

# **NÜKLEER ENERJİDE STRATEJİK FIRSAT:**

KÜÇÜK MODÜLER  
REAKTÖRLER VE  
TÜRKİYE

EKİM 2025

RA-  
POR



Milli İstihbarat Akademisi

# **NÜKLEER ENERJİDE STRATEJİK FIRSAT:** KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER VE TÜRKİYE

RAPOR / EKİM 2025





**Telif**  
Millî İstihbarat Akademisi © 2025  
Ankara - TÜRKİYE

**Yayın Tarihi:** Ekim 2025

Bu çalışmaya ait içeriğin telif hakları Millî İstihbarat Akademisine ait olup 5846 Sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu uyarınca kaynak gösterilerek kısmen yapılacak makul alıntılar dışında, hiçbir şekilde önceden izin alınmaksızın kullanılamaz, yeniden yayımlanamaz.

**Millî İstihbarat Akademisi**

**E-Posta:** bilgi@mia.edu.tr

"Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5'inci maddesinin 2'nci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir."

# NÜKLEER ENERJİDE STRATEJİK FIRSAT: KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER VE TÜRKİYE

## İÇİNDEKİLER

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| ÖN SÖZ .....                                              | 7  |
| YÖNETİCİ ÖZETİ .....                                      | 9  |
| GİRİŞ .....                                               | 11 |
| BÖLÜM 1                                                   |    |
| KMR'lerin Türkiye İçin Stratejik Önemi ve Fırsatlar ..... | 18 |
| BÖLÜM 2                                                   |    |
| Teknik, Ekonomik ve Altyapı Gereksinimleri .....          | 28 |
| BÖLÜM 3                                                   |    |
| Mevzuat, Paydaş Katılımı ve İş Birlikleri .....           | 42 |
| BÖLÜM 4                                                   |    |
| Türkiye'nin KMR Yol Haritası .....                        | 46 |
| SONUÇ VE STRATEJİK ÇIKARIMLAR .....                       | 54 |
| KAYNAKÇA .....                                            | 58 |

## İFOGRAFİK

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>İnfoğrafik 1:</b> Nükleer Reaktörlerin Kurulu Güçlerine Göre Sınıflandırılması .....                      | 12 |
| <b>İnfoğrafik 2:</b> Temel KMR Tasarımları ve KMR'nin Komponentleri .....                                    | 14 |
| <b>İnfoğrafik 3:</b> Nükleer Reaktör Teknolojileri ve Elektrik Üretimi Dışındaki Uygulamalar .....           | 15 |
| <b>İnfoğrafik 4:</b> Enerji Kaynaklarının Ortalama Yaşam Döngüsü CO <sub>2</sub> Eş Değeri Emisyonları ..... | 19 |

## FOTOĞRAF

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Fotoğraf 1:</b> Dünyanın İlk Yüzen Nükleer Santrali KLT-40S (Rusya) .....       | 12 |
| <b>Fotoğraf 2:</b> Dünyanın İlk Dördüncü Nesil Nükleer Reaktörü HTR-PM (Çin) ..... | 13 |
| <b>Fotoğraf 3:</b> Rus Akula Sınıfı Nükleer Denizaltı .....                        | 38 |
| <b>Fotoğraf 4:</b> Fransız Uçak Gemisi Charles de Gaulle .....                     | 39 |

## GRAFİK

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| <b>Grafik 1:</b> KMR'ler İçin Ekonomik Etkenler ..... | 30 |
|-------------------------------------------------------|----|

## TABLO

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1:</b> Son Dönemde Kullanılan Nükleer Finansman Modellerinin Özeti .....        | 32 |
| <b>Tablo 2:</b> Türkiye'deki KMR Projeleri İçin Kısa-Orta-Uzun Vadeli Yol Haritası ..... | 49 |

## HARİTA

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| <b>Harita 1:</b> Türkiye Deprem Tehlike Haritası ..... | 36 |
|--------------------------------------------------------|----|

## ŞEKİL

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1:</b> KMR Teknolojisi Yol Haritasının Ana Akış Şeması ..... | 46 |
| <b>Şekil 2:</b> KMR Projelerinin İş Akış Süreci .....                 | 48 |

## KISALTMALAR

|                       |                                                                                                 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AR-GE</b>          | Araştırma-Geliştirme                                                                            |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Karbondioksit                                                                                   |
| <b>EPC</b>            | Anahtar Teslim Sözleşme (Engineering, Procurement, Construction)                                |
| <b>GWe</b>            | Gigavat Elektrik                                                                                |
| <b>KMR</b>            | Küçük Modüler Reaktör                                                                           |
| <b>LCOE</b>           | Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost of Electricity)                             |
| <b>LWR</b>            | Hafif Su Reaktörü (Light Water Reactor)                                                         |
| <b>MWe</b>            | Megavat Elektrik                                                                                |
| <b>MWh</b>            | Megavat Saat                                                                                    |
| <b>NDK</b>            | Nükleer Düzenleme Kurumu                                                                        |
| <b>NGS</b>            | Nükleer Güç Santrali                                                                            |
| <b>NPT</b>            | Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması                                            |
| <b>NRC</b>            | ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (USA Nuclear Regulatory Commission)                             |
| <b>OECD</b>           | Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development) |
| <b>RAB</b>            | Düzenlenmiş Varlık Tabanı (Regulated Asset Base)                                                |
| <b>PPA</b>            | Enerji Satın Alma Anlaşmaları (Power Purchase Agreements)                                       |
| <b>PGA</b>            | Maksimum Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)                                                  |
| <b>STK</b>            | Sivil Toplum Kuruluşu                                                                           |
| <b>TWh</b>            | Teravat Saat                                                                                    |
| <b>TENMAK</b>         | Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu                                               |
| <b>TÜBİTAK</b>        | Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu                                                 |
| <b>UEA</b>            | Uluslararası Enerji Ajansı                                                                      |
| <b>IAEA</b>           | Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı                                                               |
| <b>ÜR-GE</b>          | Üretim-Geliştirme                                                                               |



# ÖN SÖZ

Enerji arz güvenliği, sanayide rekabetçilik ve iklim değişikliğiyle mücadele; Türkiye'nin kalkınma gündeminde birbirini tamamlayan üç temel önceliktir. Bu çerçevede küçük modüler reaktörler (KMR), yalnızca teknik bir başlık değil; aynı zamanda ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları olan stratejik bir değerlendirme alanıdır. Bu rapor; KMR teknolojilerinin dünyadaki gelişimini, Türkiye açısından potansiyel kullanım alanlarını, risk ve fırsatlarını bütüncül bir yaklaşımla ele almak üzere hazırlanmıştır.

Çalışma; uluslararası düzenleyici çerçeveler, teknoloji olgunluk düzeyleri, maliyet ve finansman alternatifleri ile güvenlik kültürü ve acil durum hazırlıkları başlıklarında güncel bilgileri bir araya getirmektedir. KMR'lerin sağlayabileceği katkılar; elektrik üretiminin yanı sıra bölgesel ısıtma, sanayi proses ısısı, su arıtma ve hidrojen gibi elektrik dışı uygulamalar bakımından da değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde, Türkiye'nin ihtiyaçları öncelenmiş; açık veri, şeffaf yöntem ve karşılaştırılabilir varsayımlar esas alınmıştır.

Millî İstihbarat Akademisi (MİA), konuya "teknoloji tarafsızlığı" ilkesiyle yaklaşmakta ve nihai kararların; kanıta dayalı analizler, bağımsız denetim, paydaş katılımı ve kamu yararı gözetilerek verilmesi gerektiğine inanmaktadır. Rapor, herhangi bir KMR modeline yönlendirme niteliği taşımamakta; karar vericiler ve kamuoyu için ortak bir bilgi zemini sunmayı amaçlamaktadır. Düzenleyici otoritenin bağımsızlığı ve ulusal mevzuat ile uluslararası standartlar, bu bağlamda göz önünde bulundurulmuştur.

Güvenliğin her aşamada önceliklendirilmesi, şeffaf risk iletişimi, yerli sanayi katılımı, insan kaynağı gelişimi ve tedarik zinciri kapasitesinin güçlendirilmesi; bu alandaki başarı için kritik unsurlardır. Pilot uygulamalarda ölçülebilir kriterler, zamanında ve gerçekçi takvimler ile sorumluluk paylaşımının açık biçimde tanımlanması; kamu kaynaklarının etkin kullanımını ve toplumsal güveni destekleyecektir.

Rapordaki bulguların; enerji arz güvenliği, iklim hedefleri ve sanayi rekabetçiliği arasında denge kuran, uygulanabilir ve ölçülebilir politikaların geliştirilmesine ışık tutacağı değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen tüm uzmanlara ve katkı sunan paydaşlara teşekkür ederim. Türkiye'nin uzun vadeli çıkarları doğrultusunda atılacak stratejik adımlara, sağlam bir bilgi zemini sağlamasını temenni ederim.

**Prof. Dr. Talha Köse**  
Millî İstihbarat Akademisi Başkanı



# YÖNETİCİ ÖZETİ

- Türkiye'nin büyüyen ekonomisi, sanayileşme ve şehirleşme eğilimleri; enerji talebini kalıcı olarak yukarı taşıırken "arz güvenliği, uygun maliyet ve düşük emisyon hedefleri"nin aynı anda karşılanması, stratejik bir zorunluluk hâline gelmiştir. Bu bağlamda KMR'ler söz konusu üçlü hedefe ulaşmada önemli katkılar sunabilir.
- KMR'ler; 10-300 MWe (megavat elektrik) aralığında tasarlanan, fabrika ortamında üretilen ve kademeli olarak devreye alınabilen yeni nesil nükleer reaktörlerdir. Bugün iki KMR uygulaması fiilen işletmededir (Rusya'da KLT-40S yüzer reaktör, Çin'de HTR-PM).
- KMR'ler elektrik üretmenin yanı sıra bölgesel ısıtma, desalinasyon ve hidrojen gibi elektrik dışı ihtiyaçlara da eş zamanlı ısı/enerji sağlamaktadır. Gelişmiş güvenlik tasarımları sayesinde acil durum planlama bölgeleri küçülür ve tesislerin tüketim merkezlerine daha yakın konumlandırılması mümkün olur.
- Uzak/ada şebekeleri, maden sahaları ve dağınık yerleşimler için KMR'ler, kesintisiz ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır. Kullanım dışı kalmış termik santral sahalarının yeniden değerlendirilmesi de yatırım süresini ve çevresel etkiyi düşürerek önemli bir avantaj yaratmaktadır.
- Mikro modüler reaktörler ( $\leq 10$  MWe), askerî üsler ve izole yerleşimler gibi şebeke dışı kullanım senaryolarında öne çıkmakta; taşınabilirlik ve standardizasyon, enerji güvenliğini yerinde güçlendirmektedir.
- **Nükleer güç; uçak gemileri ve denizaltıları için uzun menzil, yüksek hız kapasitesi ve güç yoğunluğu gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda Türkiye'nin Nükleer Denizaltı (NÜKDEN) Projesi'ni hayata geçirmesi, stratejik önem arz etmektedir.**
- Klasik büyük reaktörlere kıyasla daha kısa inşaat süresi (yaklaşık 3-5 yıl) ve modüler devreye alma, KMR'leri hız gerektiren arz açığı senaryolarında cazip kılmaktadır. Bu durum, planlama esnekliği ve yatırımın kademeli ölçeklenmesi anlamına gelmektedir.
- Türkiye'nin 2053 vizyonunda, toplam nükleer kurulu gücün 20 GWe'ye (gigavat elektrik) çıkarılması hedefi bulunmaktadır. KMR'ler mezkûr hedefe hem tamamlayıcı hem de belirli alanlarda

özgün bir çözüm olarak dâhil edilebilir. Bu çalışmada, KMR için 5 GWe seviyesinde bir kurulum ihtimali de tartışılmaktadır.

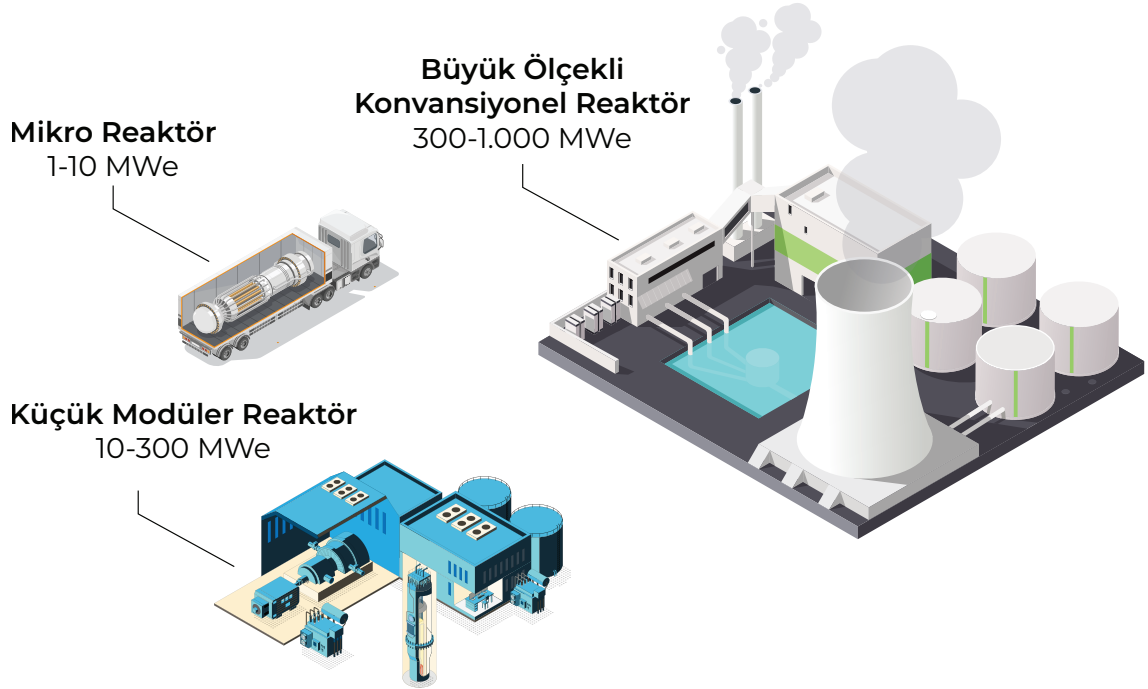
- Ekonomi tarafında, referans tasarımlar için LCOE (seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, levelized cost of electricity) 123-152 \$/MWh aralığında hesaplanmıştır. Duyarlılık analizinde varsayımların  $\pm 25$  oynaması, LCOE'yi  $-41$  ila  $+63$  arasında değiştirebilmektedir. Bu bulgular, maliyetlerin finansman koşulları ve tedarik zinciriyle yüksek etkileşimine işaret etmektedir.
- KMR projelerinin sermaye yoğunluğu nedeniyle finansman yapısı, proje yaşam döngüsü boyunca değişmektedir. Düzenlenmiş Varlık Tabanı (RAB, Regulated Asset Base) ve Enerji Satın Alma Anlaşmaları (PPA, Power Purchase Agreements) gibi uygun model seçimleri, proje risk paylaşımında belirleyicidir.
- İşletmeden çıkarma ve atık yönetimi maliyetleri, teknolojiye göre farklılık gösterebilmektedir. Bazı işletme ve bakım kalemleri ise küçük güçte oransal olarak azalmadığından birim kapasite maliyetleri yüksek kalabilmektedir. Bu nedenle maliyet tahminleri, düzenleyici çerçeve ve kurumsal uygulamalarla birlikte ele alınmalıdır.
- Türkiye için önerilen yol haritası: (1) ulusal ihtiyaçların net tanımı, (2) geniş tasarım havuzunda sistematik ön eleme, (3) katılımcı mekanizmalar inşa edilerek paydaşlarla beklentilerin hizalanması, (4) saha belirleme, (5) proje geliştirme modeli ve mevzuat adımlarını içermektedir.
- Yönetişim tarafında, kurumlar arası koordinasyonu güçlendirmek ve süreklilik sağlamak için Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı bünyesinde "**Nükleer Enerji Başkanlığı**" kurulması önerilmektedir. Söz konusu yapı; teknoloji seçimi, yerleştirme ve insan kaynağı planlamasının bütüncül yürütülmesine katkı sağlayacaktır. Bunların yanı sıra karar alma süreçlerinde yetki karmaşasını önleyecek, kurumsal koordinasyonu sağlayacak ve stratejik planlamanın etkisini artıracaktır. Zira nükleer enerji, aynı anda birçok bakanlık ve kamu kurumunun çalışma alanına girmesi nedeniyle ortak çalışmaya ihtiyaç duymaktadır. Bunlara ek olarak yatırım süreçlerinin verimli bir şekilde yürütülmesi, siyasi irade desteği, stratejik planlama ve yönetim ihtiyacı sebebiyle bir üst yapıya ihtiyaç duyulacaktır. Dolayısıyla söz konusu yapı; başta KMR projeleri olmak üzere nükleer enerji alanında üst düzey yönetim, stratejik rehberlik ve sürdürülebilirlik açısından kritik rol üstlenecektir.
- KMR'lerin toplumsal kabulü için şeffaf güvenlik anlatımı, acil durum hazırlıkları, atık yönetimi planları ve ekonomik etkilerin açıkça paylaşılması esastır.
- Sonuç olarak KMR'ler; arz güvenliği, sanayi rekabetçiliği ve iklim hedeflerinin birlikte yönetilmesinde güçlü bir adaydır. Ancak başarı; gerçekçi maliyet varsayımları, sağlam finansman, net bir lisanslama yol haritası ve toplumsal faydayı önceleyen şeffaf yönetim kombinasyonuna bağlıdır.
- Türkiye, teknolojik olgunlaşma penceresini iyi kullanırsa yalnızca kullanıcı değil; aynı zamanda bölgesel tedarik, mühendislik ve AR-GE (araştırma-geliştirme) merkezi olma fırsatını da yakalayabilir. Kademeli ve veriye dayalı ilerleme, riskleri yönetirken yerli kapasiteyi artıracaktır.

