedir. SMR'ler için sodyum, kurşun ve kurşun-bizmut, sıvı metal soğutucuları olarak tercih edilmektedir. SMR'lerin daha düşük soğutma suyu gereksinimlerinin olması, inşa edilebilecekleri yerlerin desalinasyon veya madencilik faaliyetlerinin bulunduğu bölgelere kurulabilmesine olanak tanımaktadır.

Dünya çapında yaklaşık 50 SMR tasarımı ve konsepti bulunmaktadır. Bunların çoğu gelişim aşamasında olup bazılarının kısa vadede kurulumunun yapılması hedeflenmektedir.



Şekil 2. Yüksek Sıcaklık SMR Örneği

Kaynak: WNA (2022)

Mart 2011'de Japonya'daki Fukushima Daiichi'de meydana gelen kaza, reaktör güvenliğine yeniden dikkat çekmiştir. Söz konusu kaza radyasyon salımı, yerleşim yerlerinin boşaltılması<sup>3</sup>, kirlenmiş mahsullerin ve yiyeceklerin önlem amaçlı yok edilmesi gibi sonuçlar doğurmuştur. Bu durum, güvenlik açığının asgari

<sup>3</sup> Yaklaşık 160.000 kişi yer değiştirmek zorunda kalmıştır.



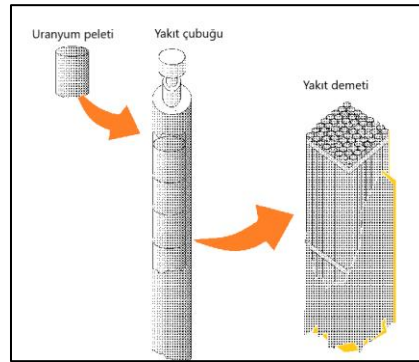
seviyeye indirilebileceği ve sistemin büyük reaktörlere göre daha fazla kontrol altında tutulabileceği SMR teknolojileri üzerine olan araştırmaların yoğunlaşması sürecini tetiklemiştir.

SMR'ler bağlamında "modüler" terimi, nükleer buhar tedarik sisteminin ana bileşenlerini bir fabrika ortamında üretmeyi ve kurulum noktasına nakletmeyi ifade etmektedir. Mevcut nükleer enerji santralleri, fabrikada üretilen bileşenleri (veya modülleri) tasarımlarına dahil etse de bu bileşenlerin montajı için büyük oranda santralin konumlandırılacağı lokasyonda saha çalışması gerekmektedir. SMR'lerin sınırlı "yerinde hazırlık" gerektirmesi ve daha büyük ünitelerde tipik olan uzun inşaat sürelerini önemli ölçüde azaltması öngörülmektedir. SMR'ler, nükleer güç santrallerine kıyasla tasarım kolaylığı, gelişmiş güvenlik özellikleri, fabrika üretiminin sağladığı ekonomik fayda, kalite ve daha fazla esneklik (finansman, yer belirleme, boyutlandırma ve son kullanım uygulamaları) gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca SMR'lerde enerji talebi arttıkça ilave modüllerin de kademeli olarak eklenmesi hususunda tasarım çalışmaları yapılmaktadır.

### 2.3. SMR Yakıt Türü ve Dağılımı

En yaygın nükleer yakıtlar  $^{235}\text{U}$  ve  $^{239}\text{Pu}$ 'dur. SMR'lerde de geleneksel nükleer güç santralleri ile aynı yakıt tipleri kullanılmakta olup yakıt gereksinimleri diğer nükleer güç santrallerine kıyasla azaltılmaktadır. SMR'lere dayalı enerji santralleri daha az yakıt takviyesi gerektirmektedir. Bazı SMR'ler, yakıt ikmali yapılmadan 30 yıla kadar çalışacak şekilde tasarlanmaktadır.<sup>4</sup>

Diğer nükleer güç santrallerinde olduğu gibi SMR'lerde de büyük çoğunlukla %5 civarında zenginleştirilmiş  $^{235}\text{U}$  yakıt olarak kullanılmaktadır. Zenginleştirilen yakıt genellikle uranyum dioksit ( $\text{UO}_2$ ) formunda bir toz olarak üretilmektedir. Toz daha sonra sıkıştırılmakta ve küçük seramik yakıt peletlerine dönüştürülmektedir. Peletler, yakıt çubukları oluşturmak için uzun metal tüplere istiflenmekte ve etrafı kapatılmaktadır. Yakıt çubukları daha sonra bir yakıt demeti oluşturmak için bir araya toplanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Uranyum Yakıt Gösterimi

Kaynak: University of North Carolina<sup>5</sup>

Günümüzde Toryum-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) izotopunun yakıt olarak kullanılmasına ilişkin araştırmalar da yapılmakta olup halihazırda bu izotopun bazı reaktör tiplerinde denendiği/kullanıldığı bilinmektedir. Ancak,  $^{232}\text{Th}$

<sup>4</sup> <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

<sup>5</sup> [http://fbaum.unc.edu/lobby/066\\_Nuclear\\_Repository/Agency\\_Activities/DOE/DOE\\_Spent\\_Nuclear\\_Fuel.htm](http://fbaum.unc.edu/lobby/066_Nuclear_Repository/Agency_Activities/DOE/DOE_Spent_Nuclear_Fuel.htm)

izotopunun tek başına nükleer fisyon reaksiyonu başlatması yeterli olmadığı için  $^{232}\text{Th}$  öncelikle reaksiyona girebilecek uranyum izotoplarına dönüştürülmektedir.  $^{232}\text{Th}$ 'nin avantajları arasında doğada uranyuma göre 3-4 kat daha fazla miktarda bulunması ve gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda, uranyum yakıtı nazaran daha az transuranik<sup>6</sup> elementlerin ve dolayısıyla transuranik atıkların oluşması bulunmaktadır.

Nükleer Enerji Ajansı (Nuclear Energy Agency, NEA) ve Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) tarafından 2021 yılı Mayıs ayında yayımlanan "SMR: Zorluklar ve Fırsatlar" raporuna<sup>7</sup> göre dünyada bilinen 6,2 milyon ton civarında toryum rezervi olduğu tahmin edilmektedir. 374 bin ton tahmini rezerv ile Türkiye, tüm ülkeler arasında 6. sırada yer almaktadır.

## 2.4. SMR Santral Tipleri

SMR'lerde kullanılan reaktör tipleri arasında

- Su soğutmalı reaktörler,
- Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler,
- Hızlı nötron spektrum (gaz, sodyum ve kurşun bizmut soğutmalı reaktörler),
- Ergimiş tuz reaktörleri,
- Mikro reaktörler,
- Diğer araştırma vb. amaçlı reaktörler

bulunmaktadır.

### Su Soğutmalı Reaktörler

LWR ve Ağır Su Reaktörleri (HWR)'nde soğutucu ve yavaşlatıcı olarak su (LWR için  $\text{H}_2\text{O}$ , HWR için  $\text{D}_2\text{O}$ ) kullanılmaktadır. Su soğutmalı reaktörler günümüzde çoğu geleneksel nükleer güç santralinde ve denizcilikte kullanılan reaktörlere benzer şekilde düşük teknolojik riske sahip reaktörler arasında bulunmaktadır. Çoğunlukla, altı yıldan fazla olmayan aralıklardaki yakıt ikmali ile %5'ten daha az  $^{235}\text{U}$  ile zenginleştirilmiş yakıt tüketmektedir.

### Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktörler

Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktörler (HTGR), dördüncü nesil olma özelliğine sahip olup ortalama 750-1.000°C sıcaklıkta çalışmaktadır. Soğutucu olarak helyum, kontrol elemanı olarak da grafit kullanılmaktadır. Çoklu modüller olarak üretime imkân tanımakla birlikte yakıt bloğu prizmatik şekle veya çakıl yataklı bir yapıya sahiptir. HTGR'lerde elektrik üretimine ek olarak, elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi, yüksek sıcaklıklarda çalışması sebebiyle kojenerasyon gibi ilave kullanım amaçları bulunmaktadır.

### Hızlı Nötron Spektrum Reaktörleri

Hızlı Nötron Spektrum Reaktörleri (FNR) hafif su türlerinden daha küçük ve basit olup daha iyi yakıt performansına (20 yıla kadar yakıt ikmali aralığı) sahip reaktörler arasında bulunmaktadır. Daha yüksek bir

<sup>6</sup> Atom numarası 92'den (yani uranyumun atom numarasından) yüksek olan elementlere verilen isimdir. Bu elementlerin hiçbiri doğal olarak bulunmamaktadır ve hepsi kararsız haldedir.

<sup>7</sup> [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_15004](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15004)

nötron akışına sahip olan FNR'lerde sodyum, kurşun veya kurşun-bizmut gibi yüksek iletkenlik ve kaynama noktasına sahip sıvı metal ile soğutma sağlanmaktadır. Pasif güvenlik özellikleri olan FNR'ler atmosfer basıncında çalışmaktadır. Yakıtlar çoğunlukla %15-20 oranında zenginleştirilmektedir.

### **Ergimiş Tuz Reaktörleri**

Ergimiş Tuz Reaktörleri (MSR) çoğunlukla düşük basınçta birincil soğutucu olarak erimiş florür tuzları kullanmaktadır. Lityum-berilyum florür ve lityum florür tuzları, 150 bar basınç altında, yaklaşık 315°C'de çalışan basınçlı su reaktörlerin aksine 1.400°C'ye kadar basınç uygulanmadan sıvı halde kalabilmektedir. Hızlı spektrumlu MSR'ler, soğutma sıvısı olarak klorür tuzu kullanmaktadır. HTR'lerde olduğu gibi bazı tasarımlarda yakıt, çakıl yataklı yapıya sahip olabilmektedir.

MSR'lerde yakıt olarak toryumun kullanılması da söz konusu olup kullanımına yönelik ilave çalışmalar dünya genelinde yaygınlaşmaktadır. Sıvı Florür Toryum Reaktörü (LFTR),  $^{233}\text{U}$  yakıtını toryum florür ve lityum-berilyum florür (FLiBe) tuzu örtüsünden üreten bir MSR tasarımı olarak bilinmektedir.  $^{233}\text{U}$  tuzunun reaktör çekirdeğinde fisyonlanması sırasında salınan nötronların bir kısmı, tuz örtüsündeki toryum tarafından emilmektedir. Ortaya çıkan  $^{233}\text{U}$ , tuz örtüsünden ayrılmakta ve FLiBe'de sıvı çekirdek yakıtı olmaktadır.

### **Mikro Reaktörler**

Genellikle 10 megavat (MW) kurulu gücün altındaki reaktörler bu sınıfta değerlendirilmektedir. Soğutma ve reaktör teknolojisinde HTGR, MSR gibi teknolojiler öne çıkmaktadır. En az %4 oranında zenginleştirilmiş yakıt kullanılmakla birlikte bu reaktörler uzun süre boyunca yakıt ikmali yapılmadan işletme olanağı sunmaktadır.

### 3. Dünyada SMR Gelişmeleri

Küresel elektrik arz güvenliğinin sağlanması ve ülkelerin emisyon hedefleri doğrultusunda karbonsuz baz yük katkısı sunan santraller önem kazanmaktadır. Hızla gelişen yenilenebilir enerji teknolojileri küresel talebi karşılamada henüz yetersiz kalmakta ve fosil yakıtlı baz yük santrallerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dünya enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik düşük karbonlu/karbonsuz yeni nesil teknolojilere yönelik yatırımlar yapılmakta ve araştırma-geliştirme (Ar-Ge) çalışmaları sürmektedir. Nükleer enerji tarafında ise yeni nesil teknolojiler alanında öne çıkan SMR'lere yönelik çalışmalar dikkat çekmektedir. 10 ile 300 MW arasında değişen elektrik üretim kapasitesine sahip nükleer reaktörler şeklinde tanımlanan SMR'ler, sektör oyuncuları tarafından oldukça düşük sera gazı emisyonuna yol açan güvenilir/baz yük enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu alanda halihazırda yapılmış yatırımlar mevcuttur ve bazı ülkelerin emisyon hedefleri doğrultusunda söz konusu yatırımlara yönelik uzun dönemli adımlar attığı görülmektedir.

#### 3.1. SMR Uygulamaları

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından 2021 yılı Kasım ayında yayımlanan "Nükleer Güç-Analiz"<sup>8</sup> raporunda net sıfır hedeflerine ulaşılabilmesi için 2020-2050 yılları arasında yıllık ortalama 20 GW'lık yeni nükleer enerji kapasitesinin devreye girmesinin gerektiği vurgulanmıştır. İlgili raporda 2020'nin sonunda 59 GW'lık yeni nükleer enerji kapasitesinin inşa halinde olmasına rağmen, yeni projelerin tamamlanma oranı değerlendirildiğinde hedefe ulaşılması için gereken kurulu gücün yalnızca yarısının gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir. Raporda, 2030'ların başında SMR'lerin lisanslama ve tamamlanma oranlarında ilerleme kaydedilmesinin önemine değinilmiş olup bu reaktörlerin kömürün yerini alma ve aynı zamanda şebekeden uzak bölgelere elektrik sağlayan bir dizi elektrik ve elektrik dışı uygulama sağlanmasının beklendiği belirtilmiştir.

SMR'lere yönelik yatırımlar ile Ar-Ge çalışmaları devam etmekte ve dünya çapında SMR'lere ilgi artarak sürmektedir. Nükleer enerji santrallerinin yerleşik olduğu Kanada ve ABD'nin yanı sıra Avrupa, Orta Doğu, Afrika ve Güneydoğu Asya'da da bu alanda çalışmalar yapılmaktadır. Son dönemdeki gelişmelere bakıldığında özellikle yüzer SMR yatırımlarının yaygın olduğu görülmektedir. Dünya genelinde öne çıkan bazı ülke gelişmeleri aşağıda aktarılmaktadır.<sup>9</sup>

**Kanada** 2018 yılı Aralık ayında SMR Yol Haritasını belirlemiş ve bunu takiben 2020 yılında yurt içinde ve yurt dışında SMR'lerin geliştirilmesi, uygulanması, tanıtılması ve dağıtılması için sonraki adımları ortaya koyan SMR Eylem Planı'nı yayımlamıştır. SMR alanında faaliyet gösterecek yatırımcıları destekleyeceğini duyuran Kanada, 2020 İklim Planı'nda da 2018 SMR Yol Haritası'nı temel alarak ülkenin uzun vadeli iklim hedeflerine ulaşması amacıyla nükleer enerjiyi desteklediğini açıklamıştır. 2021 yılı Mart ayında Kanada, Moltex Energy'nin Atlantik Kanada'da SMR'ler geliştirmesi için 56 milyon Kanada doları finansman sağladığını duyurmuştur.