# GİRİŞ

Uluslararası Enerji Ajansı (UEA), Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2022 yılında yayımladığı “Türkiye Ulusal Enerji Planı” çerçevesinde yapılan öngörüler; Türkiye’nin yıllık elektrik tüketiminin 2024 yılında yaklaşık 350 TWh (teravat saat) seviyesindeyken 2050 yılına kadar 1.000 TWh’yi aşabileceğini göstermektedir. Aynı dönemde, 2020 yılında %16,7 olan birincil enerji tüketimi içinde yenilenebilir kaynakların, 2053 itibarıyla %50’ye ulaşması beklenmektedir. Nükleer enerji için %29,3 oranında bir pay öngörülmektedir. Bu hedefe ulaşılabilmesi için yaklaşık 30 GWe’lik bir nükleer kurulu güç gerekmektedir.<sup>1</sup> Mevcut planlamalar doğrultusunda, 15 GWe kurulu güce sahip büyük ölçekli üniteler ile 5 GWe kurulu güce sahip küçük ölçekli ünitelerin devreye alınması planlanmakta olup bu kapasite artışının büyük bir kısmının, 2040-2053 döneminde gerçekleşmesi beklenmektedir.<sup>2</sup>

IAEA veri tabanına göre Temmuz 2025 itibarıyla dünya genelinde 416 nükleer reaktör işletmede, 62 reaktör inşa hâlinde, 215 reaktör ise kapatılmıştır. Hâlihazırda faaliyette olan reaktörler, küresel elektrik ihtiyacının yaklaşık %10’unu karşılamaktadır. İnşası devam eden reaktörlerin büyük çoğunluğu, birkaç istisna dışında büyük ölçekli reaktörlerden oluşmaktadır.<sup>3</sup> Bu tabloya karşılık büyük ölçekli reaktörlere alternatif olarak geliştirilen **KMR’ler; daha küçük boyutlara, daha düşük güç kapasitelerine ve modüler fabrikasyon üretim süreçlerine sahip yeni nesil nükleer reaktörler olarak tanımlanmaktadır.** KMR’lerin kurulu güçlerine ilişkin farklı tanımlamalar bulunsa da genel kabul, 10 MWe ila 300 MWe aralığında tasarlandıkları yönündedir (bk. İnfografik 1). Bununla birlikte bazı kaynaklar, 10 MWe’nin altındaki reaktörleri de KMR sınıfına dâhil etmektedir. KMR’lerin sınırlı enerji altyapısına sahip bölgelerde, esnek biçimde konuşlandırılabilmesi ve potansiyel olarak düşük karbon emisyonlu çözümler sunabilmesi; onları sürdürülebilir kalkınma açısından önemli bir seçenek olarak ortaya çıkarmaktadır.<sup>4</sup>

**İnfoğrafik 1:** Nükleer Reaktörlerin Kurulu Güçlerine Göre Sınıflandırılması



KMR'ler; büyük ölçekli reaktörler gibi nükleer reaksiyon türüne, nötron enerjisi düzeyine, kullanılan soğutucuya, yavaşlatıcıya (moderator) ve yakıt tipine göre sınıflandırılabilir. Günümüzde işletmede olan reaktörlerin büyük çoğunluğu LWR'den (hafif su reaktörü, light water reactor) oluşmaktadır. Bu reaktör türü, KMR tasarımlarında da tercih edilen en yaygın sistemdir.

**Fotoğraf 1:** Dünyanın İlk Yüzen Nükleer Santrali KLT-40S (Rusya)



**Kaynak:** Akademik Lomonosov.

**NÜKLEER ENERJİDE STRATEJİK FIRSAT:**  
**KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER VE TÜRKİYE**

Günümüzde 80'den fazla KMR tasarımında çalışmalar yürütülmekte olup bu tasarımlar, farklı geliştirme aşamalarındadır. Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development) yayınlarına göre tasarım sayısı daha fazladır. Bazı modellerin yakın gelecekte konuşlandırılmaya hazır olabileceği de iddia edilmektedir. Hâlihazırda Rusya'da yüzer reaktör (bk. Fotoğraf 1) ve Çin'de yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktör (bk. Fotoğraf 2) olmak üzere iki KMR işletmededir.<sup>5</sup>

**Fotoğraf 2:** Dünyanın İlk Dördüncü Nesil Nükleer Reaktörü HTR-PM (Çin)



**Kaynak:** Weibo/CPNN, Tsinghua Üniversitesi.

Mevcut KMR tasarımları, genel olarak dört ana kategoride sınıflandırılmaktadır (bk. İnfografik 2).

## İnfografik 2: Temel KMR Tasarımları ve KMR'nin Komponentleri



### Hafif ve Ağır Su Reaktörleri

En yerleşik teknoloji türleridir. Reaktör çekirdeğini soğutmak ve nötronları (nükleer füzyon tepkimelerinin sürmesine yardımcı olan atom altı parçacıklar) yavaşlatmak için su kullanılırlar.



### Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktörler

Reaktör çekirdeğini soğutmak için helyum gibi gazları kullanılırlar ve daha yüksek nötron hızlarına sahiptirler. Bu da daha yüksek sıcaklıkların elde edilmesine olanak tanır.



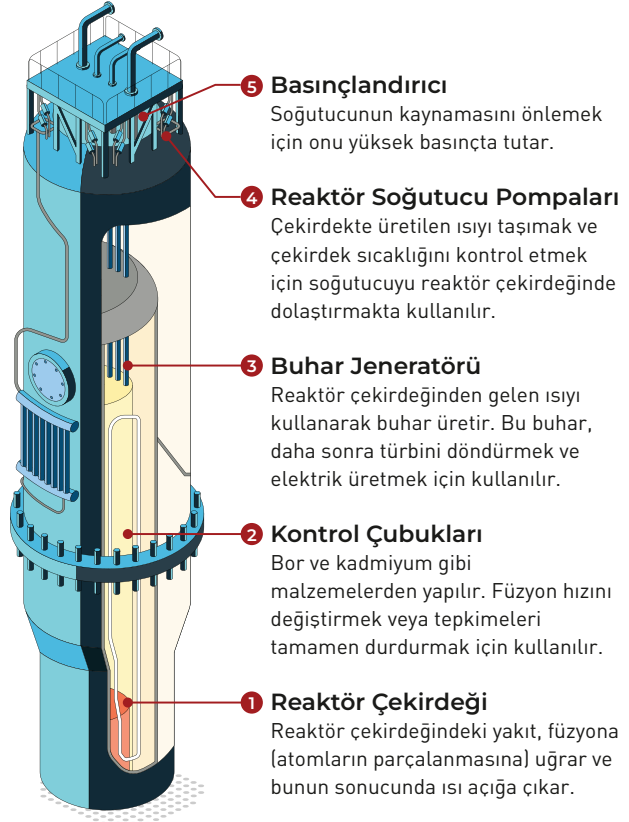
### Ergimiş Tuz Reaktörleri

Reaktör çekirdeğini soğutmak için ergimiş tuzlar kullanılırlar. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ve çeşitli yakıt türlerini kullanabilirler.



### Hızlı Nötron Reaktörleri

Adlarından da anlaşılacağı üzere hızlı nötron reaktörleri, nükleer füzyon tepkimelerini başlatmak ve sürdürmek için hızlı nötronlar kullanır. Bu da reaktörleri yakıt açısından daha verimli hâle getirir ve güç üretimini artırır.



**Kaynak:** Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı, ABD Enerji Bakanlığı.

KMR'ler, reaktör türü ve tasarımına bağlı olarak farklılık göstermekle birlikte "küçük boyutları, yenilikçi tasarımları ve modüler yapıları" bazı önemli avantajlar ve dezavantajları beraberinde getirmektedir. Küçük fiziksel boyutları sayesinde daha düşük ilk yatırım maliyeti, fabrikada seri üretim imkânı, esnek saha seçimi ve daha basit sistem tasarımı gibi avantajlar sağlanmaktadır. Bu avantajlara rağmen birim elektrik üretim maliyetinin görece yüksek olması ise önemli bir dezavantaj olarak öne çıkmaktadır.

Yenilikçi tasarımlar, pasif güvenlik sistemleri gibi gelişmiş güvenlik çözümlerini mümkün kılarken lisanslama süreçlerinde; "belirsizlik, radyoaktif atık yönetimi, kullanılmış yakıtın depolanması ve reaktörlerin işletmeden çıkarılmasına ilişkin süreçlerde öngörü zorluğu" gibi sorunlar çıkabilmektedir. Modüler yapı sayesinde kısa inşaat süreleri, taşınabilirlik, standartlaştırma ve silahsızlanmaya katkı gibi faydalar elde edilirken teknoloji transferi ve yerileştirme süreçlerinin zorlaşması ise modülerliğin önemli sınırlayıcı yönleridir.

KMR'lerin elektrik dışı uygulamaları da giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle desalinasyon, hidrojen üretimi ve bölgesel ısıtma gibi alanlarda KMR teknolojilerinin kullanımı üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Bu bağlamda, reaktörlerin sağlayabildiği sıcaklık aralıkları ile endüstriyel süreçlerin termal enerji ihtiyaçlarının birlikte değerlendirilmesi, büyük önem taşımaktadır (bk. İnfografik 3).<sup>6</sup>

**İnfografik 3: Nükleer Reaktör Teknolojileri ve Elektrik Üretimi Dışındaki Uygulamalar**



**Kaynak:** Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı.

KMR teknolojilerinde, kullanıcı gereksinimleri ve değerlendirme kriterleri de oldukça önemlidir. 2026 yılında yayımlamayı planladığı teknik rapor için başlıkları belirleyen UAEEA, bu başlıkların tanımlanmasıyla kullanıcı politikalarının geliştirilmesine yönelik çalışmaları sürdürmektedir. Belirlenen başlıklar:

- varlık koruması,
- topluluk etkilerinin değerlendirilmesi,
- inşa edilebilirlik,
- tasarım sınırları,
- dijital mühendislik,
- çevrenin korunması,
- sistem esnekliği,
- insan faktörü mühendisliği,
- lisanslama ve izin süreçlerine hazırlık,
- bakım kolaylığı,
- operasyonel sürdürülebilirlik,
- kanıtlanmış teknolojilerin kullanımı,
- kalite güvencesi,
- sistem basitleştirmesi,
- standardizasyon,
- tehdit ve saldırı koruması,
- nükleer yakıt yönetimi,
- radyoaktif atık ve kullanılmış yakıt yönetimi ile
- reaktörün işletmeden çıkarılmasıdır.<sup>7</sup>

# BÖLÜM 1

## KMR'LERİN TÜRKİYE İÇİN STRATEJİK ÖNEMİ VE FIRSATLAR

### KMR ve Enerji

#### Elektrik İhtiyacı

KMR'ler, genellikle büyük ölçekli reaktörleri tamamlayıcı unsurlar olarak değerlendirilse de özgün tasarımları sayesinde bu kalıbın ötesine geçebilecek potansiyele sahiptir. Sağladıkları esneklik ve ölçeklenebilirlik sayesinde, farklı enerji senaryolarında bağımsız birer çözüm olarak da öne çıkmaktadır. KMR'lerin, tıpkı büyük ölçekli reaktörler gibi sürekli ve istikrarlı baz yük elektrik üretimi sağlayabilmeleri, onları yenilenebilir enerji kaynaklarından teknik olarak farklı bir konuma yerleştirmektedir. Bu özellikleri, yenilenebilir enerjinin doğası gereği değişken üretim profilini dengelemekte kritik bir rol oynamaktadır. KMR'ler, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine entegrasyonunda dengeleme unsuru olarak görev alabilir, bu sayede sistemin kararlılığı artırılmış olur.

Birçok KMR tasarımında bulunan ve manevra kabiliyeti olarak tanımlanan özellik sayesinde, bu reaktörler ani yük değişimlerine hızlı yanıt verebilmektedir. Bu durum, bir elektrik santralinin devre dışı kalması hâlinde şebekeye hızla ek kapasite sağlama, yoğun talep dönemlerinde ise esnek üretim desteği sunma gibi avantajlar yaratmaktadır. Sonuç olarak KMR'ler yalnızca sürdürülebilir ve düşük karbonlu enerji üretimi değil, aynı zamanda şebeke esnekliği ve güvenliği açısından da stratejik bir rol üstlenebilecek niteliktedir.<sup>8</sup>

Yüksek yakıt maliyetleri ve sık yaşanan enerji kesintileriyle karşı karşıya kalan ada ülkeleri, uzak maden sahaları ve dağınık yerleşim yerleri gibi sınırlı enerji altyapısına sahip bölgeler için KMR'ler; istikrarlı ve sürdürülebilir bir enerji çözümü sunmaktadır. Bu bölgelerde genellikle mevcut bir iletim şebekesi bulunmamakta ya da şebeke altyapısının kurulması yüksek maliyet gerektirmektedir. KMR'ler, bu durumlarda şebekeden bağımsız çalışabilme yetenekleri sayesinde ideal bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca altyapısı hâlihazırda mevcut olan ancak faaliyeti durdurulmuş eski termik santral sahaları, KMR kurulumu açısından önemli bir esneklik ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Mevcut altyapının yeniden kullanımı hem yatırım süresini kısaltmakta hem de çevresel etkileri azaltmaktadır.