<sup>8</sup> IEA (2021). " Nuclear Power – Analysis", <https://www.iea.org/reports/nuclear-power>

<sup>9</sup> <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

**ABD** tarafından nükleer enerji temiz enerji kaynağı olarak nitelendirilmiştir. ABD Enerji Bakanlığı (“Bakanlık”) tarafından 2012 yılı Ocak ayında LWR tasarımına yönelik yatırımcılara çağrıda bulunulmuş ve SMR lisanslama teknik desteği aracılığıyla 5 yılda 452 milyon dolar fon ayrılmıştır. Bakanlık tarafından 4 farklı başvuru içerisinde Babcock & Wilcox’un 180 MW<sub>e</sub> mPower tasarımı kapsamındaki başvurusu kabul edilmiş, yatırım süresince firmaya 2014 yılına kadar 111 milyon dolar seviyesinde fon sağlanmış ve daha sonra firmanın yatırımı ertelemesi üzerinde fon aktarımı da sonlandırılmıştır. Firma tarafında ise 2016 yılı Şubat ayına kadar yapılan toplam harcama 375 milyon doları aşmıştır. Mart 2012’de Bakanlık; Hyperion (Gen4 Energy) 25 MW<sub>e</sub> hızlı reaktör projesi, Holtec 160 MW<sub>e</sub> basınçlı su reaktörü projesi, ve NuScale 45 MW<sub>e</sub> basınçlı su reaktörü projesinin (önce 60 MW<sub>e</sub>’a, sonra da 77 MW<sub>e</sub>’a yükseltilmiştir) inşasına yönelik olarak firmalarla arazi temini konusunda anlaşma sağlamıştır. Mart 2013’te ise Bakanlık ikinci tur finansman için başvuru çağrısında bulunmuş ve başvurular Westinghouse, Holtec, NuScale, General Atomics ve Hybrid Power Technologies tarafından yapılmıştır. Aralık 2013’te ise NuScale’e başlangıçta %50-50 maliyet payı temelinde 45 MW<sub>e</sub>’lık reaktörün tasarım geliştirmesi, sertifikasyon ve lisanslama işlemleri kapsamında 217 milyon dolar destek sağlanacağı duyurulmuştur. Tasarım daha sonra önce 60 MW<sub>e</sub>’a, sonra da 77 MW<sub>e</sub>’a yükseltilmiştir. 2013’ün ortalarında NuScale, SMR sürecinin yönetilmesi ve takip edilmesi için Batı Nükleer Girişimi’ni kurmuştur. SMR tasarımı ABD tarafından onaylanan ilk şirket olan NuScale tarafından, 2029 yılı ilk SMR enerji santralini kurulması için hedef yıl olarak belirlenmiştir.

2016’nın başlarında, SMR’ler için geliştiriciler ve potansiyel müşteriler, SMR reaktör tasarımlarının ticarileştirilmesine yönelik çalışmaların yürütülmesi amacıyla SMR Start konsorsiyumunu kurmuştur. Konsorsiyum üyeleri arasında Bechtel, BWX Technologies, Dominion, Duke Energy, Energy Northwest, Fluor, GE Hitachi Nuclear Energy, Holtec, NuScale, Ontario Power, PSEG Nuclear, Southern Nuclear, Tennessee Valley Authority ve Utah Associated Municipal Power Systems yer almıştır. Bunun yanı sıra ABD tarafından 9 Mart 2020 tarihinde uzak bölgelerdeki Amerikan üsleri ve tesislerinin içine kurulması planlanan yenilikçi küçük modüler reaktör tasarımları için 39,7 milyon dolar nükleer elektrik fonu ayrıldığı duyurulmuştur. Bahsi geçen mikro nükleer reaktör sistemlerinin kara yolu, demir yolu, deniz yolu ve hava yolu ile kolayca nakledilebileceği açıklanmıştır.

Halihazırda SMR alanında özel şirketler ve ABD Enerji Bakanlığı tarafından yaklaşık 1 milyar doların üzerinde yatırım yapıldığı belirtilmiştir.

**Rusya**, 2020 yılı Mayıs ayında ülkenin en kuzey bölgelerinden biri olan Çukotka’da “Akademik Lomonosov” adlı dünyanın ilk yüzer 35 MW<sub>e</sub> kapasiteli iki SMR’den oluşan nükleer güç santralini faaliyete geçirmiştir.<sup>10</sup> 2021 yılında ise Rusya’nın Uzak Doğu’daki madencilik endüstrilerine enerji sağlamak için bir yüzer SMR filosu inşa etme planları onaylanmıştır.

**Çin**, 13 Temmuz 2021 tarihinde ülkenin güneyindeki ada eyaleti Hainan’da, dünyanın kara üzerindeki ilk ticari SMR inşasına başlamıştır. Proje tamamen Çin Ulusal Nükleer Şirketi tarafından geliştirilmiş olup reaktörün inşasının yaklaşık 5 yıl süreceği ve üretiminin yıllık 1 milyon megavatsaat seviyelerinde olacağı öngörülmüştür. Bahsi geçen 125 MW<sub>e</sub> Linglong One reaktörü; elektrik üretimi, kentsel ısıtma, kentsel soğutma, endüstriyel buhar üretimi ve deniz suyunun tuzdan arındırılması için tasarlanmıştır.

<sup>10</sup> <https://rosatomnewsletter.com/tr/2020/06/29/fnpp-in-operation/>

Çin, 2021 yılı Aralık ayında ilk SMR'sini elektrik şebekesine bağlamıştır. Çin Nükleer Enerji Derneği tarafından China Huaneng Group Co.'nun Shidao Körfezi'ndeki 200 MW<sub>e</sub>'lık Ünite 1'in Shandong eyaletindeki şebekeyi beslediği açıklanmış olup Ünite 2'nin mevcut durumda test aşamasında olduğu ve 2022 yılının ortasında devreye alınacağı duyurulmuştur.

**İngiltere**, 2020 yılında yayınladığı "Energy White Paper"<sup>11</sup> ile 2050 iklim hedeflerine ulaşmada nükleer enerjinin rolünü vurgulamıştır. İlgili dokümanda bu doğrultuda SMR yatırımlarına yönelik destek sağlanacağını belirten İngiltere, nükleer enerji kapasitesini 2050 yılına kadar 40 GW'a yükseltmeyi planladığını açıklamıştır.

Rolls-Royce liderliğindeki bir konsorsiyum 2020 yılı Kasım ayında Birleşik Krallık'ta 16 SMR kurma planını açıklamıştır.<sup>12</sup> 2019 yılında küçük modüler reaktör konseptini geliştirmek amacıyla yaklaşık 18 milyon sterlin seviyesinde fon alan firma, proje kapsamında yer alan her küçük modüler reaktörün 440 MW olmasını beklediğini ifade etmiştir. Konsorsiyum tarafından, ilk modüler nükleer enerji santralinin 10 yıl içinde hayata geçebileceği ve o tarihten itibaren her yıl iki mini santral kurulabileceği açıklanmıştır. Ayrıca, genel yapıda konsorsiyum, geleneksel büyük nükleer güç santrallerinin aksine çok sayıda küçük santral kurmanın kurulum masrafının daha düşük olduğunu savunmuştur.

**Belçika**, nükleer enerji teknolojisine yatırım yapmaya devam ederken, 2025 yılına kadar ülkedeki nükleer reaktörleri kapatmaya karar verdiğini duyurmuştur. Belçika, daha küçük modüler reaktörlere odaklanarak dört yıl boyunca nükleer enerji teknolojisi araştırmalarına 100 milyon euro yatırım yapmayı planlamaktadır.