Uluslararası literatürde yer alan karşılaştırmalı analizlere göre uzak bölgelerde iletim şebekesi kurulumu için gereken maliyetler, KMR projelerinin kurulum maliyetlerine oldukça yakın düzeydedir.<sup>9</sup> Bu değerlendirmeler ışığında, erişim kısıtı olan bölgeler için hâlihazırda Rusya'da işletmede bulunan yüzer KMR uygulamasının da Türkiye açısından potansiyel bir seçenek olabileceği değerlendirilmektedir. Bu tür mobil ve deniz temelli çözümler, özellikle sabit altyapının kurulmasının zor ya da maliyetli olduğu alanlarda dikkate değer avantajlar sunmaktadır. 2053 yılı hedefleri doğrultusunda Türkiye'nin, 5 GWe kurulu KMR kapasitesine ulaşması planlanmaktadır. Bu hedefin; ulusal enerji ihtiyacının gelişimi, KMR teknolojilerinin olgunluk seviyesi ve doğru teknoloji seçimi gibi faktörlere bağlı olarak daha yüksek seviyelere çıkarılabileceği öngörülmektedir.

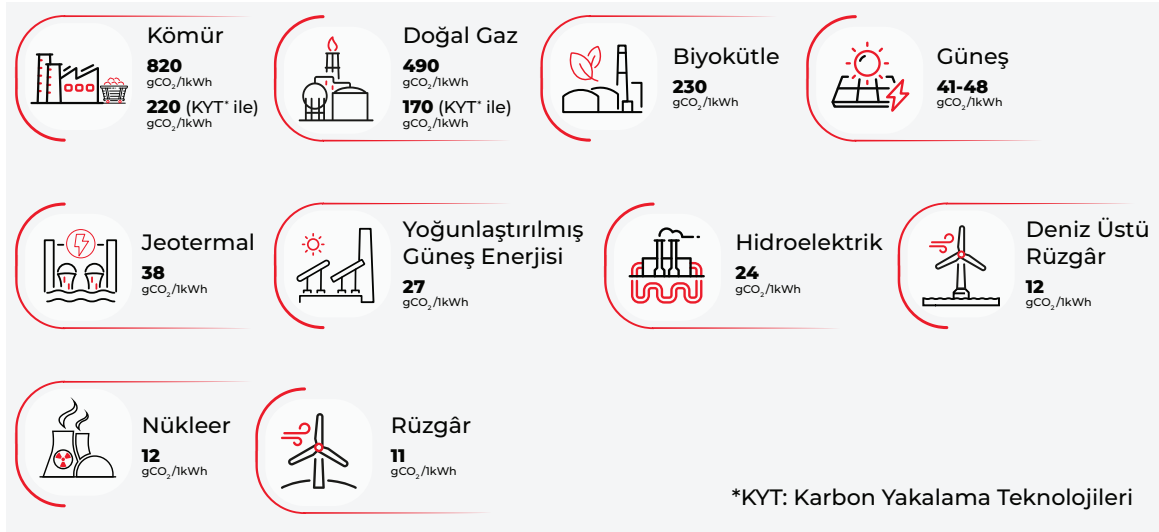
## Enerji Arz Güvenliği ve Sera Gazı Salınımı

Nükleer enerji; enerjide dışa bağımlılığın azaltılması, sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması, cari açığın düşürülmesi ve iklim hedeflerinin desteklenmesi açısından özellikle doğal enerji kaynakları sınırlı olan ülkeler için önemli fırsatlar sunmaktadır. KMR'ler; kısa inşaat süreleri, yüksek manevra kabiliyeti, primer ve sekonder frekans dengesine uyum, esnek yük takibi gibi özellikleriyle enerji arz güvenliğine katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

KMR'ler, düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişte giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır. Diğer nükleer reaktörlerde olduğu gibi KMR'lerin de işletme aşamasındaki sera gazı emisyonları, ihmal edilebilir düzeydedir. Elektrik üretimi sırasında, fosil yakıtlı santrallerin aksine neredeyse hiç CO<sub>2</sub> (karbondioksit) salımı gerçekleşmemektedir.

Çevresel etkilerin bütüncül olarak değerlendirilebilmesi için yaşam döngüsü analizi yapılması gereklidir. Bu analiz; uranyum madenciliği, yakıt üretimi, reaktör işletmesi ve işletmeden çıkarma gibi tüm aşamaları kapsamalıdır. Yapılan çalışmalar; KMR gibi nükleer santrallerin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan toplam karbon emisyonlarının, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla karşılaştırılabilir, hatta bazı senaryolarda daha düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir (bk. İnfografik 4).<sup>10</sup>

### İnfografik 4: Enerji Kaynaklarının Ortalama Yaşam Döngüsü CO<sub>2</sub> Eş Değeri Emisyonları



**Kaynak:** Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli.

KMR'lerin karbon ayak izi, birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bunlar arasında reaktör tasarımı, kullanılan yakıt bileşimi ve tedarik zincirinin optimizasyon seviyesi öne çıkmaktadır. Örneğin toryum bazlı veya geri dönüştürülmüş yakıtlar kullanan gelişmiş KMR tasarımları; yaşam döngüsü boyunca oluşan karbon emisyonlarında kayda değer azalma sağlayabilmektedir.

Ayrıca KMR'lerin modüler yapısı ve yerinde montaj kabiliyeti, büyük ölçekli reaktörlerle karşılaştırıldığında, inşaat kaynaklı emisyonların düşürülmesine katkı sunmaktadır.<sup>11</sup>

Türkiye de diğer birçok ülke gibi net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda uluslararası anlaşmalara taraf olmuş ve enerji alanında bu hedeflere ulaşmak adına "Türkiye Ulusal Enerji Planı"nı yayımlamıştır. Bu planda hem yenilenebilir enerji hem de nükleer enerji için somut hedefler ortaya konulmuştur. Artan enerji talebini karşılamak ve karbon salınımını azaltmak amacıyla şu anda Türkiye'de, dört büyük ölçekli reaktör ünitesinin (Akkuyu Nükleer Güç Santrali) inşası sürmekte olup yeni projeler için çalışmalar devam etmektedir. Bununla birlikte KMR teknolojisinin potansiyeli de ulusal düzeyde değerlendirilmeye başlanmıştır. İlk etapta, 2053 yılına kadar 20 GWe nükleer kurulu güce ulaşılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda; saha seçimi, güvenlik ve emniyet gibi temel kriterler göz önünde bulundurularak öncelikli olarak büyük ölçekli reaktörlerin kurulması yönünde karar verilmiştir. Ancak büyük ölçekli reaktörlerin, uzun inşaat süreleri nedeniyle kısa vadeli enerji ihtiyaçlarına hızlı yanıt verememesi, bu yatırımların çok önceden planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Buna karşılık yapılan ön çalışmalar ve uluslararası deneyimler, KMR'lerin inşaat süresinin 3 ila 5 yıl gibi daha kısa bir zaman diliminde tamamlanabileceğini göstermektedir. Türkiye'de nükleer enerji filosu oluşturulurken hem devlet hem de özel sektör eliyle yapılacak yatırımlarla enerji arz güvenliğinin artırılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması; sürdürülebilir ve uzun vadeli bir enerji stratejisinin temelini oluşturacaktır.

### Kojenerasyon Esnekliği

Elektrik üretimiyle sınırlı kalmayan KMR'ler, farklı enerji ihtiyaçlarına da eş zamanlı çözümler sunabilme kapasitesiyle dikkat çekmektedir. Nükleer reaktörlerin ürettiği termal enerjinin bir kısmı; desalinasyon, hidrojen üretimi, bölgesel ısıtma ve sanayi süreçlerinde doğrudan kullanılabilir.

Bu tür uygulamalarda ısı kayıplarını en aza indirmek adına KMR'lerin ısıyı kullanacak tesislere yakın konumlandırılması, teknik olarak gereklidir. Geleneksel büyük ölçekli reaktörlere kıyasla KMR'lerin sahip olduğu gelişmiş güvenlik sistemleri ve düşük radyasyon etkisi, acil durum planlama bölgelerinin daraltılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede KMR'ler, kent merkezlerine daha yakın alanlarda konumlandırılabilir hâle gelmektedir. Ayrıca bir KMR'den elde edilebilecek termal güç miktarı, bir şehir merkezinin ısıtma veya su arıtımı gibi ihtiyaçlarıyla ölçek açısından uyumlu olmaktadır.

KMR'ler, bu yönleriyle kojenerasyon uygulamaları için büyük ölçekli reaktörlere kıyasla çok daha uygun bir seçenek sunmaktadır. Üstelik yenilikçi ve kompakt tasarımlar sayesinde modüler sistemler, daha az elektromekanik ekipman ve borulama gerektirirken pasif güvenlik sistemleri sayesinde kaza riskini önemli ölçüde azaltmaktadır.<sup>12</sup> Nükleer kojenerasyonun başlıca avantajları şöyledir:

- atık ısıнын verimli şekilde geri kazanılması,
- nükleer enerjinin elektrik dışı alanlarda kullanılabilmesi,
- CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması,
- nükleer atık üretiminin azaltılması,

- enerji üretim maliyetlerinin düşürülmesi,
- fosil yakıt ihtiyacının azaltılması,
- daha yüksek enerji verimliliği,
- baz yük esnekliği ve operasyonel esneklik ile
- gelişmiş çevresel performans.

### **KMR İçin AR-GE ve ÜR-GE Süreçleri**

Tüm ileri teknolojilerde olduğu gibi nükleer enerji alanında da AR-GE faaliyetleri büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda, KMR'ler sadece büyük ölçekli reaktörlere bir alternatif olmalarıyla değil; aynı zamanda teknik, ticari ve sistemsel avantajları sayesinde de küresel ölçekte ilgi odağı olmuştur. Özellikle kojenerasyon yetenekleri sayesinde, elektrik dışı enerji taleplerini karşılamadaki potansiyeliyle de öne çıkmaktadır. Dünya genelinde geliştirilen birçok KMR, hâlen AR-GE aşamasındadır.<sup>13</sup> Bu erken aşamalar, çoğunlukla kavram geliştirme veya basitleştirilmiş tasarım evrelerini içermekte olup temel mühendislik ilkeleri, güvenlik kabiliyetleri ve operasyonel konseptler üzerine odaklanmaktadır. KMR'ler için yürütülen AR-GE çalışmaları, birçok disiplini kapsamaktadır:

- yeni nesil nükleer yakıtlar ve yakıt döngüsü optimizasyonu,
- kullanılmış yakıt ve atık yönetimine yönelik çözümler,
- gelişmiş malzeme bilimi ve radyasyon dayanıklılığı,
- dijital teknolojiler ve reaktör kontrol algoritmaları,
- pasif güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi ve doğrulanması,
- elektrik dışı uygulamalara yönelik tasarım optimizasyonu,
- yüksek sıcaklıkta buhar üretimi, hidrojen üretimi ve sentetik yakıt uygulamaları.

Özellikle yüksek sıcaklıklı endüstriyel süreçler, hidrojen üretimi, düşük kaliteli petrol kaynaklarının iyileştirilmesi gibi alanlar; yoğun AR-GE gerektiren, gelecek odaklı uygulama sahalarıdır. AR-GE sürecinde teknik yeterliliği kanıtlanan KMR tasarımlarının; ekonomik, güvenli ve verimli biçimde üretilebilmesi, ÜR-GE (üretim-geliştirme) aşamasıyla mümkün olmaktadır. ÜR-GE yalnızca reaktörlerin prototiplerinin geliştirilmesini değil, aynı zamanda şu unsurları da kapsar:

- prototip üretimi ve saha testleri,
- fabrikada modüler üretim süreçlerinin oluşturulması,
- yerinde montaj tekniklerinin geliştirilmesi,
- seri üretim planlaması ve maliyet optimizasyonu ile
- regülasyonlara uyum ve pazar hazırlığı.

KMR'lerin modüler tasarım ve fabrikasyon temelli üretim modeli, ÜR-GE sürecini nükleer sektördeki diğer teknolojilere kıyasla daha kritik ve ayırt edici kılmaktadır.

Türkiye’de nükleer alanda araştırmaların yürütülmesine olanak sağlamak amacıyla geçmişte iki araştırma reaktörü kurulmuştur. Bu reaktörlerde; nükleer mühendislik eğitimi, nötron deneyleri, radyasyonla malzeme testleri, izotop üretimi ve deneysel uygulamalar gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ancak günümüzde her iki araştırma reaktörü de işletmede değildir. Bu durum, KMR özelinde AR-GE ve ÜR-GE çalışmalarının etkin bir şekilde yürütülebilmesi için yeni araştırma altyapılarının geliştirilmesi veya yeniden işletmeye alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.<sup>14</sup>

### **Tasarım Geliştirme ve Ortak Girişim**

Türkiye’nin KMR teknolojisine yaklaşımı, mevcut tasarımların uygun koşullarda edinilmesiyle sınırlı kalmamalıdır. Tasarım geliştirme ve uluslararası ortak girişim modellerini içeren çok boyutlu bir stratejiye dayanmalıdır. Bu stratejinin temel amacı, Türkiye’nin nükleer teknolojide dışa bağımlılığını azaltmak ve yerli mühendislik kapasitesini artırmak olmalıdır. Bu doğrultuda Türkiye’nin kendi koşullarına, enerji ihtiyaçlarına ve güvenlik gereksinimlerine uygun; yenilikçi, ekonomik ve güvenli KMR tasarımları geliştirmesi büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte geliştirilecek yerli tasarımlar sayesinde, Türk sanayisinin nükleer teknolojiye entegrasyonu hızlanacaktır. Bu durum da hem yerlileşmeyi destekleyecek hem de uluslararası rekabet gücünü artıracaktır.

Söz konusu hedeflerin gerçekleştirilmesi için akademik kurumlar, araştırma merkezleri, kamu otoriteleri ve özel sektör arasında güçlü bir iş birliği ve koordinasyon gereklidir. Tasarım geliştirme sürecinin ana odak noktaları arasında:

- güvenlik standartlarının yükseltilmesi,
- yakıt verimliliğinin artırılması ile
- sermaye ve işletme maliyetlerinin optimize edilmesi gibi unsurlar yer almalıdır.

Bu çerçevede T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının, Rekabet Öncesi İşbirliği Programı kapsamında “Yerli Nükleer Reaktör Geliştirilmesi Projesi” için yakın zamanda bir çağrı yayımlaması; tasarım geliştirme ve ortak girişim yaklaşımının, somut bir politika zemini kazandığını göstermektedir. Çağrı; (KMR/mikro reaktörler dâhil) yenilikçi tasarımların Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) enstitüleri ve üniversitelerle birlikte geliştirilmesini, prototipleme ile test/sertifikasyon kapasitesinin oluşturulmasını öngörmektedir.<sup>15</sup>

Bu durum, aslında küresel ölçekte benimsenen yaklaşımları da yansıtmaktadır. KMR’lerin büyük çoğunluğu henüz türünün ilk örneği olduğu için birçok ülke; ilk ünitelerin kurulumunda devlet desteği sağlamayı ya da doğrudan kamu yatırımıyla inşa etmeyi gerekli görmektedir. Bu yaklaşım; yüksek ilk yatırım maliyetleri ile teknik ve regülasyon süreçlerindeki belirsizlikler göz önünde bulundurularak tercih edilmektedir. Aynı zamanda, nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesi ve AR-GE faaliyetlerinin yürütülmesi konularında da birçok ülke, uluslararası iş birlikleri ve ortak girişim modellerini tercih etmektedir. Bu sayede hem bilgi paylaşımı hızlanmakta hem de teknoloji geliştirme süreçleri daha sürdürülebilir olmaktadır.

Kabul gören anlayışa göre KMR teknolojisinin geliştirilmesinde hem ulusal hem de uluslararası iş birlikleri, büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, uluslararası ortak girişimlerin temel hedefleri aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:<sup>16</sup>

- **Teknoloji Transferi:** Mühendislik kapasitesini ve sanayi altyapısını güçlendirmek amacıyla nükleer teknolojiye sahip ülkelerden bilgi, teknoloji ve deneyim aktarımının sağlanması.
- **Yatırım Ortaklıkları:** Yüksek ilk yatırım maliyetlerini ve teknik riskleri paylaşmak üzere uluslararası yatırımcılarla stratejik ortaklıklar kurulması.
- **Standartlaşma ve Lisanslama:** UAEA ve benzeri kuruluşlarla iş birliği yaparak güvenlik standartlarına uyumun sağlanması ve lisanslama süreçlerinin hızlandırılması.
- **Tedarik Zinciri Entegrasyonu:** Türk sanayisinin inşaat, işletme, bakım ve işletmeden çıkarma süreçlerine entegre edilerek küresel tedarik zincirinde rekabet gücünün artırılması.
- **Eğitim ve Kapasite Geliştirme:** Nükleer alanda uzman insan kaynağı yetiştirilmesi için uluslararası eğitim programlarına, teknik iş birliklerine ve araştırma projelerine aktif katılım sağlanması.

### **Bölgesel İmalat Merkezi Olarak Türkiye**

Teknoloji sağlayıcılarla yapılacak iş birliklerinin kapsamına bağlı olarak tasarım sahibi şirketler tarafından; üretim ve imalat faaliyetlerinin, başka ülkelerde gerçekleştirilmesine olanak tanınabilmektedir. Bu çerçevede, **Türkiye'nin bölgesel bir KMR imalat ve montaj merkezi olma potansiyeli hem ticari açıdan hem de yerli nükleer endüstrinin gelişimi ve sürdürülebilirliği açısından önemli stratejik fırsatlar sunmaktadır.** Bu fırsat yalnızca Türkiye'nin iç pazarına değil; aynı zamanda gelecekte nükleer enerjiyi, enerji karışımına dâhil etmeyi planlayan ülkeler (özellikle Afrika, Avrasya ve Doğu Avrupa bölgeleri) açısından da bölgesel bir tedarik ve ihracat merkezi yaratma imkânı sunmaktadır. Elektrik üretimi kadar elektrik dışı uygulamalardan kaynaklanan KMR talepleri de bu potansiyeli daha da güçlendirmektedir.

Bölgesel üretim merkezi olma hedefi, Türkiye için yalnızca ekonomik bir kazanım değil, aynı zamanda uzun vadeli teknoloji kazanımı ve dışa bağımlılığın azaltılması anlamına gelmektedir. Bu beklenti, teknoloji sağlayıcılarla yapılacak ilk müzakerelerde açıkça ortaya konulmalı; imalat lisanslarının devri, tedarik zinciri paylaşımı ve yerli katkı oranları gibi konular, pazarlık sürecinde öncelikli gündem maddeleri arasında yer almalıdır.

Bölgesel bir KMR imalat merkezi olma hedefinin en kritik adımlarından biri, doğru teknoloji seçiminin yapılmasıdır. KMR'ler doğaları gereği modüler yapıda, fabrikada üretilen ve yüksek teknolojiye sahip özel ekipman gerektiren bir sistemdir. Bu nedenle seçilecek teknoloji yalnızca teknik uygunluk açısından değil, ticari uygulanabilirlik ve kurulum süresine etkisi açısından da stratejik olarak değerlendirilmelidir. AR-GE odaklı bir yol haritası yerine ticari ölçekli uygulamalara öncelik verilmesi hedefleniyorsa hâlihazırda sertifikalandırılmış ya da lisanslama sürecinde ilerlemiş KMR tasarımlarının tercih edilmesi, süreci ciddi ölçüde kolaylaştıracaktır.

Bu tür olgun tasarımlar:

- ekipman uygunluğu ve güvenilirliği,
- lisanslama süreçlerinin kısalığı ve
- nükleer güvenlik standartlarına uyum gibi alanlarda önemli avantajlar sağlayarak kurulum süresinin kısaltılmasına doğrudan katkı sunabilir.

Ticari kazanımların önceliklendirilmesi durumunda, henüz geliştirme aşamasında olan ve olgunlaşmamış KMR tasarımlarına yönelmek, kaynak ve zaman açısından riskli olabilir. Bu nedenle teknoloji seçiminde uygulanabilirlik, lisans geçerliliği ve sertifikasyon düzeyi gibi kriterler özenle dikkate alınmalıdır.<sup>17</sup>

KMR teknolojilerindeki tasarım çeşitliliği, Türkiye'nin bölgesel bir üretim ve imalat merkezi olma hedefinde önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu nedenle sınırlı sayıda teknolojiye odaklanmak hem lisanslama süreçlerini sadeleştirecek hem de imalat altyapısının standardizasyonunu, eğitim programlarının verimliliğini ve işletme süreçlerindeki öğrenme etkisini artırarak ekonomik kazanımları maksimize etme imkânı sunacaktır. Öte yandan birden fazla tasarımın tercih edilmesi; üretim süreçlerinin karmaşıklaşmasına, sertifikasyon ve eğitim maliyetlerinin artmasına ve imalat merkezi olma vizyonunun zayıflamasına yol açabilir. Buna karşılık yalnızca tek bir teknolojiye bağlı kalmak, uzun vadede teknoloji sağlayıcı ülkeye bağımlılık riski doğurabilecektir.

En uygun stratejiyi belirlemek adına aday KMR tasarımları ile ön fizibilite çalışmaları yapılmalı; her teknoloji sağlayıcının Türkiye'ye özel sunduğu iş modeli, yatırım planı, yerleşime potansiyeli ve teknoloji transferi teklifleri kapsamlı şekilde analiz edilmelidir. Çok boyutlu değerlendirme, doğru tasarım seçimini mümkün kılarak hem teknik sürdürülebilirliği hem de stratejik özerkliği güvence altına alacaktır.

### **Millî Güvenlik Perspektifi: Kritik Altyapı ve Stratejik Otonomi**

Enerji sistemlerinin sürekliliği, modern devletlerin millî güvenlik mimarisinin ayrılmaz bir parçasıdır. Türkiye'nin sismik gerçekliği, artan iklim kaynaklı aşırı hava olayları ve coğrafi/lojistik kırılganlıkları dikkate alındığında; kritik altyapıların kesintisiz ve güvenli biçimde çalışması, stratejik bir zorunluluktur. KMR'ler; pasif güvenlik, sınırlı karbon ayak izi, adalı işleme uygun mimari ve kademeli kurulum gibi özellikleri sayesinde sağlık, desalinasyon, haberleşme ve güvenlik alanları dâhil olmak üzere kritik tesislerin dayanıklılığını güçlendirebilir. Afet senaryolarında, şebekeden bağımsız çalışabilme ve hızlı yeniden devreye girme kabiliyeti, toparlanma süresini kısaltır ve kamusal hizmetin sürekliliğini sağlar. Bu çerçevede mikro-KMR çözümleri; sınır/ada şebekelerinde ve güvenlik bölgelerinde, dizel yedek sistemlerine düşük emisyonlu güvenli bir alternatif sunar.

### **Kritik Altyapı Dayanıklılığı**

Kritik altyapıların sürekliliği, millî güvenliğin hem barış hem de kriz zamanlarındaki asli belirleyicisidir. Türkiye bağlamında yüksek sismisite, iklim kaynaklı aşırı hava olayları ve jeopolitik

dalgalanmalar; elektrik, su, sağlık, ulaştırma ve haberleşme ağlarının enerjiye bağımlı bütünleşik doğasını daha görünür kılmaktadır. KMR'ler; pasif güvenlik ilkeleri, sınırlı yer ihtiyacı ve kademeli kurulum olanakları sayesinde kritik hizmetlerin kesintisizliğini güçlendirebilecek bir seçenektir. KMR'lerin tüketim merkezlerine yakın konumlandırılabilmesi, elektrik ve ısıyı birlikte sağlayabilmesi ve adalı işleme uygun mimarileri; geniş alanlı şebeke bozulmalarında dahi kamusal işlevlerin sürdürülmesine katkı sunar.

Dayanıklılık yalnızca teknik bir nitelik değil, yönetim ve hukukla tamamlanan bir kapasitedir. Afet yönetimi, çevresel etki değerlendirmesi, arazi kullanımı ve acil durum planlaması süreçlerinin; yer seçimi ve tesis tasarımıyla eş zamanlı ilerlemesi esastır. Altyapılar arası bağımlılıkların (ör. su temini-soğutma, ulaştırma-lojistik, haberleşme-kontrol) analizi, tekil bir KMR çözümünün sistemik riskleri azaltıcı mı yoksa yeni kırılganlıklar üretebilir nitelikte mi olduğunu belirler. Bu nedenle KMR'ler, merkezî üretimle dağıtık üretimin dengelendiği, sivil otorite ve bağımsız düzenleyicinin açık roller üstlendiği, şeffaf ve hesap verebilir bir güvenlik mimarisinin parçası olarak ele alınmalıdır.

### **Güvenlik Bölgelerinde Mikro-KMR Kullanım Senaryoları**

Güvenlik bölgeleri; komuta-kontrol, istihbarat, haberleşme ve lojistik süreçleri nedeniyle kesintisiz ve öngörülebilir enerjiye ihtiyaç duyar. Mikro-KMR'ler, bu tür tesislerde dizel yakıta bağımlılığı ve yakıt ikmal konvoylarının güvenlik/lojistik risklerini azaltarak operasyonel esnekliği artırabilir. Adalı işleme ve hızlı yeniden devreye girmeye uygun mimarileri, geniş ölçekli şebeke kesintilerinde dahi temel işlevlerin sürdürülmesine olanak tanır; ısı-elektrik kojenerasyonu ise barınma, bakım-onarım ve altyapı hizmetlerinde verimlilik sağlar.

Türkiye özelinde sınır bölgeleri, kritik/stratejik alt ve üst yapılar, ada/yarımada yerleşimleri, liman-tersane kümeleri ve iç güvenlik kampüsleri; mikro-KMR uygulamalarının doğal adaylarıdır. Bununla birlikte askerî/sivil ayrımının, ulusal düzenlemeler ve uluslararası yükümlülüklerle uyumlu biçimde korunması zorunludur. Nükleer enerjinin barışçıl kullanımına ilişkin ilkelere riayet, fiziksel koruma ve bilgi güvenliği tedbirleriyle birlikte düşünülmelidir. Sivil toplumla ilişkiler, çevresel etkilerin yönetimi ve yerel yönetimlerle koordinasyon; bu tesislerin toplumsal meşruiyeti açısından belirleyici unsurdur. Mikro-KMR'lerin konuşlandırılması; savunma planlaması, yerel kalkınma ve çevresel duyarlılık arasında dengeli bir tasarımı gerektirir.

### **Yakıt Tedarik Güvenliği ve Nükleer Güvenlik**

Millî güvenlik perspektifinden yakıt tedariki yalnızca enerji arzının sürekliliğiyle ilgili değil, aynı zamanda dışa bağımlılığın niteliği ve coğrafi/jeopolitik risklere maruziyet derecesiyle de ilgilidir. Zenginleştirme ve yakıt imalatı zincirinde küresel kapasitelerin dağılımı, tedarik anlaşmalarının koşulları ve lojistik hatların güvenliği; Türkiye'nin karar alanını doğrudan etkilemektedir. KMR programı; çok kaynaklı ve uzun vadeli sözleşmeler, geri alma/geri gönderme hükümleri, nakil ve depolama güvenliği düzenekleriyle tasarlanmalıdır. Orta-uzun vadede yakıt montajı ve yardımcı bileşenlerde sınırlı da olsa yerli yetkinlik kazanımı, stratejik özerklik hedefiyle tutarlı bir istikamet sunar.

Nükleer güvenlik boyutu; malzeme ve tesislerin yetkisiz erişim, sabotaj ve sızma girişimlerine karşı korunmasını kapsar. Tasarım esaslı tehdit yaklaşımı, içeriden tehdit programları ve çok katmanlı koruma mimarisi; tesis yerleşiminden personel güvenliğine kadar bütüncül bir çerçeve gerektirmektedir. Ulusal düzenleyici çerçeveyle uluslararası güvence ve muhasebe mekanizmaları (mühürleme, malzeme hesabı, denetim) arasındaki uyum hem güvenilirlik hem de dış politika itibarı bakımından kritiktir. Güvenlik kültürünün kurumsallaşması, teknik önlemler kadar önemlidir. Zira sürdürülebilir bir KMR programı, norm ve uygulamaların içselleştirilmesine dayanmaktadır.

### **Siber-Fiziksel Güvenlik ve Süreklilik**

Nükleer tesislerde siber ve fiziksel güvenlik birbirini tamamlayan iki savunma hattıdır. Türkiye'nin dijitalleşen kritik altyapıları, endüstriyel kontrol sistemlerine yönelik tehditlerin çoğul ve karmaşık bir görünüm aldığı göstermektedir. KMR'lerde kontrol-kumanda sistemlerinin emniyet sınıfı gerekliliklerle tutarlı biçimde ayrıştırılması, ağ segmentasyonu ve tedarik zinciri güvenliği; temel prensipler olarak öne çıkar. "Bozalsa da güvenli" tasarım felsefesi, olası siber ihlallerin fiziksel emniyeti tehlikeye atmasını önleyecek pasif ve çeşitli sistem mimarilerini gerektirir.

Süreklilik, yalnızca saldırıların bertaraf edilmesi değildir. Aynı zamanda olaylardan öğrenen ve kendini yenileyen bir kurumsal kapasitenin varlığıyla da ilgilidir. Olay müdahale süreçleri, bilgi paylaşımı mekanizmaları ve bağımsız denetim; teknik tedbirlerin toplu etkililiğini artırır. Ulusal siber güvenlik çerçevesi, düzenleyici kurumun rehberleri ve işletmecinin iç standartları arasında kurulan uyum, güven inşasında belirleyicidir. Bu bağlamda insan faktörü (yetkinlik, etik, görev ayrılığı ve hesap verebilirlik) teknik düzeneklerin tamamlayıcısıdır. KMR programının başarısı, siber-fiziksel güvenliğin bir "ürün" değil, süreklilik içinde geliştirilen bir "süreç" olduğunun kabulüne ve bu anlayışın kurumsal kültüre yerleşmesine bağlıdır.

## BÖLÜM 2

## TEKNİK, EKONOMİK VE ALTYAPI GEREKSİNİMLERİ

### Tasarım Olgunluğu, Lisanslama Süreci ve Güvenlik

KMR'lerin kurulumu, ticarileşmesi ve yaygınlaşması açısından "tasarım olgunluğu ile lisanslama süreci" kritik bir rol oynamaktadır. Bu iki unsur, KMR'lerin hem güvenli hem de ekonomik biçimde enerji sistemlerine entegre edilebilmesinin temelini oluşturmaktadır. Tasarım olgunluğu; bir reaktör tasarımının teknik olarak ne kadar gelişmiş, test edilmiş ve ticarileşmeye hazır olduğunu ifade etmektedir. Bu süreç; bir fikrin AR-GE aşamasından geçerek detaylı mühendislik analizleri, güvenlik doğrulamaları, imalat kabiliyeti ve inşa edilebilirlik gibi kriterler ışığında olgun bir teknolojiye dönüşümünü kapsamaktadır.

Lisanslama ise KMR'lerin "tasarım, inşaat, işletme ve işletmeden çıkarma süreçleri" için Nükleer Düzenleme Kurumundan (NDK) alınması gereken resmî izinleri içermektedir. KMR'ler, bazı yönleriyle büyük ölçekli reaktörlerden farklılık gösterse de temel nükleer güvenlik prensiplerinden taviz verilmemektedir. Bu süreçte dünya genelinde "kural ve hedef esaslı" olmak üzere iki temel düzenleyici yaklaşım öne çıkmaktadır. Kural esaslı yaklaşım, genellikle belirli bir teknolojiye özgü katı kurallara dayanırken hedef esaslı yaklaşım, teknolojiye bağlı kalmaksızın belirlenen güvenlik hedeflerinin karşılanıp karşılanmadığını esas almakta ve daha esnek bir yapı sunmaktadır.