**Fransa**'daki bir konsorsiyum tarafından 2019 yılı Eylül ayında IAEA Genel Konferansı'nda her biri 170 MW kapasitesinde toplam 340 MW'lık LWR tasarımının geliştirildiği açıklanmıştır.

Bunların yanı sıra Arjantin ve Güney Kore gibi diğer bazı ülkeler de SMR teknolojileri geliştirmektedir. Polonya, Endonezya ve Ürdün gibi ülkeler ise yüksek sıcaklık reaktörlerinin geliştirilmesi için fizibilite çalışmalarını sürdürmektedir. Suudi Arabistan ayrıca SMR'leri kullanarak desalinasyon üzerine çalışmalar yürütmektedir.<sup>13</sup>

WNA tarafından SMR projelerinin bir kısmı aşağıdaki gibi özetlenmektedir. Bunların yanı sıra erken aşamada ve gelişim aşamasında farklı projeler de bulunmaktadır.<sup>14</sup>

Tablo 1. Örnek Küresel SMR Projeleri

İsim	Kapasite (MW <sub>e</sub> )	Tür	Yatırımcı
<b>Faaliyetteki Mini Reaktörler</b>			
CNP-300	300	Basınçlı Su Reaktörü	SNERDI/CNNC, Pakistan & Çin
PHWR-220	220	Basınçlı Ağır Su Reaktörü	NPCIL, Hindistan
EGP-6	11	Hafif Su Grafit Reaktörü	Sibirya
KLT-40S	35	Basınçlı Su Reaktörü	OKBM, Rusya

<sup>11</sup>[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/945899/201216\\_BEIS\\_E\\_WP\\_Command\\_Paper\\_Accessible.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/945899/201216_BEIS_E_WP_Command_Paper_Accessible.pdf)

<sup>12</sup> <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-54912624>

<sup>13</sup> IEA (2021). "Nuclear Power – Analysis", <https://www.iea.org/reports/nuclear-power>

<sup>14</sup> <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

İsim	Kapasite (MW <sub>e</sub> )	Tür	Yatırımcı
RITM-200	50	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	OKBM, Rusya
<b>İnşaa Aşamasındaki Mini Reaktör Tasarımları</b>			
CAREM25	27	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	CNEA & INVAP, Arjantin
HTR-PM	210	İkiz Yüksek Sıcaklık Reaktörü	INET,CNEC & Huaneng, Çin
ACP100/Linglong One	125	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	CNNC, Çin
BREST	300	Kurşun Hızlı Nötron Reaktörü	RDİPE, Rusya
<b>Gelişen Mini Reaktörler</b>			
VBER-300	300	Basınçlı Su Reaktörü	OKBM, Rusya
NuScale Power Module	77	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	NuScale Power + Fluor, ABD
SMR-160	160	Basınçlı Su Reaktörü	Holtec, ABD + SNC-Lavalin, Kanada
SMART	100	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	KAERI, Güney Kore
BWRX-300	300	Kaynar Su Reaktörü	GE Hitachi, ABD
PRISM	311	Sodyum Hızlı Nötron Reaktörü	GE Hitachi, ABD
Natrium	345	Sodyum Hızlı Nötron Reaktörü	TerraPower + GE Hitachi, ABD
ARC-100	100	Sodyum Hızlı Nötron Reaktörü	ARC + GE Hitachi, ABD
Integral MSR	192	Ergimiş Tuz Reaktörü	Terrestrial Energy, Kanada
Seaborg CMSR	100	Ergimiş Tuz Reaktörü	Seaborg, Danimarka
Hermes prototype	35	Ergimiş Tuz Reaktörü-Triso	Kairos, ABD
RITM-200M	50	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	OKBM, Rusya
RITM-200N	55	Entegre Basınçlı Su Reaktörü	OKBM, Rusya
BANDI-60S	60	Basınçlı Su Reaktörü	Kepeco, Güney Kore
Xe-100	80	Yüksek Sıcaklık Reaktörü	X-energy, ABD
ACPR50S	60	Basınçlı Su Reaktörü	CGN, Çin
Moltex SSR-W	300	Ergimiş Tuz Reaktörü	Moltex, İngiltere

Kaynak: WNA, TSKB EÇG

Küresel SMR pazarı 2020 yılında 3,5 milyar dolar büyüklüğünde iken 2021 yılında 4,1 milyar dolar seviyesine ulaşmıştır.<sup>15</sup> Report Ocean ve Allied Market Research gibi araştırma firmaları tarafından SMR pazarı büyüklüğünün 2030 yılında 18,8 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Özellikle Asya Pasifik bölgesindeki SMR pazar büyümesinin daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Kullanım alanlarını tuzdan arındırma, enerji üretimi ve süreç ısısı olarak sınıflandıran ilgili araştırma firmaları tarafından enerji üretimi amaçlı kullanımın sektörde en yüksek paya sahip olmaya devam edeceği ve 2030 yılına kadar en yüksek yıllık bileşik büyümeyi sergileyeceği belirtilmektedir. Pazarda Brookfield, Fluor Corporation, General Atomics, General Electric, Holtec International, Mitsubishi Heavy Industries, Rolls Royce Plc., TerraPower LLC, Terrestrial Energy, X Energy LLC gibi firmalar öne çıkmaktadır.

### 3.2. SMR Finansmanı

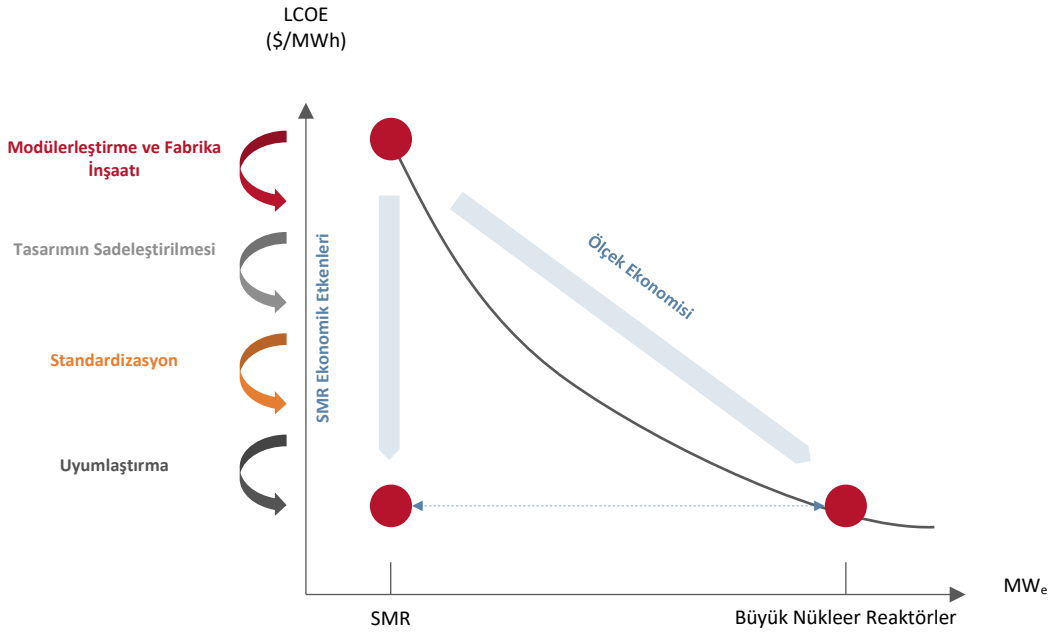
NEA ve OECD tarafından 2021 yılı Mayıs ayında yayımlanan “SMR: Zorluklar ve Fırsatlar” raporunda<sup>16</sup>, reaktör dizaynlarının genel olarak ölçek ekonomisinin avantajlarından yararlanabilmek için yüksek kurulu güçlere göre yapıldığı, ancak buna karşılık SMR’lerde ölçek ekonomisi sağlanamasa da bunu dengelemek ve rekabet gücünü artırmak için üretim artırılırken marjinal maliyette düşüşü sağlayan tasarım sadeleştirilmesi, standardizasyon ve modülerleştirme gibi maliyet etkenlerini baz alan seri üretim ekonomisinin oluşturulduğu vurgulanmıştır. Söz konusu raporda SMR rekabet gücünü belirleyen