Uluslararası literatürde ve KMR lisanslama deneyimlerinde, hedef esaslı düzenleyici yaklaşımın; farklı KMR teknolojilerinin değerlendirilmesinde daha uygun ve uygulanabilir bir çerçeve sunduğu görüşü yaygındır. Bu çerçevede; esnek, risk temelli ve teknolojiye bağımlı olmayan bir mevzuat yapısının, KMR'lerin lisanslama sürecini hızlandırabileceği ve daha yaygın şekilde hayata geçirilebilmelerine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

KMR'lerin lisanslama ve yetkilendirme süreçleri, küresel ölçekte sınırlı bir uygulama geçmişine sahiptir. Bu alandaki deneyimin kısıtlı olmasının temel nedenlerinden biri, mevcut KMR tasarımlarının büyük kısmının türünün ilk örneği olması ve her birinin özgün mühendislik çözümleri sunmasıdır. Bu durum, düzenleyici yaklaşımlarda ülkeler arasında önemli farklılıkların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bugüne kadar lisanslanan ya da lisanslama sürecinde olan KMR örnekleri incelendiğinde, özellikle su soğutmalı reaktör teknolojisini kullanan tasarımlar için ülkelerin çoğunlukla "mevcut nükleer mevzuatlarını büyük ölçüde değiştirmeden ilerlemeyi tercih ettikleri" görülmektedir. Örneğin Çin'de inşaatı devam eden ACP100 tasarımı, ölçeği dışında mevcut basınçlı su reaktörü sistemlerine benzerliği sayesinde klasik lisanslama süreçleriyle değerlendirilmektedir. Rusya'da karasal KMR projeleri için mevzuat uyumluluğu açısından bazı düzenlemelere ihtiyaç duyulurken Fransa ve Birleşik Krallık gibi ülkelerde ise özel bir mevzuat değişikliği öngörülmemektedir. Kanada'da ise KMR'ler için kısıtlı yeni düzenlemelerin yeterli olacağı belirtilmektedir. ABD'de NuScale tasarımı için standart tasarım sertifikası verilmiş; BWRX-300 tasarımı ise alternatif bir yol izleyerek doğrudan lisanslama sürecine girmiştir. Tüm farklılıklara rağmen UAEA himayesinde KMR'ler için ortak bir düzenleyici çerçeve oluşturulmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu çerçevenin oluşturulması, KMR teknolojisinin küresel ölçekte daha hızlı ve güvenli yayılımı açısından stratejik bir adım olacaktır.<sup>18</sup>

Lisanslama sürecinde karşılaşılan belirsizliklerin giderilebilmesi için düzenleyici kurum ile tasarım sahibi ve lisans sahibi arasında, erken aşamadan itibaren etkili bir koordinasyon ve iş birliği kurulması kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca KMR'lerin modüler ve fabrikada üretilebilen yapısı göz önüne alındığında, tüm üretim ve montaj süreçlerini kapsayan yeni nesil bir denetim ve lisanslama yaklaşımının geliştirilmesi gerekebilir. Bu modelin başarıyla uygulanabilmesi yalnızca düzenleyiciler arasında değil, aynı zamanda teknoloji sağlayıcılar ve tedarik zinciri aktörleri arasında da güçlü bir eş güdüm gerektirecektir.

NDK'nin mevzuat yapısı ve yetkilendirme yaklaşımı, dünya genelindeki birçok düzenleyici otoritenin uygulamalarıyla büyük ölçüde örtüşmektedir. Bu çerçevede özellikle su soğutmalı reaktör teknolojisine dayalı KMR tasarımlarının yetkilendirilmesi sürecinin, mevzuatta kapsamlı ve köklü bir değişikliğe ihtiyaç duyulmadan yürütülebileceği değerlendirilmektedir.

Türkiye'de; KMR'lerin planlanan kurulum takvimi göz önünde bulundurularak ihtiyaçların net bir şekilde tanımlanması, önceliklendirilmesi, uluslararası gelişmelerin yakından izlenmesi ve bu çalışmalara aktif katılım sağlanması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca düzenleyici ön tasarım değerlendirme adımının oluşturulması ve bu sürecin fizibilite çalışmalarıyla eş zamanlı yürütülmesi, KMR projelerinin lisanslanabilirliğine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

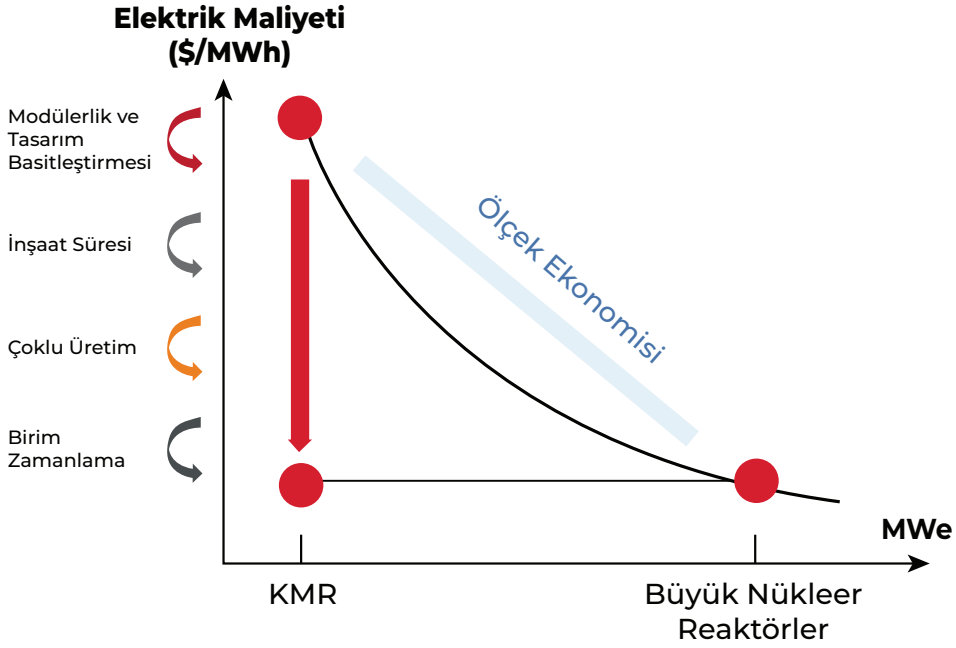
### **KMR Ekonomisi: Maliyet Değerlendirmesi ve Finansman**

Nükleer enerji santrallerinin maliyet yapısına ilişkin genel kabuller, ölçek ekonomilerinin belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Geleneksel tekno-ekonomik analizler, santral boyutu büyüdükçe elektrik üretiminde birim maliyetlerinin düştüğünü göstermektedir. Ancak bu yaklaşım, genellikle diğer tüm değişkenler sabit kabul edilerek yapılır ve KMR'lerin özgün yapısal özelliklerini yeterince yansıtmaz. Dolayısıyla KMR'lerin ekonomik ve finansal performanslarını doğru değerlendirebilmek için klasik ölçek ekonomisi modellerine ek olarak modüler yapıları ve yenilikçi tasarım unsurları da dikkate alınmalıdır.

Hafif su soğutmalı reaktörler özelinde; birçok temel parametrenin büyük ölçekli reaktörlerle benzer olması, bazı karşılaştırmaları kolaylaştırmaktadır. Ancak KMR'lerin sunduğu fabrikada üretim, kısa inşaat süresi, modülerlik, saha esnekliği ve kademeli kapasite artırımı gibi avantajlar; geleneksel yaklaşımlardan ayrılmaktadır. KMR yatırımları, doğası gereği modülerdir; bu da sermaye harcamasını zamana yayma ve projeleri talebe göre kademeli biçimde büyütme açısından önemli bir esneklik sağlamaktadır. **Özellikle ilk yatırım maliyetinin düşüklüğü ve daha kısa geri dönüş süresi, KMR'leri özel sektör yatırımları açısından cazip kılmaktadır.**

Bu avantajlara rağmen KMR'lerin birim başına kurulu kapasite maliyetinin, yani kWe başına sermaye harcamasının, büyük ölçekli reaktörlere kıyasla daha yüksek olacağı öngörülmektedir. Bu da KMR'lerin kWh bazındaki elektrik üretim maliyetlerini artırabilmektedir. Söz konusu durumu dengeleyebilmek için aynı sahada birden fazla ünitenin seri şekilde kurulması, ekonomik ölçeklerin yeniden yakalanmasını mümkün kılabilir. Kısacası, KMR ekonomisinin rekabet edebilirliği büyük ölçüde "çoklu ünite kurulumu, standartlaşma, seri üretim ve modülerliğin etkin kullanımı" ile sağlanabilecektir (bk. Grafik 1).

**Grafik 1:** KMR'ler İçin Ekonomik Etkenler



**Kaynak:** Nükleer Enerji Ajansı.

Tasarım özelliklerine ve uygulama senaryolarına bağlı olarak KMR'lerin "işletme, bakım ve yakıt maliyetleri" büyük ölçekli reaktörlerle karşılaştırıldığında, daha yüksek ya da daha düşük olabilir. Örneğin uzaktan işletim için geliştirilen KMR tasarımları, seyrek yakıt ikmali ihtiyacı sayesinde iş gücü ihtiyacını azaltabilir. Bu durum da doğrudan işletme maliyetlerinde tasarruf anlamına gelmektedir. Ayrıca tasarım standardizasyonu, modüler üretim süreçleri ve artan işletme deneyimi; zamanla bu maliyetlerin daha da düşürülmesini sağlayacaktır.

İşletmeden çıkarma ve radyoaktif atık yönetimi gibi (düşük, orta ve yüksek seviyeli atıklar dâhil) uzun vadeli maliyet kalemleri ise kullanılan teknolojiye göre önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Bununla birlikte bazı işletme ve bakım unsurlarının, reaktörün boyutuna orantılı olarak azalmadığı gözlemlenmektedir. Söz konusu durum, birim kapasite başına düşen işletme maliyetlerinin büyük ölçekli reaktörlere kıyasla daha yüksek olmasına neden olabilir. Tüm teknik zorluklara yönelik, çeşitli mühendislik çözümleri geliştirilmektedir. Ancak bu çözümlerin toplam maliyet üzerindeki etkisi, yalnızca teknolojik gelişmişlik seviyesiyle değil; aynı zamanda düzenleyici çerçeve, kurumsal uygulamalar ve ulusal lisanslama stratejileriyle olan etkileşim düzeyiyle de doğrudan ilişkilidir.

Maliyetlerin değerlendirilmesi, seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin bulunması ve senaryoların değerlendirilebilmesi için standart kabuller ile "Nuscale (VOYGR-4), VBER-300, BWRX-300, i-SMR ve ACP100 su soğutmalı reaktörleri" için Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti (KKTC) özelinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir.<sup>19</sup> Bu çalışmada, ölçeklendirme ilkeleri ve özgün yaklaşımlar kullanılarak gecelik yatırım maliyetleri bulunmuş; işletme ve bakım, yakıt çevrimi, radyoaktif atık, işletmeden çıkarma da

dikkate alınarak elektrik üretim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlara göre gecelik yatırım maliyetleri kWe başına en düşük 6,6 dolar, en yüksek ise 8,2 dolar; LCOE'de ise en düşük 122,99 \$/MWh, en yüksek 152,25 \$/MWh olarak hesaplanmıştır. Dokuz değişken ile  $\pm 25$ 'lik değişimin etkileri üzerinden duyarlılık analizi yapılmıştır. Tüm parametreler kabul edilen durumdan %25 daha düşük olduğunda, LCOE %41 azalırken tüm parametreler %25 daha yüksek olduğunda LCOE'nin %63 arttığı görülmüştür.

Uzak bir bölgede (yerleşim yeri ya da endüstriyel bir tesis için) KMR kurulumu; kendine özgü tasarım, lojistik ve ekonomik değerlendirmeleri beraberinde getirmektedir. Özellikle erişimi zor olan bölgelerde inşaat faaliyetleri; genellikle yüksek işçilik maliyetleri, artan lojistik ve taşıma giderleri, işçi konaklama alanlarının kurulması gibi ilave altyapı ihtiyaçları ve zorlu iklim koşullarına dayanabilecek özel malzeme ve ekipman gereksinimleri nedeniyle önemli maliyet kalemleri oluşturmaktadır. Ancak bu zorluklar, yalnızca nükleer projelere özgü değildir; benzer zorluklar diğer enerji üretim teknolojileri için de geçerlidir.

KMR'lerin söz konusu zorlukları dengeleyebilecek önemli bir avantajı, uzak bölgelere yüksek kaliteli buhar sağlayabilme yetenekleridir. Bu sayede kojenerasyon uygulamaları mümkün olmakta ve enerji üretimi, elektrik ile sınırlı kalmayarak yerel ekonomiye çok yönlü katkılar sunmaktadır. Dolayısıyla **KMR'ler zorlu coğrafyalarda dahi enerji arzı güvenliği ile ekonomik kalkınma açısından bütüncül çözümler sunma potansiyeline sahiptir.**

Nükleer enerji santrali projeleri; yüksek sermaye gereksinimi ve uzun yatırım geri dönüş süresi nedeniyle yaşam döngüsünün farklı evrelerinde, farklı finansman yöntemlerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Projelerin ilk aşamalarında, belirsizlik ve teknik risklerin daha yüksek olması nedeniyle genellikle öz sermaye finansmanı tercih edilirken proje ilerledikçe daha düşük maliyetli borç finansmanı ön plana çıkmaktadır. Bu finansman tercihleri, yatırım ortamı ve sermayenin maliyetine bağlı olarak da farklılık gösterebilmektedir.

Bugüne kadar başarılı şekilde hayata geçirilen birçok nükleer proje, devletlerin çeşitli düzeylerde sağladığı desteklerle mümkün olmuştur. Bu destekler; doğrudan kamu sermayesi yatırımları, vergi teşvikleri, borç veya gelir garantileri gibi mekanizmalar aracılığıyla sağlanmıştır. Kamu sektörünün daha düşük borçlanma maliyetine sahip olması; ihracat kredileri ve devletler arası borç anlaşmaları gibi uygun finansman kaynaklarına erişimi kolaylaştırmaktadır. Ancak yalnızca kamu bütçesiyle finanse edilen projelerde, zaman zaman etkin olmayan proje yönetimi ve buna bağlı maliyet artışları yaşanabildiği de bilinmektedir.

Nükleer yatırımların tipik olarak uzun vadeli geri dönüş süresi sunması, özel sektör açısından ciddi bir finansal risk oluşturmaktadır. Özellikle son yıllarda yaşanan takvim sapmaları ve maliyet aşımı gibi olumsuz örnekler, özel sektörün tek başına yatırım yapmasını daha da zorlaştırmıştır. KMR'ler; daha kısa inşaat süreleri, modüler tasarımları, fabrikada üretim imkânı ve daha düşük ilk sermaye gereksinimleri sayesinde yatırım risklerini azaltan bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Söz konusu özellikleriyle özel sektör için daha cazip olması beklenmektedir. Ancak yatırımın geri dönüş süresinin uzunluğu ve elektrik piyasasındaki fiyat belirsizlikleri gibi temel riskler, KMR'ler için de geçerliliğini korumaktadır.

Bu nedenle KMR'lerin ilk örneklerinin yalnızca özel sektör sermayesiyle herhangi bir kamu desteği olmadan finanse edilmesi, kısa vadede pek olası görünmemektedir. Projelerin ilerleyişine ve teknolojinin olgunlaşmasına bağlı olarak bu yaklaşım, zamanla değişebilir.