<sup>15</sup> <https://www.bloomberg.com/press-releases/2021-12-10/small-modular-reactor-market-size-to-reach-usd-18-8-billion-by-2030-at-cagr-15-8-valuation-reports>

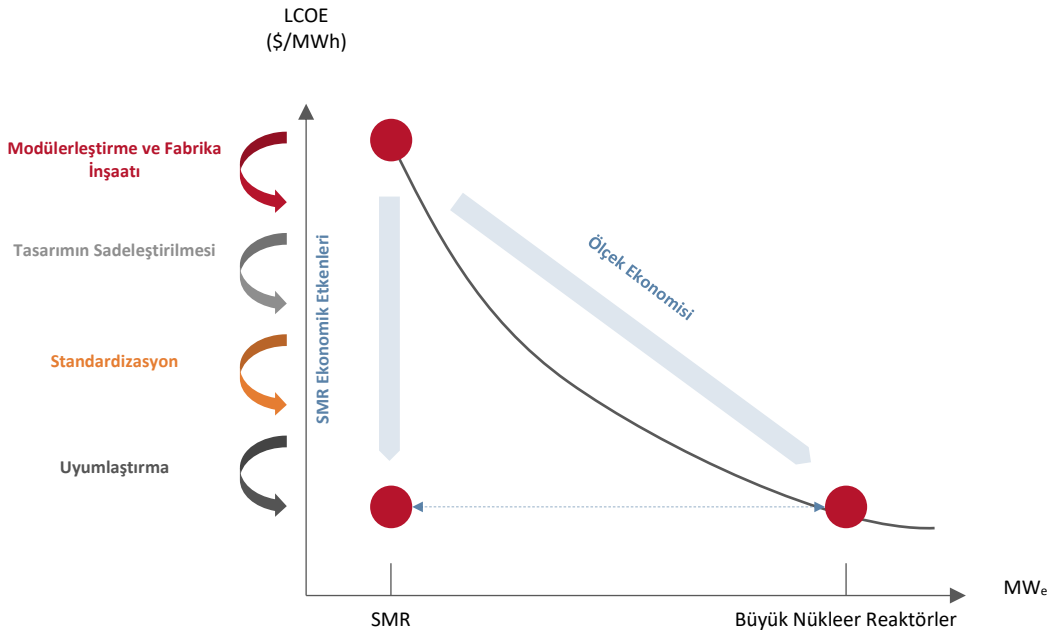
<sup>16</sup> Nükleer Enerji Ajansı & OECD (2021). Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true)

ekonomik

etkenler



Şekil 4'te özetlenmiştir.



Şekil 4. SMR'nin Temel Ekonomik Etkenleri ve Büyük Ölçekli Nükleer Enerji Santralleri ile Karşılaştırılması

Kaynak: NEA, TSKB EÇG

Finansal açıdan değerlendirildiğinde, geleneksel nükleer enerji santrallerine kıyasla (i) daha düşük sermaye ihtiyacının olması nedeniyle satın alınabilirliğinin daha yüksek olması ve daha az sermaye riski taşıması, (ii)



daha kısa inşaat ve geri ödeme sürelerinin olması, (iii) yeni modül eklenmesi ve kademeli olarak devreye alınabilmesi yönünden ölçeklendirilebilir olması ve (iv) kademeli olarak modül eklenebilmesi sonucu yatırımcıların elektrik talebi ve finansman koşullarına uygun şekilde portföyünü yönetebilmesine imkan sağlaması gibi nedenlerle SMR'ler yatırımcılar tarafından ilgi çekmektedir.

Nükleer Ekonomisi Danışmanlık Grubu tarafından SMR yatırımlarının finansmanına yönelik farklı finansman mekanizmaları incelenmiştir.<sup>17</sup> Uluslararası finansman sistemi yoluyla bankalar tarafından uzun vadeli kredi temini veya tahvil ihracı yoluyla finansman sağlanması SMR projelerinin finansmanına yönelik ilk mekanizma olarak değerlendirilmiştir. SMR projelerine yönelik özel sektör yatırımlarının artmasında kamu desteğinin önemli olacağı belirtilmiş ve bu nedenle Ar-Ge, tasarım ve lisanslama aşamalarında destek verilmesi, inşaat riskinin paylaşılması, garantili gelir sunulması, özel teşvikler ve finansman niteliğinde fon temini gibi doğrudan ve dolaylı kamu desteklerinin sağlanması projelerin finansmanında öne çıkan bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

Dünya genelinde SMR yatırımları için kamu ve özel sektör iş birlikleri önem arz etmektedir. Bazı ülkelerde net sıfır hedefleri doğrultusunda nükleer enerji yatırımlarının önemi vurgulanmakta, bu alanda öne çıkan SMR'ler için finansal desteğin sağlanacağına dair açıklamalar bulunmaktadır. Özellikle Ar-Ge aşamalarında kamu tarafından sağlanan fonlar özel sektör yatırımcılarının bu alandaki yatırımlarını destekler nitelikte olmaktadır. Uluslararası iş birliklerinin SMR finansmanında önemli bir rol oynadığı değerlendirilmektedir. Dünya genelinde küçük şirketler de dahil olmak üzere çok sayıda özel yatırımla SMR gelişimi devam etmektedir. Bu yeni yatırımcıların piyasaya dahil olması kamu tarafından yönetilen ve finanse edilen Ar-Ge çalışmalarının özel sektör destekli yatırımlara dönüşmesinde etkili olmaktadır.

---

<sup>17</sup> Nükleer Ekonomisi Danışmanlık Grubu (2019). SMR Projects Financing Options: conditions and possibilities. <https://nuclear-economics.com/wp-content/uploads/2019/10/2019-09-26-Pehuet-Financing-SMRs.pdf>

## 4. Türkiye’de SMR Potansiyeli

Özellikle son on beş yıldır Türkiye’nin enerji gündeminde ön sıralarda yer alan nükleer güç santralleri için ilk somut adım atıldığı Mayıs 2010’dan bu yana ciddi bir mesafe kat edilmiştir. İlk olarak Akkuyu Nükleer Güç Santrali (“Akkuyu” veya “Akkuyu NGS”) için 12 Mayıs 2010 tarihinde Ankara’da imzalanan “Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Rusya Federasyonu Hükümeti Arasında Türkiye Cumhuriyeti’nde Akkuyu Sahası’nda Bir Nükleer Güç Santralinin Tesisine ve İşletimine Dair İşbirliğine İlişkin Anlaşma” ile başlayan süreç<sup>18</sup>, devamında Japonya ve Fransa ile Sinop’ta ikinci bir nükleer güç santrali inşası için yapılan görüşmeler ile devam etmiştir. 2015 yılında ise, İğneada’da üçüncü bir santral için çalışmalara başlandığı ve inşası için Çin ve ABD’li şirketler ile ön görüşmeler yapıldığı ifade edilmiştir. Sonraki süreçte Sinop NGS için girişimler akim kalmıştır ve proje bir süreliğine rafa kaldırılmıştır. İğneada seçeneği ise şimdilik zadece zemin etütleri açısından değerlendirilmektedir.

Temeli 2018’de atılan Akkuyu NGS’de çalışmalar halihazırda devam etmektedir. Santralde 2023’e kadar ilk ünitenin tamamlanıp enerji üretimini başlatmak Türk ve Rus hükümetlerinin önemli hedefleri arasında yer almaktadır. Akkuyu’da yapılacak santral, 1.200 MW gücünde 4 reaktörü içerecek ve toplam 4.800 MW kurulu güce sahip olacaktır.

SMR’lerin beraberinde getirdiği maliyet ve mobilite avantajları Türkiye’de nükleer enerji kullanımının yaygınlaşması açısından çeşitli olanaklar sunmaktadır. Bir nükleer enerji santralının planlanması ve kurulması arasında geçen sürenin ortalama 10 yıl (ilk kez NGS kurulan ülkelerde ise çok daha uzun) olduğu dikkate alındığında, benzer üretim verimliliğine sahip ve daha hızlı yaygınlaşabilecek SMR’lerin uygun hukuki ve ekonomik altyapının oluşması durumunda Türkiye için ciddi bir seçenek olabileceğini söylemek mümkündür.

Türkiye’de aynı zamanda özel sektör ve enerji bürokrasisinde SMR’ler için altyapı çalışmalarına başlanmıştır. Akkuyu NGS’nin inşaatının başlamasının ardından SMR geliştirme ve üretme konusunda ilk adım atılmıştır. Mayıs 2020’de kamu şirketi EUAS International ICC ile İngiliz şirketi Rolls-Royce arasında, SMR’lerin Türkiye’de teknik, ekonomik ve hukuki uygulanabilirliği ve üretim imkanlarını değerlendirmek üzere mutabakat zaptı imzalanmıştır.

Rolls-Royce, Ocak 2020’de İngiltere’de 2029’a kadar elektrik üretimi için küçük modüler reaktörler üretip işletmeyi planladığını açıklamış, 2029’a kadar 10-15 nükleer güç santrali üretme kapasitesine sahip olduğunu belirtmiştir. Kasım 2021’de Rolls-Royce, 210 milyon sterlinlik devlet hibesi ve özel firmalardan aldığı 195 milyon sterlinlik finansmanla SMR üreteceğini duyurmuştur.<sup>19</sup> Bahse konu her bir santralin kurulu gücünün 470 MW (%90’ın üzerindeki kapasite kullanım oranıyla yaklaşık 440 MWe) olması ve 10

<sup>18</sup> <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/10/20101006-6.htm>

<sup>19</sup> <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/08-11-2021-rr-announces-funding-secured-for-small-modular-reactors.aspx>

dönümlük arazilerde 1,5 dönümlük kapalı alan gerektirmesi öngörülmüştür.<sup>20,21</sup> Bu, İngiltere'nin Somerset bölgesinde şu anda inşaatı süren Hinkley Point NGS'nin kaplayacağı alanın 16'da birine denk gelmektedir.<sup>22</sup>

Benzer şekilde, Türkiye'de sanayicilerin de SMR'ler üzerine çalıştığı bilinmektedir. Ankara Sanayi Odası, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve TÜBİTAK'ın da desteğiyle, FİGES Mühendislik ile birlikte nükleer teknoloji alanında uranyum yerine toryum ile çalışan SMR prototipini üretmek için çalışmalara başlandığı Mayıs 2021 tarihinde duyurulmuştur.<sup>23</sup>

SMR'lerin hukuki olarak hangi çerçevede değerlendirileceği ve bu kapsamda hangi uluslararası nükleer anlaşmaların sorumlulukları altında ele alınacağı tartışılan bir husustur. Literatürde SMR'lerin uluslararası nükleer sorumluluk sözleşmeleri kapsamında olduğu kabul edilse de yüzer/taşınabilir nükleer enerji santrallerine ilişkin olarak ayrı bir değerlendirme yapılması gerektiği ileri sürülmektedir. Bu da mevcut uluslararası nükleer sözleşmelerin SMR'ye ilişkin yeni teknoloji ve kavramlara uygun hale getirilmesi gerekeceğine işaret etmektedir. Örneğin, geleneksel nükleer güç santrallerini esas alan lisanslama çerçevelerinin yeni teknoloji SMR'lere uygun hale getirilmesi gerekmektedir.<sup>24</sup>

Türkiye'nin bu alanda küçük modüler reaktör üretebilmesi veya kurulumunu yapması için öncelikli olarak devletin uluslararası deklarasyonda bulunması ve Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Antlaşması'na uyum sağlandığını taahhüt etmesi gerekmektedir. Bu durumda, uluslararası hukuk ve diplomasinin gerekli SMR altyapısının oluşması için belirleyici öneme sahip olduğunu söylemek mümkündür.<sup>25</sup>

Bahsedildiği üzere çeşitli ülkelerde henüz tasarım, lisanslama veya inşaat aşamasında olan SMR teknolojisindeki temel sorun, her ne kadar geleneksel nükleer güç santralleri ile benzer çalışma koşullarına ve yakıt düzenlemelerine sahip olsa da uygulamadaki deneyim eksikliğidir. Bu da güvenliğe ilişkin (sınanmışlık ilkesi) onay sürecini zorlaştırabilecektir. Dolayısıyla, SMR'lerin gelişimini destekleyecek bir lisanslama politikası ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Tüm bu gelişmeler, Türkiye'de SMR'nin kullanımı ve yaygınlaşması için ilk adımların atılmış olduğunu ve gerek kamu gerek özel sektörde bu alanla ilgili bir farkındalığın var olduğunu göstermektedir. Bu süreçte dünyada ve Türkiye'de öne çıkan ekonomik trendlerin ve sürdürülebilirlik odaklı politikaların SMR'lerin Türkiye'deki potansiyelini etkileyeceğini öngörmek mümkündür.

#### 4.1. SMR Potansiyelini Öne Çıkaran Ekonomik Faktörler

SMR potansiyelini öne çıkaran ekonomik faktörlerin başında, içerisinde bulunduğumuz enerji krizi ve artan doğal gaz fiyatlarının yeni kaynaklara yönelmeyi gerektirmesi gelmektedir.

<sup>20</sup> <https://www.forbes.com/sites/robertbryce/2022/05/27/rolls-royces-smr-needs-10000-times-less-land-than-wind-energy-proves-iron-law-of-power-density/?sh=7fbd08ec98f0>

<sup>21</sup> <https://www.power-technology.com/news/rolls-royce-leads-consortium-to-build-small-nuclear-reactors-in-the-uk/>

<sup>22</sup> <https://www.bbc.com/news/business-51233444>

<sup>23</sup> <https://www.dunya.com/sirketler/4-nesil-nukleerde-aso-ocnu-guc-odu-haberi-621463>

<sup>24</sup> Nükleer Enerji Ajansı & OECD (2021). Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true)

<sup>25</sup> <https://www.mfa.gov.tr>

COVID-19 salgınının neden olduğu ekonomik daralma sonucu etkilenen küresel hasıla, 2020 yılının ikinci yarısında uygulanan destekleyici para ve maliye politikaları sayesinde 2021 yılında salgın öncesindeki seviyesine dönmüştür. 2021 yılında canlanan ekonomik faaliyetlerden dolayı, küresel enerji talebi artmış ve enerji piyasalarında hareketlilik söz konusu olmuştur. Enerji sektörünün birden artan talebe uyum göstermekte zorlanması sonucu nihai arz yetersiz kalmıştır. Birincil enerji hammaddelerine olan talebin arttığı, ancak arzın sınırlı kaldığı bu ekonomik döngü, olağandışı fiyat artışlarını beraberinde getirmiştir.<sup>26</sup>