Dünyada nükleer enerji projelerinde; farklı ihtiyaçlara ve risk yapılarına göre çeşitli finansman modelleri uygulanmakta veya önerilmektedir. Bu modeller arasında; devlet finansmanı, tedarikçi finansmanı, kurumsal finansman, proje finansmanı, ihracat kredileri, mankala modeli, RAB, santral sahipliği ve kamu-halk iş birliği gibi seçenekler öne çıkmaktadır. Ancak Türkiye'de kurulması planlanan KMR projeleri için detaylı bir finansman modelinin belirlenmesi, mevcut aşamada mümkün görünmemektedir. Bunun temel nedeni, yatırım sürecinin çok sayıda teknik, ticari ve düzenleyici değişkene bağlı olarak şekillenecek olmasıdır. "İklim Kanunu" kapsamında karbon vergisi, emisyon ticareti ve benzeri yenilikçi ödüllendirme mekanizmalarının alım garantileriyle entegre edilmesinin, KMR projelerinin ekonomik cazibesini önemli ölçüde artırabileceği düşünülmektedir.

Bu doğrultuda, öncelikli olarak aday KMR tasarımlarına yönelik kapsamlı ön fizibilite çalışmaları yapılmalı, teknoloji sağlayıcıların Türkiye'ye özel sunacağı iş modeli önerileri dikkatle incelenmeli ve potansiyel özel sektör yatırımcılarının beklentileri değerlendirilmelidir. Bu çalışmalar sonucunda, yatırımcı yapısının netleşmesiyle birlikte Türkiye için en uygun finansman modelinin belirlenmesi daha sağlıklı ve gerçekçi olacaktır. Son dönemde dünya genelinde uygulanan nükleer enerji finansman modellerine ilişkin bazı örnekler, Tablo 1'de özetlenmiştir.<sup>20</sup>

**Tablo 1: Son Dönemde Kullanılan Nükleer Finansman Modellerinin Özeti**

| Finansman Modeli                                                      | Nitelikler ve Risk Faktörlerinin Dağılımı                                                   | Bildirilen Model Kullanımı                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Oran bazlı, kredi garantileri, tanımlanmış farklar için sözleşme      | Dağıtılmış ancak çoğunlukla ticari, yatırımcı ve devlet desteğine bağlı                     | ABD, Vogtle sahası                                                                   |
| Düzenlenmiş varlık tabanı                                             | 1 numaralı modele benzer                                                                    | Sizewell C sahası                                                                    |
| Mankala modeli                                                        | Azaltılmış risk, kâr/temettü yerine üretim öncelikli, hissedarlar üretim kapasitesine sahip | Finlandiya, çeşitli enerji altyapıları                                               |
| Enerji satın alma anlaşmaları                                         | Elektrik alıcılarına dağıtılmış, tahmini ihtiyaçlara dayalı, devlet desteği alır            | Bazı ABD KMR tedarikçileri                                                           |
| Kısmen açıklanmış veya açıklanmamış devlet kredileri (şeffaf olmayan) | Devlet, riskleri üstlenir (test, gösterim, ticari olmayan reaktörleri içerir)               | Çin, Rusya, Arjantin, Güney Kore, Fransa, ABD, Japonya'daki ulusal reaktör projeleri |

## **KMR Pazar Potansiyeli**

KMR'lerin küresel pazarda, önümüzdeki yıllarda güçlü bir büyüme ivmesi yakalayacağı genel bir öngörüdür. Daha düşük sermaye gereksinimi, saha seçimi açısından esneklik, elektrik dışı uygulamalara uygunluk, fabrikada üretim imkânı ve modüler yapıları sayesinde KMR'ler; daha geniş ve çeşitli bir yatırımcı kitlesine hitap edebilecek potansiyele sahiptir. Bu özellikleri, yerli sanayi açısından da yüksek katma değerli iş fırsatları sunmaktadır. Türkiye'nin bu alanda önemli bir pazar oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu potansiyelin gerçeğe dönüşebilmesi için "KMR teknolojilerinin lisanslanabilirliğinin kanıtlanması, ticari uygulanabilirliğinin gösterilmesi ve yerleştirme imkânlarının somut olarak ortaya konulması" gerekmektedir. Bu alanlardaki başarı hem yerli yatırımcılar hem de uluslararası paydaşlar açısından güven artırıcı bir unsur olacaktır.

Elektrik üretimi dışında KMR'lerin "desalinasyon, hidrojen ve sentetik yakıt üretimi ile endüstriyel ısı temini" gibi yenilikçi uygulamalarda da pazar payı oluşturabileceği öngörülmektedir. **Özellikle yakın coğrafyalarda (bilhassa Afrika'da yer alan ülkelerle) kurulabilecek bölgesel iş birlikleri, ihracat pazarları açısından stratejik fırsatlar sunmaktadır.** Bu potansiyelin etkin biçimde değerlendirilmesi, Türkiye'de nükleer enerji yatırımlarını destekleyen uzun vadeli ve bütüncül enerji politikalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca güçlü bir yasal ve düzenleyici çerçeve oluşturulmalı, yatırımcıyı teşvik edecek finansal ve yapısal mekanizmalar devreye alınmalı ve tüm paydaşlar arasında roller ve sorumluluklar açık bir şekilde tanımlanmalıdır.

## **Yerli Üretim ve İnsan Kaynağı**

Nükleer enerji sektörünün özgün ihtiyaçları doğrultusunda devlet destekleriyle sağlanacak yapısal ilerlemeler, santral projelerinde yerli ürün ve hizmet kullanımını artırarak hem sektörel derinleşmeye katkı sunacak hem de petrokimya, madencilik, demir-çelik ve denizcilik gibi stratejik sektörlerde olumlu yansımalar yaratacaktır. Bu gelişmelerin; uzun vadede Türkiye'nin ihracat kapasitesini artırması, ithalat bağımlılığını azaltması ve cari açığın düşürülmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Nükleer güç santrali projelerinin baştan sona etkin, sürdürülebilir ve verimli bir şekilde geliştirilebilmesi için kapsamlı bir yerleştirme stratejisinin oluşturulması zorunludur. Söz konusu strateji kapsamında, Türkiye'de hayata geçirilmesi planlanan nükleer enerji projelerinde; yerli katkının sağlanabileceği alanların ayrıntılı şekilde analiz edilmesi, ihtiyaç duyulan yatırım miktarlarının belirlenmesi ve yerleşmeyi destekleyecek uygun iş modellerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çerçevede nükleer güç santralinin yaşam döngüsü boyunca "inşaat ve montaj, ekipman üretimi, tasarım ve mühendislik, işletme ve bakım, yakıt temini, kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık yönetimi ile işletmeden çıkarma süreçleri" dikkatle değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda ilgili kurumlar tarafından kapsamlı yerleştirme strateji belgeleri hazırlanmakta ve güncellenmektedir.

KMR'ler; büyük ölçekli reaktörlerden farklı olarak modüler yapıları ve fabrikasyon temelli üretim süreçleriyle yerleşme ve teknoloji transferi açısından hem fırsatlar hem de zorluklar barındırmaktadır. **Türkiye'nin bu teknolojiyi etkin bir şekilde benimsemesi; doğrudan tasarım ortağı olması veya kendi sınırları içinde modül üretim tesisleri kurmasıyla mümkündür.** Aksi hâlde KMR modüllerinin

tamamının yurt dışında üretilmesi durumunda, yerli sanayinin katılım oranı oldukça düşük kalacak ve teknolojik kazanım sağlanamayacaktır. Bu durum, ulusal sanayileşme hedefleri açısından önemli bir dezavantaj oluşturacaktır. Bununla birlikte KMR'lerin daha sade tasarımı, küçük boyutlu bileşenlerden oluşması ve yüksek oranda standardizasyona dayalı olması; tasarımın öğrenilmesini ve imalat süreçlerinin yerlileştirilmesini nispeten kolaylaştırmaktadır. Bu bağlamda kapsamlı bir yerlileştirme stratejisi ve ölçek ekonomisinden yararlanmak amacıyla sınırlı sayıda KMR tasarımına odaklanılarak bir filo yaklaşımı benimsenmesi, stratejik bir tercih olacaktır. Türkiye'nin bu yönde ilerleyebilmesi için yerli modül imalat altyapısının kurulması, ilgili sektörlerde tedarikçi firmaların yetkinliklerinin artırılması ve insan kaynağının geliştirilmesi yönünde kapsamlı yatırımlar yapılması gerekmektedir.

KMR teknolojisinin Türkiye'de etkin bir şekilde geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması açısından işletme ve bakım süreçlerine yönelik nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesi ile gerekli altyapı ve ek yatırımların yapılması, yerlileşme hedeflerine ciddi katkılar sağlayacaktır. Bununla birlikte stratejik öneme sahip olan ve ileri düzey teknoloji yetkinliği gerektiren nükleer yakıt çevriminin, özel bir yatırım ve uzun vadeli planlama çerçevesinde yerli imkânlarla gerçekleştirilmesi hedeflenmelidir. KMR'lere özgü bir yerlileştirme stratejisinin oluşturulması, bu çerçevede AR-GE ve ÜR-GE faaliyet alanlarının tanımlanması, potansiyel üretim ve montaj tesislerinin fizibilitesinin değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda teknoloji sağlayıcılarla stratejik ortaklıklar kurularak hem tedarikçi ekosisteminin güçlendirilmesi hem de risklerin paylaşılması sağlanmalıdır. Bu ortaklıklar aracılığıyla yerli firmalara bilgi ve teknoloji transferinin gerçekleştirilmesi, insan kaynağının eğitilmesi ve süreçlerin birlikte geliştirilmesiyle yerlileştirme süreci hızlandırılmalıdır.

KMR projelerinin henüz hayata geçirilmemiş olması, bu teknolojiye özgü insan kaynağı ihtiyacının detaylı bir şekilde analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Ancak büyük ölçekli nükleer güç santrali (NGS) projelerinden elde edilen deneyimlerden yola çıkarak bazı tahminlerde bulunmak mümkündür. KMR'lerin modüler yapısı ve sistem bileşenlerinin büyük ölçüde fabrikada üretilmesi; sahadaki inşaat ve montaj sürecinde ihtiyaç duyulan insan gücünü, büyük ölçekli NGS projelerine kıyasla önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna karşın modüler bileşenlerin fabrikada üretimi sürecinde, yüksek nitelikli teknik personel ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca ölçek farkı nedeniyle KMR'lerin işletme ve bakım süreçlerinde, birim elektrik üretimi başına düşen insan kaynağı ihtiyacının büyük ölçekli reaktörlerden daha yüksek olacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla her iki reaktör türü arasında bazı yapısal farklar olsa da insan kaynağı gelişimi açısından bu teknolojiler, birbirinden bağımsız düşünülmemelidir; planlama, eğitim ve kapasite geliştirme süreçleri entegre ve eş güdümlü olarak ele alınmalıdır.

## **İnşaat ve İşletme**

KMR projelerinde, inşaat ve kurulum süreçlerinin verimli ve güvenli bir şekilde yürütülmesi için tercih edilen en yaygın yöntemlerden biri Anahtar Teslim Sözleşme (EPC, Engineering, Procurement, Construction) modelidir. KMR'lerin modüler yapısı ve fabrikada ön üretime olanak tanıyan tasarımı sayesinde, sahada yapılacak inşaat işlerinin önemli ölçüde azalmasıyla EPC risklerinin düşmesi beklenmektedir. EPC konsorsiyumu içinde yerli firmaların yer alması, yalnızca ekonomik katkı açısından değil,

aynı zamanda teknoloji transferi ve yerileştirme stratejileri açısından da kritik bir önemdedir. Bu katılım, uzun vadede nükleer alanda ulusal yetkinlik oluşumuna doğrudan katkı sağlayacaktır. Uzun dönemli operasyonel süreçler için (işletme, bakım, yakıt tedariki, işletmeden çıkarma ve atık yönetimi gibi) uzmanlaşmış, merkezî işletme şirketlerinin kurulması önerilmektedir. Bu şirketler; lisanslı personel istihdamı, bilgi birikiminin korunması ve operasyonel verimliliğin sağlanması açısından avantaj sunacaktır.

Büyük ölçekli reaktörler ile KMR'ler arasında inşaat, işletme ve yakıt tedarik modellerinde teknik farklılıklar bulunsa da bu iki sistem, altyapı yatırımları ve insan kaynağı kullanımı açısından birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Bu nedenle KMR'ler ve büyük ölçekli reaktörlerin entegre bir nükleer enerji stratejisinin parçaları olarak ele alınması gerektiği değerlendirilmektedir. Son olarak farklı ülkelere ait teknoloji sağlayıcılarının projeye dâhil olması durumunda ise Türkiye'de kurulacak KMR'lerde standart işletme dilinin Türkçe veya Türkçe-İngilizce olarak belirlenmesi hem güvenli iletişim hem de insan kaynağı entegrasyonu açısından önemlidir.

### **Yakıt, Atık Yönetimi ve İşletmeden Çıkarma**

Nükleer santrallerin güvenli ve sürdürülebilir işletimi açısından, nükleer yakıt tedarik zincirinin sürekliliği stratejik bir önceliktir. Bugün yaygın olarak uygulanan model, reaktör tasarımına özel yakıt üreten teknoloji sağlayıcılarıyla uzun vadeli tedarik anlaşmalarının yapılmasıdır. Ancak Türkiye'nin hem büyük ölçekli reaktörler hem de KMR'leri kapsayan 20 GWe'lik nükleer kapasite hedefi dikkate alındığında, yakıt tedarikinde dışa bağımlılığın azaltılması ve sürecin millileştirilmesi kritik bir hâle gelmektedir. **Bu bağlamda, yerli bir nükleer yakıt şirketinin kurulması ve bu şirketin seçilecek reaktör tiplerine uygun yakıt üretim altyapısına sahip olması önemlidir.** Farklı teknolojilere ait yakıt gereksinimlerinin karmaşıklığı göz önüne alındığında, benzer yakıt tiplerine sahip sınırlı sayıda tasarımın tercih edilmesi, bu süreci daha yönetilebilir kılacaktır. Söz konusu yerli yakıt kuruluşu, kamu mülkiyetinde ya da kamu-özel sektör ortaklığı modeliyle uluslararası deneyime sahip firmalarla iş birliği içinde yapılandırılabilir. Yakıt stratejisi belirlenirken yalnızca KMR'ler değil, tüm nükleer enerji filosu bütünsel bir bakışla değerlendirilmelidir.

Kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık yönetimi, tesisin tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen konuların başında gelmektedir. Türkiye'nin nükleer enerji yatırımlarının ülke geneline yayılması öngörüldüğünden, bu atıkların güvenli biçimde yönetilebilmesi için merkezî ve entegre bir yapıya ihtiyaç vardır. Bu çerçevede atıkların geçici depolanması, taşınması ve nihai bertarafından sorumlu olacak bir ulusal atık yönetimi kuruluşunun olması kaçınılmaz görünmektedir. Bu yapı, tamamen kamuya ait olabileceği gibi kamu-özel sektör ortaklığı modeliyle de organize edilebilir. Kurumun hem büyük ölçekli reaktörlere hem de KMR'lere hizmet verecek şekilde kapasite ve uzmanlığa sahip olması gerekir. Uzun vadeli bertaraf çözümleri için yer belirleme, mühendislik tasarımı ve mevzuat çalışmaları gecikmeden başlatılmalıdır.

İşletmeden çıkarma, nükleer tesisin daha kurulma aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer kritik başlıktır. KMR'lerin modüler tasarımı ve öğrenme eğrisine katkı sağlayan filo yaklaşımı;

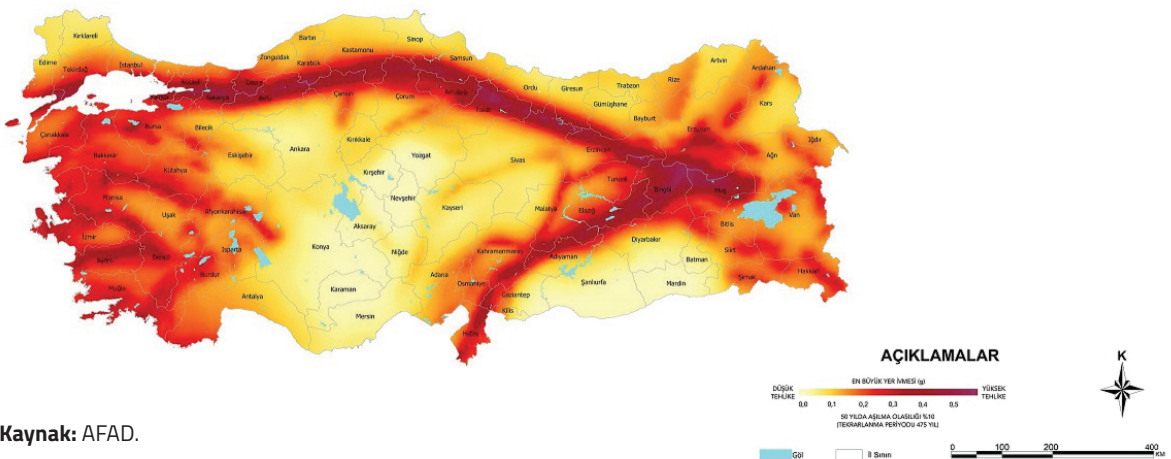
bu reaktörlerin söküm süreçlerini büyük ölçekli reaktörlere kıyasla “daha basit, hızlı ve maliyet açısından daha yönetilebilir” hâle getirebilir. Türkiye’de yaygın bir nükleer altyapı hedefleniyorsa işletmeden çıkarma faaliyetlerini planlayacak ve yürütecek bir organizasyon yapısının bugünden kurgulanması gerekmektedir. Bu alandaki görev sadece teknik değil; aynı zamanda ekonomik, düzenleyici ve çevresel boyutlarıyla da stratejik planlama gerektirmektedir.

## Doğal Afetler ve Saha Seçimi

KMR’lerin kurulacağı sahaları belirleme süreci, doğal afet risklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini gerektiren stratejik bir adımdır. KMR’ler; pasif güvenlik sistemleri, kompakt/dayanıklı yapıları, yer altına kurulabilme potansiyeli ve kazaya dayanıklı yakıt teknolojileri sayesinde büyük ölçekli reaktörlere kıyasla doğal afetlere karşı daha esnek çözümler sunabilmektedir. Ancak bu avantajlar, saha seçimi sürecinde dikkatli mühendislik ve risk analizlerinin yapılması gerekliliğini ortadan kaldırmamaktadır.

Deprem, hidrolojik riskler (sel, taşkın), aşırı hava olayları, zemin yapısı ve çevresel etkiler gibi kriterler doğrultusunda saha güvenliği, öncelikli olarak değerlendirilmelidir. Türkiye gibi yüksek sismik aktiviteye sahip bir ülkede, özellikle sismik dayanıklılık analizleri ve uzun vadeli güvenlik stratejileri kritik bir önemdedir. Türkiye, aktif fay hatlarının yoğunluğu nedeniyle nükleer reaktör kurulumu için uygun saha bulma açısından kısıtlı seçeneklere sahiptir. Bu durum göz önüne alındığında; Ege bölgesi için en az 0,6-0,7 g, Bursa çevresi için 0,7-0,8 g ve İzmit için 0,9 g ve üzeri PGA (maksimum yer ivmesi, peak ground acceleration) değerleri tespit edilmiştir (bk. Harita 1).<sup>21</sup> Bu veriler doğrultusunda, Trakya’nın kuzey kesimi dışında Ege ve Marmara bölgelerinin KMR yerleşimi açısından uygun olmayabileceği değerlendirilmektedir. Belirtilen PGA değerleri 2475 yıllık periyoda göre hesaplanmış olup 10 bin yıllık analizler yapıldığında, uygun saha seçeneklerinin daha da daralacağı öngörülmelidir. Özellikle belirtilen bölgeler dışındaki sahalara için KMR’lerin gelişmiş güvenlik tasarımları, Türkiye özelinde güvenilir bir alternatif oluşturabilir.

**Harita 1:** Türkiye Deprem Tehlike Haritası



**Kaynak:** AFAD.

KMR'lerin iletim şebekesinden uzak bölgelerde veya enerji yoğun sanayi bölgelerinde konumlandırılabilir olması, büyük ölçekli reaktörlere kıyasla saha seçiminde daha fazla esneklik sağlamaktadır. Bununla beraber ömrünü tamamlamış kömür santrallerinin mevcut altyapısı, KMR'ler için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu sahalar; enerji dönüşümü, karbon emisyonunun azaltılması ve maliyet avantajı açısından yeniden değerlendirilme potansiyeline sahiptir. Yine de bu esneklik, güvenlik standartlarından herhangi bir taviz verilmesini gerektirmez. Bu doğrultuda saha değerlendirmelerinde yalnızca teknik uygunluk değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal kabul de dikkate alınmalıdır.

UAEA'nın SSG-35 kılavuzu uyarınca saha belirleme, iki temel aşamadan oluşmaktadır: saha seçimi ve saha değerlendirmesi. Türkiye'de saha seçim süreci, düzenleyici denetime tabi olmamakla birlikte belirlenen sahalar için NDK'den saha onayı ve hazırlık izni alınması gereklidir. Mevzuat, KMR'ler için özel bir düzenleme içermemektedir. Dolayısıyla hâlihazırda büyük ölçekli reaktörler için geçerli olan kriterler, KMR'ler için de geçerli sayılmaktadır.

Bugüne kadar farklı kurumlar tarafından yapılan çalışmalarla Türkiye'de potansiyel nükleer saha bölgeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalarda deprem riski, aktif fay hatlarına uzaklık, su kaynaklarının mevcudiyeti ve yerleşim yerlerine olan mesafe gibi kriterler esas alınmıştır. KMR'lerin potansiyel kurulum alanları olarak mevcut kömür santrali sahaları, hibrit enerji bölgeleri ve organize sanayi bölgeleri de değerlendirilmektedir. Saha geliştirme çalışmalarının mülkiyeti ve yürütülmesi konusunda üç temel senaryo öne çıkmaktadır:

1. çalışmaların kamu tarafından yapılması ve ardından özel sektöre devredilmesi,
2. kamunun hem saha geliştirme hem de projeye ortak olarak katılması,
3. saha çalışmalarının doğrudan yatırımcı özel sektör tarafından gerçekleştirilmesi ve kamunun yalnızca düzenleyici rolde bulunması.

Saha belirleme süreci; detaylı analizler ve zamana yayılan bir çalışma gerektirdiğinden, potansiyel sahaların erkenden tespit edilmesi ve uygun alanlar için fizibilite çalışmalarının ivedilikle başlatılması gerekmektedir. Bu erken adımlar, ileride yaşanabilecek gecikmeleri ve yatırım belirsizliklerini azaltacaktır.

## **Denizaltı ve Uçak Gemilerinde Nükleer Güç Kullanımı**

Nükleer enerji teknolojisi, karasal uygulamalar için geliştirilmiş olsa da kompakt tasarımlar, düşük güç kapasiteleri ve yüksek güvenlik standartlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, denizaltılar ve uçak gemileri gibi askerî deniz platformlarında kullanımı, uzun yıllardır başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Aslında nükleer güçle çalışan ilk reaktörlerin askerî amaçla özellikle denizaltılarda kullanılmak üzere geliştirildiği bilinmektedir. 1950'li yıllarda ABD'nin geliştirdiği USS Nautilus (SSN-571) adlı ilk nükleer denizaltı, bu alandaki teknolojik dönüşümün başlangıç noktası olmuştur.<sup>22</sup> Nükleer güç, bu araçlar için yalnızca yüksek verimli bir enerji kaynağı değil; aynı zamanda uzun menzil, azami gizlilik ve stratejik dayanıklılık açısından kritik bir avantaj sunmaktadır.

Nükleer denizaltılar günümüzde ABD, Rusya, Birleşik Krallık, Fransa, Çin ve Hindistan gibi ülkelerin donanmalarında aktif olarak kullanılmaktadır. Bu platformlar; dizel-elektrik denizaltılarına kıyasla sınırsız menzil, uzun süreli su altı seyri, daha yüksek hız kapasitesi ve yüksek güç yoğunluğu gibi önemli teknik üstünlükler sağlamaktadır. Hâlihazırda dünya genelinde bu altı ülkenin yaklaşık 120-130 nükleer denizaltıya sahip olduğu tahmin edilmektedir.<sup>23</sup> Bu denizaltılar arasında en dikkat çekenlerden biri, Rusya donanmasına ait olan Typhoon (Akula) sınıfı balistik füze denizaltılarıdır. Her biri 190 MWth termal güce sahip OK-650 tipi basınçlı su reaktörüyle donatılan bu platformlar, yüksek güç üretimi ve uzun süreli görev yetenekleriyle ön plana çıkmaktadır. Bu reaktörlerin sunduğu güvenilirlik ve operasyonel süreklilik, nükleer enerjinin askerî deniz platformlarında neden vazgeçilmez bir seçenek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

**Fotoğraf 3:** Rus Akula Sınıfı Nükleer Denizaltı



**Kaynak:** Nationalinterest.org.

NÜKDEN gibi girişimlerin, Türkiye'nin uzun vadeli nükleer teknoloji vizyonu açısından askerî ve sivil uygulamalar arasında sinerji yaratabileceği düşünülmektedir. Türkiye'nin güvenliği, caydırıcılığı, yetki ve ilgi sahaları ile bu sahalarda icra edilmesi gereken faaliyetler; millî uçak gemisinin bulunacağı görev gruplarına verilmesi gereken destek dikkate alındığında, nükleer denizaltıya sahip olmak bir zorunluluk olarak görülmektedir. **Millî Denizaltı (MİLDEN) sonrası, kısa vadede NÜKDEN Projesi'nin hayata geçirilmesi maksadıyla bugünden itibaren konuya, ilgili tüm millî güç unsurlarıyla birlikte odaklanılmasının stratejik bir önem arz ettiği değerlendirilmektedir.**

Uçak gemileri, denizcilik tarihinde inşa edilmiş en büyük ve enerji yoğun platformlardan biridir. Bu gemilerin operasyonel ihtiyaçları; yüksek miktarda enerji gerektiren radar sistemleri, elektromanyetik katapultlar, uçuş güvertesi operasyonları ve yüksek hızlarda uzun süre seyir kabiliyeti gibi unsurları içermektedir. Bu nedenle nükleer güç, uçak gemileri için benzersiz avantajlar sunmaktadır. Sınırsız operasyonel menzile, sürekli yüksek güç çıkışı ve sık yakıt ikmaline olan ihtiyacın ortadan kalkması; nükleer tahrikin sağladığı başlıca kazanımlardır.

Günümüzde yalnızca ABD ve Fransa, nükleer tahrikli uçak gemilerini aktif olarak kullanmaktadır. Toplam 12 nükleer uçak gemisi bulunmakta olup bunların 11'i ABD donanmasına, 1'i ise Fransa donanmasına aittir. ABD'nin Nimitz sınıfı ve daha gelişmiş Gerald R. Ford sınıfı uçak gemileri ile Fransa'nın Charles de Gaulle adlı gemisi, bu alandaki en gelişmiş örnekler arasında yer almaktadır. Özellikle Gerald R. Ford sınıfı gemiler, iki adet Bechtel A1B tipi basınçlı su reaktörüyle donatılmış olup 600 MWth termal güç üretme kapasitesine sahiptir. Bu yüksek güç, geminin tüm sistemlerinin uzun süre boyunca yakıt ikmal gereksinimi olmadan çalışmasını mümkün kılmaktadır.<sup>24</sup>

**Fotoğraf 4:** Fransız Uçak Gemisi Charles de Gaulle



**Kaynak:** French Navy.

Nükleer tahrikli askerî gemiler, teknolojik karmaşıklıkları ve stratejik öncelikleri nedeniyle lisanslama ve denetim süreçlerinde tamamen farklı bir yaklaşıma tabidir. Bu tür gemilerin nükleer güvenlik ve emniyet düzenlemeleri, genellikle ilgili ülkenin savunma bakanlığına bağlı özel birimler veya deniz kuvvetleri içinde oluşturulmuş teknik otoriteler tarafından yürütülmektedir. Örneğin ABD donanması bünyesindeki Naval Reactors Office, bu yetkilere sahiptir. Bu durum; sivil nükleer reaktörlerde olduğu gibi ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC, USA Nuclear Regulatory Commission) ve NDK gibi bağımsız ve şeffaf bir düzenleyici kurumun, doğrudan müdahil olmasını beklenemez kılmaktadır. Bunun temel nedeni; söz konusu askerî reaktör sistemlerinin tasarımlarının, operasyonel prosedürlerinin ve güvenlik protokollerinin askerî sır niteliği taşımasıdır.

ABD’de nükleer tahrikli askerî gemilerin güvenliği ve denetimi, Enerji Bakanlığı ile Donanma Bakanlığı arasında oluşturulan özel bir yapı olan Naval Reactors birimi tarafından yürütülmektedir. Bu yapı; reaktörlerin tasarımı, inşası, işletilmesi ve güvenliği konularında tam yetkilidir. Benzer şekilde nükleer denizaltı veya uçak gemisine sahip olan Rusya, Fransa, Birleşik Krallık, Çin ve Hindistan gibi ülkeler de bu sistemlerin yönetimini savunma bakanlıkları ya da doğrudan donanma bünyesindeki özel birimler aracılığıyla sürdürmektedir. Bu birimler, sivil nükleer düzenleyicilerden bağımsız olarak askerî operasyonel ihtiyaçlara uygun şekilde özel güvenlik ve lisanslama standartları geliştirmekte ve uygulamaktadır.<sup>25</sup>

UAEA, ağırlıklı olarak sivil nükleer tesisleri izlemekte olup nükleer tahrikli askerî gemiler, Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması’nın (NPT) askerî kapsam dışı hükümleri gereği, bu denetimlerin dışında tutulmaktadır. Ancak buna rağmen nükleer güçle çalışan gemilerin, uluslararası sularda güvenli ve barışçıl kullanımına yönelik bazı ilke ve iş birliği mekanizmaları, UAEA ve üye devletler arasında geliştirilmiştir.<sup>26</sup>

## BÖLÜM 3

## MEVZUAT, PAYDAŞ KATILIMI VE İŞ BİRLİKLERİ

### Mevzuatın Kapsamı ve Gerekli Düzenlemeler

KMR'ler, sundukları yenilikçi özelliklere rağmen dünya genelinde kapsamlı ve özel bir mevzuat yapısına kavuşamamıştır. Bunun temel nedeni; birçok KMR tasarımının hâlihazırda lisanslı olan büyük ölçekli su soğutmalı reaktör teknolojilerine benzerliği ve mevcut düzenleyici çerçeveler içinde lisanslanabilir olmalarıdır. Bu yaklaşım hem lisanslama sürecini hızlandırmakta hem de belirsizlikleri azaltarak teknoloji sağlayıcılar ve yatırımcılar açısından avantaj sunmaktadır. Örneğin Çin'de ACP100 ve Birleşik Krallık'ta Rolls-Royce KMR tasarımları, mevcut mevzuatlar çerçevesinde lisanslama süreçlerini sürdürmektedir. Ancak yenilikçi ve hafif su soğutmalı olmayan (non-LWR) reaktörler için bazı ülkeler, özel düzenleyici yaklaşımlar geliştirmektedir. Öne çıkan bazı örnekler şu şekildedir:

- **ABD:** 10 CFR 50 Ek A'daki genel tasarım kriterlerinin, hafif su soğutmalı olmayan reaktörlere nasıl uyarlanabileceğini açıklayan RG 1.232 numaralı kılavuzu yayımlamıştır.
- **Fransa:** İleri Reaktör Güvenlik Çalışma Grubu aracılığıyla yeni nesil reaktörler için mevzuat geliştirme faaliyetleri yürütmektedir.
- **İsviçre:** Mevcut mevzuatın ileri reaktörlere uyarlanabileceği öngörülmekte; sürece güvenlik değerlendirmeleri, çevresel analizler ve halk katılımı da dâhil edilmektedir.
- **Finlandiya:** Geleneksel reaktörlere dayalı mevzuatını 2028 yılına kadar kademeli olarak revize ederek ileri reaktör tasarımlarını kapsayacak şekilde uyarlamaktadır.