2021'in ikinci yarısından itibaren başlayan fiyat artışlarıyla enerji sektöründe darboğazlar baş göstermiş, Rusya-Ukrayna Savaşı ile birlikte 2022 yılının ilk çeyreğinde itibaren darboğazlar bir enerji krizine doğru evrilmiştir. Yeşil politikaların güç kazanmasıyla birlikte özellikle Avrupa'da kömür santrallerinin sistemden kademeli biçimde çıkarılması arayışları başlamış, portföydeki doğal gaz santrallerinin kapasite artışları gündeme gelmiştir. Doğal gaz kullanımına yönelik küresel talep artarken pandemi döneminde ertelenen yatırımlardan dolayı arz imkanları daralmış, Rusya'nın kısıntıya gitmesiyle hem arz-talep makası açılmış hem de fiyatlarda astronomik artışlar yaşanmıştır.

Yüksek doğal gaz fiyatları ve yenilenebilir kaynaklara yönelik yatırımcı hevesindeki azalma, ülkelerin nükleer güç santrallerini devrede tutma olasılığını artırmaktadır. Bu duruma ilk örnek Belçika, Hollanda, Güney Kore ve Almanya'da nükleer güç santrallerinin faaliyette kalmasının mevcut krize bir çözüm olarak görülmeye başlanmasıdır.

Devam eden enerji krizi ve daha önceleri nükleer enerji programlarını sonlandırmak isteyen ülkelerde nükleer enerjinin tekrardan bir çözüm olarak ortaya çıkması, gerek SMR'lerin gerek eski nesil nükleer güç santrallerinin Türkiye'de de birer güçlü seçenek olarak tartışılması sonucunu beraberinde getirmektedir.

#### 4.2. Enerji ve İklim Politikasına Dayalı Faktörler

Türkiye'nin Nisan 2016'da imzaladığı ve Ekim 2021'de onayladığı, iklim krizi ile mücadele kapsamında küresel bir ortaklık örneği olan Paris Anlaşması'nın temel amacı sera gazı emisyonlarının azaltılması olmakla birlikte bu amaca ulaşmada nükleer enerjinin yeri ve önemi dikkat çekmektedir. Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Konseyi'nin hazırladığı rapora göre nükleer enerji, Paris İklim Anlaşması'ndaki hedeflerin yerine getirilmesinde yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılacaktır. Raporda yer alan verilere göre nükleer enerji, karbondioksit emisyonunu önlemede büyük rol oynamaktadır. Raporda son 50 yılda, yaklaşık iki yıllık toplam küresel enerji emisyonuna denk gelen 74 gigaton hacminde karbondioksit emisyonunun nükleer enerji sayesinde önlendiği paylaşılmaktadır.<sup>27</sup>

Gelecek 20 yılı kapsayan Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu'na göre 2020 yılında yaklaşık 305 teravatsaat (TWh) olarak gerçekleşen elektrik talebinin önümüzdeki 20 yıllık dönemde tüm senaryolar dikkate alındığında, yıllık ortalama %2,9-3,7 arasındaki artış oranı ile 2040 yılında 545-636 TWh bandında gerçekleşeceği öngörülmektedir.<sup>28</sup> Bu nedenle artan elektrik talebini karşılayacak şekilde elektrik üretiminde uygun bir planlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni nükleer enerji projelerinin sisteme

<sup>26</sup> TSKB, "2021 Enerji Görünümü", 2021

<sup>27</sup> [https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief\\_EN.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief_EN.pdf)

<sup>28</sup> [https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/ENTAP/114176-turkiye\\_elektrik\\_enerjisi\\_talep\\_projeksiyonu\\_raporu.pdf](https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/ENTAP/114176-turkiye_elektrik_enerjisi_talep_projeksiyonu_raporu.pdf)

entegrasyonunun elektrik üretiminde çeşitliliği artıracığı bilinmektedir. Bu çerçevede, gerekli maliyet avantajının oluşması durumunda, SMR'lerin de kaynak çeşitlendirici bir alternatif olarak ele alınması önem taşımaktadır.

## 5. Genel Değerlendirme

Yeşil dönüşüm hedeflerine ulaşılmasında yenilenebilir enerjinin yeterli olmayacağı ve karbonsuz yeni teknolojilere ihtiyaç duyulduğu konusunda enerji sektörü profesyonelleri arasında genel bir mutabakat vardır. Avrupa Birliği (AB)'nin net sıfır hedefi, AB genelinde kömürle çalışan santrallerin kademeli olarak sonlandırılacak olması, Almanya ve Belçika gibi ülkelerdeki büyük nükleer güç santrallerinin kapatılması ve yenilenebilir enerji yatırımlarının yeterli olmaması gibi unsurlar sektör genelinde nükleer enerjinin yeşil dönüşümde önemli bir paydaş olup olmamasına ve sınıflanmasına ilişkin tartışmaları gündeme getirmektedir. Bu kapsamda, küçük modüler nükleer reaktörlerin temiz enerji seçeneği olarak değerlendirilmesi gerektiği yönünde görüşler bulunmaktadır.

Bazı ülkeler zaman içerisinde nükleer enerjinin payını azaltırken aynı zamanda karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşabileceklerini savunmakta, kimi ülkeler ise nükleer enerjiyi karbondan arındırma stratejileri doğrultusunda desteklediklerini ve teşvik edilmesi gerektiğini açıklamaktadır. Ülkelerdeki nükleer politika belirsizliği, yatırım kararlarını da etkilemektedir. Özellikle bu yönde Fransa ve Almanya karşıt cephelerde yer almaktadır.<sup>29</sup> Bu alanda Fransa ile aynı politikayı benimseyen Çekya, Macaristan, Polonya, Romanya, Slovakya, Slovenya, Hırvatistan ve Bulgaristan gibi ülkeler iklim hedeflerine ulaşılmasında nükleerin temiz enerji olarak tanınmasının önemli olduğunu savunmaktadır. Öte yandan, Almanya ile aynı politikayı benimseyen Avusturya, Danimarka, Lüksemburg ve İspanya gibi ülkeler zararlı atık endişelerine, mevcut projelerde yaşanan gecikmelere ve artan maliyetlere vurgu yapmakta ve nükleer enerjinin temiz enerji sınıflanmasına dahil edilmemesi gerektiğini belirtmektedir.

AB Komisyonu, doğal gaz ve nükleer faaliyetlerindeki yatırımların yeşil dönüşüm kapsamında önemli bir rolü olduğuna inandığından doğal gaz ve nükleer enerji kapsamında yürütülen faaliyetlerin iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunan geçiş faaliyetleri olarak sınıflandırılmasını önermiştir. Bu çerçevede, nükleer enerji ve doğal gaz faaliyetlerinin de sürdürülebilir finansman taksonomisine dahil edilmesine yönelik kararname Temmuz 2022'de AB Komisyonu tarafından kabul edilmiştir.

Mevcut konvansiyonel sistemlerde elektrik, esas olarak yüksek kapasiteli santrallerde üretilmekte ve iletim / dağıtım şebekeleri aracılığıyla nihai tüketicilere arz edilmektedir. Ancak, enerji verimliliği ve güvenilirliği ile sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik son arayışlar, mevcut elektrik üretimi yöntemlerini değiştirme ve genel performanslarını artırma olasılıklarını öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda, konvansiyonel üretime karşı en iyi adaylardan biri, elektriğin kullanım noktasının yanında üretildiği dağıtık üretim olarak görülmektedir. Tarihsel olarak, dağıtık üretim, konvansiyonel üretim paradigmasının eksikliklerinin üstesinden gelmek için çözümler sunarak ve merkezi üretimin bir tamamlayıcısı olarak hareket edebilmektedir. Dağıtık üretimin hem performans hem de fiyat açısından verimli olması için, dağıtık üretimin konvansiyonel santrallerde daha rekabetçi olduğu yerlerde, yani merkezi bir tesis inşa etmenin ekonomik olmadığı sıkışık alanlarda veya kojenerasyon tesisleri olarak kullanılması gerekecektir. Bu aynı zamanda kWh başına maliyeti azaltmak için yakıt hücreleri gibi yeni teknolojiler için daha fazla Ar-Ge yapılması anlamına da gelmektedir.

<sup>29</sup> <https://www.aa.com.tr/tr/cevre/nukleerin-yesil-yatirim-kabul-edilmesi-fransa-ve-almanyayi-karsi-karsiya-getirdi/2464741>

Konvansiyonel reaktörler için en zorlu faktör yatırım maliyetleri, özellikle de başlangıç sermaye maliyetleridir. Büyük LWR'lerin yakıt verimliliği olmasına rağmen, bu reaktörlerin büyük boyutları inşaat projeleri için yüksek yatırım maliyetine yol açmıştır. Konvansiyonel nükleer güç reaktörlerindeki inşaat süresi ve maliyet aşmaları önemli kriterlerdir. İnşaat sırasında artan maliyetler nedeniyle yatırımın iptal edilmesi veya askıya alınması gibi durumlar da geçmişte yaşanmıştır. Konvansiyonel nükleer reaktörler, halihazırda en dayanıklı enerji arzı kaynakları arasındadır.<sup>30</sup> Ancak, iklim değişikliği kaynaklı bir endişe olan su tedariki bu santraller için bir kısıt yaratabilmektedir. SMR'ler farklı prosesler kullandıklarından genellikle önemli miktarda suya ihtiyaç duymayan ünitelerdir. Ekonomik olarak, SMR üreticileri de dahil olmak üzere gelişmiş reaktör tasarımcıları, bir nükleer ünite inşa etmenin mali riskini azaltmak için iki yöntem denemektedir. İlk olarak, gemi inşa endüstrisinin öncülük ettiği bir teknik olan modüler inşaat, fabrika düzeyindeki ölçek ekonomilerinden yararlanmak için kullanılmaktadır.<sup>31</sup> İkincisi, reaktörün boyutu küçültülerek yeni bir tasarım oluşturmanın ve devamında oluşacak ticari projelerin sermaye maliyetinin düşürülmesi planlanmaktadır. Daha düşük kapasiteli bir proje, uzun inşaat süresi ve maliyet aşmalarına dair riskleri azaltacaktır. İnşaat risklerinin azalması durumunda, sermaye maliyetinin düşmesi beklenebilecektir.

Küresel olarak SMR geliştirme çabaları sürerken, bu süreci hızlandırmak için IAEA, SMR'lere yönelik ortak düzenleyici ve sınıai yaklaşımlar geliştirmek için politika yapıcıları, düzenleyicileri, reaktör tasarımcılarını ve işleticileri bir araya getiren yeni bir girişim başlattığını duyurmuştur. Nisan 2022 başlarında açıklanan Nükleer Uyumlaştırma ve Standardizasyon İnisyatifi, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları 2030 Gündemi ve Paris Anlaşması hedeflerine ulaşılmasına olan katkıların artırılması için SMR'lerin ve diğer gelişmiş nükleer teknolojilerin güvenli ve emniyetli bir şekilde konuşlandırılmasını kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.

Daha geniş bir kullanıcı ve uygulama yelpazesi için esnek enerji üretimi ihtiyacını karşılama ve eskimekte olan fosil yakıtla çalışan enerji santrallerinin yerini alma olasılığı nedeniyle SMR'lere olan küresel ilgi artmaktadır. Ayrıca, SMR'ler doğal ve pasif güvenlik özellikleri aracılığıyla gelişmiş bir güvenlik performansı sergilerken büyük reaktörlere kıyasla daha düşük yatırım maliyeti gerektirmektedir. Ek olarak, az gelişmiş altyapıya sahip bölgeler için SMR'ler nükleer ve alternatif enerji kaynaklarını birleştiren hibrit enerji sistemleri olasılığı sunmaktadır.

Büyük reaktörlere kıyasla SMR'lerin daha küçük ve daha basitleştirilmiş tasarımı göz önüne alındığında, SMR'ler tarafından üretilen sıvı, katı ve gaz halindeki atık miktarının, büyük nükleer reaktörler tarafından üretilenden daha az olması beklenmektedir. Ancak SMR'ler için atık yönetimi ve bu tür nükleer güç santralleri tarafından üretilen atığın çevre üzerindeki olası etkisi hakkında kesin bir değerlendirme yapmak için henüz yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Sonuç olarak, SMR'lerin ekonomik ve teknolojik olarak konvansiyonel nükleer santrallere kıyasla avantajları bulunmakla birlikte dünyada halihazırda inşa halinde veya tasarım aşamasında olan SMR'lerin sınanmışlık ilkesine göre lisanslama düzenlemelerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamda, çerçeve anlaşmalarıyla bu konuya yakın ilgi duyduğunu gösteren Türkiye'nin, bu teknolojik gelişmeye uyum

<sup>30</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120303305>

<sup>31</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120303512>

sağlayabilmesi için SMR'lerin teknik, çevresel ve ekonomik boyutuna ilişkin çok yönlü bir araştırma ve altyapı hazırlığı yürütmesi gerekmektedir.





MECLİSİ MEBUSAN CAD.  
NO:81 FINDIKLI İSTANBUL 34427, TÜRKİYE  
T: +90 (212) 334 50 50 F: +90 (212) 334 52 34

Bu rapor, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) A.Ş.'nin uzman kadrosunca güvenilir olarak kabul edilen kaynaklardan elde edilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Raporunda yer alan görüşler ve öngörüler, teknik ve akademik bilgiler ile sektör temsilcileriyle yapılan görüşmelerden elde edilen sonuçları yansıtmakta olup bu verilerin tamlığı ve doğruluğu konusunda TSKB'nin herhangi bir sorumluluğu bulunmamaktadır. Raporunda yer verilen değerlendirme, görüş, düşünce ve öngörüler, TSKB nezdinde açık ya da gizli bir garanti ve beklenti oluşturmaz. Diğer bir ifadeyle; bu raporda yer alan tüm bilgi ve verileri kullanma ve uygulama sorumluluğu, doğrudan veya dolaylı olarak, bu rapora dayanarak yatırım kararı veren ya da finansman sağlayan kişilere aittir ve ortaya çıkan sonuçtan dolayı üçüncü kişilerin doğrudan ya da dolaylı olarak zarara uğramaları durumunda TSKB hiçbir şekilde sorumlu tutulamaz.

©2022 Bu raporun tüm hakları saklıdır. TSKB'nin izni olmadan raporun içeriği herhangi bir şekilde basılamaz, çoğaltılamaz, fotokopi veya teksir edilemez, dağıtılamaz.