Türkiye'de ise KMR'lere özgü bir yasal düzenleme bulunmamaktadır. Mevcut mevzuat, büyük ölçekli reaktörlere göre hazırlanmış olsa da özellikle su soğutmalı KMR tasarımları için geçerli kabul edilmekte ve önemli bir mevzuat değişikliği gerektirmeden lisanslama süreçlerinin yürütülebileceği düşünülmektedir. Ancak su soğutmalı olmayan tasarımlar için durum farklıdır. Bu tür reaktörlerin teknik yenilikleri ve tasarımsal çeşitliliği, mevzuatın yetersiz kalmasına yol açmakta ve yeni düzenlemeleri zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle belirli tasarım parametreleri yerine, güvenlik hedeflerine dayalı (ör. maruz kalınabilecek radyasyon doz limitleri, belirleyici ve olasılıksal güvenlik ölçütleri) daha esnek ve teknolojiye uyarlanabilir bir düzenleyici yaklaşımın benimsenmesi uygun olacaktır.

Nükleer enerjiyle ilgili en önemli hukuki konulardan biri, nükleer kazalar sonucunda üçüncü şahıslara verilebilecek zararların tazmin edilmesidir. Bu alan, uluslararası sözleşmelerle düzenlenmiştir. Ancak bu sözleşmeler genellikle çerçeve niteliğinde olup detaylı hükümler yerine temel ilkeleri tanımlamaktadır. Bu nedenle taraf ülkeler, söz konusu uluslararası anlaşmalar doğrultusunda kendi ulusal mevzuatlarını oluşturmakta veya güncellemektedir.<sup>27</sup>

Türkiye de bu çerçevede nükleer sorumluluk rejimini, uluslararası yükümlülüklerle uyumlu olacak şekilde düzenlemiştir. Mevzuata göre bir nükleer tesis işletenin, üçüncü taraflara karşı sorumluluğu sabitlenmiştir ve 700 milyon euro tutarında sigorta yaptırma veya teminat gösterme yükümlülüğü bulunmaktadır. Bu yükümlülük, büyük ölçekli reaktörler ve KMR'ler için aynıdır. Ancak burada önemli bir dengesizlik söz konusudur. KMR'lerin daha küçük ölçekli, düşük risk profiline sahip ve sınırlı kapasitede

tesisler olması göz önünde bulundurulduğunda, aynı sorumluluk sınırına tabi tutulmaları teknik ve ekonomik açıdan dezavantaj yaratmaktadır. Bu durum, KMR projelerinin sigorta maliyetlerini orantısız biçimde artırmakta ve ticari cazibesini azaltmaktadır.<sup>28</sup> Bu nedenle Paris Sözleşmesi gibi uluslararası düzenlemelerde yer alan risk temelli ve orantılı yaklaşım dikkate alınarak Türkiye’de ilgili yasal düzenlemenin gözden geçirilmesi ve KMR’ler için ayrı, ölçeklenebilir bir sorumluluk limiti tanımlanması uygun olacaktır. Böyle bir düzenleme, KMR yatırımlarını teşvik edici bir adım olacağı gibi nükleer güvenlik ilkelerinden de taviz verilmeden sektörün gelişimine katkı sağlayacaktır.

Mevzuatta; KMR tanımının netleştirilmesi, referans santral gerekliliği veya şartlarının tanımlanması, kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık yönetimine dair sorumlulukların ve sürecin belirlenmesi, yerileştirme ve teşvike dair yaklaşımın ve önemli diğer birçok hususun yer alması oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra bağlantı, sistem, lisanslama vb. uygulanan tarifelerin KMR’ler için değişkenlik gösterip göstermeyeceğinin mevzuatta tanımlanması, teşvik edici olarak değerlendirilmektedir. Bu unsurlar değerlendirilirken özellikle farklı olan modülerlik ve kojenerasyon esnekliği, sürecin dışında tutulmamalıdır.

### **Paydaş Katılımı**

KMR projeleri; çok sayıda farklı paydaşın eş güdümlü katılımını gerektiren karmaşık ve çok yönlü bir süreçtir. Bu projelerin başarılı olabilmesi için kamu kurumları, teknoloji sağlayıcılar, finansal kuruluşlar, sigorta şirketleri, mühendislik ve inşaat firmaları, üniversiteler, araştırma merkezleri, sivil toplum kuruluşları (STK) ve yerel halk gibi çeşitli aktörlerin katkıları kritik öneme sahiptir.

KMR projelerinin planlama, lisanslama, finansman, inşaat, işletme ve işletmeden çıkarma aşamalarında her paydaşın rolü ve sorumluluğu açık şekilde tanımlanmalı; bu aktörlerle sürekli olarak iletişim kurulmalıdır. Özellikle kamu kurumlarıyla iş birliği, izin süreçlerinin sağlıklı yürümesi açısından belirleyici olacaktır. Mevzuat, teşvikler ve altyapı desteği gibi konularda kamunun sağlayacağı katkı; özel sektörün daha güçlü bir şekilde projeye katılımını mümkün kılacaktır.

Yerel yönetimler, seçilen proje sahasının ihtiyaç duyduğu altyapıyı sağlamak ve bölgesel planlama ile uyumu gözetmek açısından önemli aktörlerdir. Ayrıca enerji, ulaşım, çevre, sağlık, tarım ve güvenlik gibi alanlarda ilgili kurumlardan alınacak resmî görüşler, saha seçiminde belirleyici olacaktır. Bu görüşlere uygun hareket edilmesi, projeye yönelik toplumsal kabulü de artıracaktır. Teknoloji sağlayıcılar; reaktör tasarımı ve modül üretiminden sorumlu olurken EPC firmaları; tesisin mühendisliği, tedariki ve inşasını üstlenir. İşletmeciler ise güvenli ve verimli işletme ile bakım, yakıt yönetimi gibi süreçleri yürütür. Bu ana aktörlerin yanı sıra bankalar, kalkınma ajansları ve yatırım fonları gibi finansal paydaşlar; projenin ekonomik sürdürülebilirliği için elzemdir.

Üniversiteler ve araştırma merkezleri; insan kaynağı gelişimi, güvenlik değerlendirmeleri ve teknoloji geliştirme gibi alanlarda destek sağlar. STK ve vatandaşlar ise sürecin sosyal boyutunda yer almaktadır. Şeffaflık, iletişim ve güven temelli bir yaklaşımla onların da katılımları teşvik edilmelidir. Etkili bir paydaş katılımı, kamuoyu desteğini artırmanın yanı sıra proje risklerini azaltarak daha kaliteli kararların

alınmasını sağlar ve finansal güvenliği güçlendirir. Modüler ve esnek yapıları sayesinde KMR'ler, yerelleştirilmiş çözümler sunmaya uygun bir modeldir. Bu durum; kapanmış termik santral sahaları, organize sanayi bölgeleri ya da iletim altyapısı zayıf bölgeler için büyük bir avantaj yaratmaktadır.

### Ulusal ve Uluslararası İş Birlikleri

KMR projeleri yalnızca teknik değil; aynı zamanda stratejik, ekonomik ve politik boyutları da olan yatırımlardır. Bu nedenle hem ulusal hem de uluslararası düzeyde güçlü iş birliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iş birlikleri; finansman sağlama, teknoloji transferini mümkün kılma, bilgi birikimini paylaşma, riskleri azaltma ve yerleşmeyi teşvik etme gibi çeşitli alanlarda projeye değer katmaktadır.

İş birliği modelleri; ortak girişim, lisanslama anlaşmaları, teknolojik konsorsiyumlar veya kamu-özel ortaklıkları gibi farklı yapılarla kurgulanabilir. Önemli olan; hedefe uygun, somut fayda sağlayan ve sürdürülebilir bir model oluşturmaktır. Başarılı iş birlikleri; yatırım maliyetlerini paylaşma, düzenleyici süreçleri kolaylaştırma, sinerji oluşturma ve daha geniş pazarlara erişim sağlama gibi birçok avantaj sunmaktadır.

KMR projelerinde; kamu kurumları, teknoloji sağlayıcı firmalar, yatırımcılar, kredi kuruluşları, sigorta şirketleri, mühendislik ve danışmanlık firmaları gibi çok sayıda paydaşın yer alması kaçınılmazdır. Projenin (tasarım, lisanslama, inşaat, işletme, bakım, yakıt yönetimi, atık yönetimi ve işletmeden çıkarma gibi) her aşaması, bu paydaşların koordineli iş birliğiyle yürütülmelidir.

Türkiye'de KMR alanında henüz olgunlaşmış bir teknik kapasite bulunmasa da nükleer enerji ve ağır sanayi alanında tecrübeli birçok yerli firma mevcuttur. Bu firmalar; saha karakterizasyonu, mühendislik hizmetleri, belirli imalat kalemleri ve inşaat faaliyetlerinde aktif rol üstlenebilecek potansiyele sahiptir. Kamu şirketlerinin bu süreçlere dâhil edilmesi de stratejik bir öneme sahiptir. Uluslararası iş birliklerinde, teknoloji transferine açık ve ihracat lisansı verebilecek ülkelerle çalışılması kritik olacaktır. Teknoloji transferi kapsamında; lisans alımı, yerli ortaklık kurulması, şirket satın alımı ya da doğrudan AR-GE iş birlikleri gibi adımlar değerlendirilebilir. Ancak her alanın; yerleştirme potansiyeli, yatırım ihtiyacı, teknolojik olgunluğu ve riskleri ayrı ayrı analiz edilmelidir.

İmalat ve üretim merkezi olma hedefi de bu iş birlikleri kapsamında önemlidir. **Teknoloji sağlayıcı ülkelerle yapılacak müzakerelerde, Türkiye'nin bu merkezlerden biri olmasına yönelik şartlar masaya yatırılmalıdır.** Bu durum sadece ticari kazanç değil, nükleer sanayi ekosisteminin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından da büyük fırsatlar yaratacaktır. Ayrıca eğitim ve insan kaynağı gelişimi için üniversiteler, enstitüler ve endüstriyle birlikte nükleer teknolojiye odaklanacak bir eğitim ve AR-GE merkezi kurulması önerilmektedir. Böyle bir yapı hem mükerrer çalışmaları önleyecek hem de KMR'lere özel araştırmaların koordinasyonunu sağlayarak uzun vadede Türkiye'nin kendi nükleer döngüsünü yönetme kapasitesini geliştirecektir.

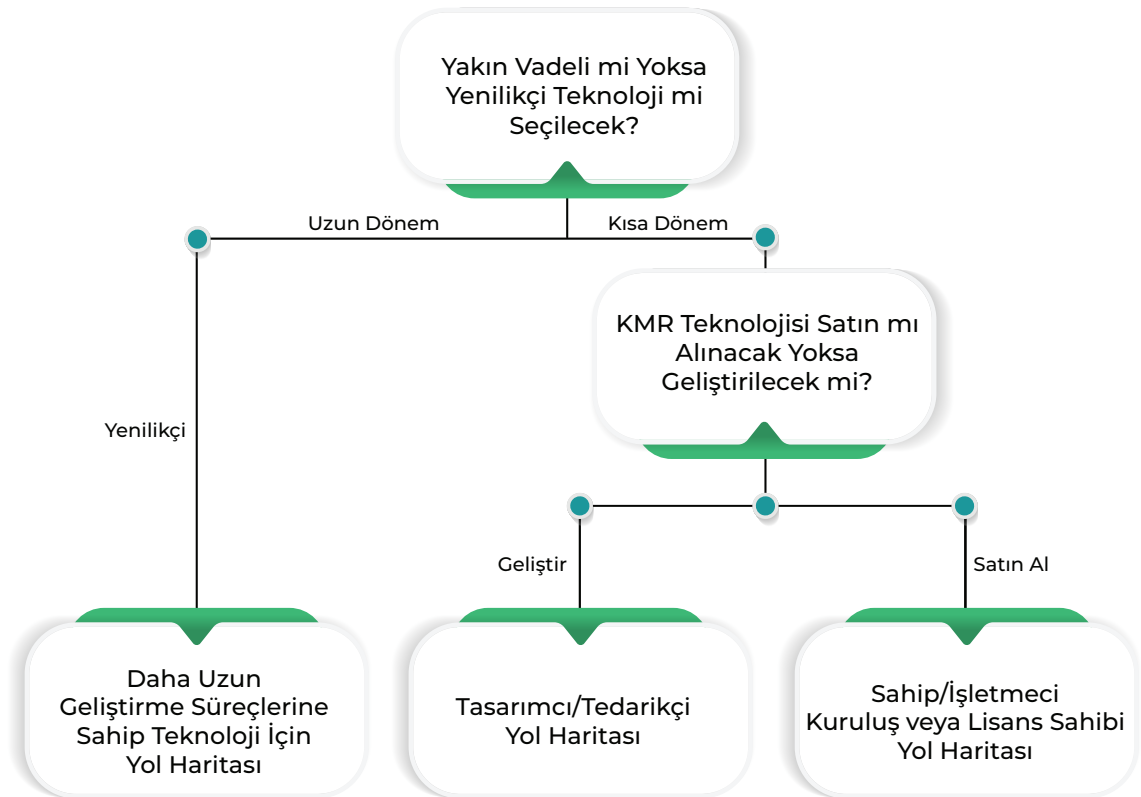
## BÖLÜM 4

## TÜRKİYE’NİN KMR YOL HARİTASI

KMR’lerin; Türkiye’ye kazandırılması, yaygınlaştırılması, işletilmesi, yerleştirilmesi ve bu alanda nitelikli insan kaynağının geliştirilmesi, uzun vadeli ve çok boyutlu bir süreci gerektirmektedir. Bu nedenle gerçekçi hedeflere dayanan, ülke ihtiyaçlarını önceleyen ve tüm paydaşları kapsayan kapsamlı bir yol haritasına ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu yol haritası; kritik karar noktalarını, veri odaklı analizleri, uzun vadeli planlamayı ve paydaşların rollerini açıkça tanımlamalıdır. Hazırlık süreci boyunca her aşamada veri setlerinin oluşturulması, karar kriterlerinin netleştirilmesi ve uygulanabilir alternatiflerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

İlk adım, ulusal ihtiyaçların net bir şekilde tanımlanması ve bölgesel bir teknoloji üssü olma vizyonu doğrultusunda hedef pazarın belirlenmesidir. Bu bağlamda Türkiye’nin elektrik üretim kapasitesine dair hedefler ve stratejiler göz önünde bulundurulmalıdır. Dünyada hâlihazırda 80’den fazla KMR tasarımı, çeşitli olgunluk aşamalarında (kavram geliştirme, tasarım, düzenleyici değerlendirme, inşa ya da işletme) değerlendirilmektedir. Dolayısıyla bu geniş teknoloji havuzundan, Türkiye’ye en uygun olan seçenekleri belirlemek için kapsamlı bir ön eleme süreci kaçınılmazdır. Bu sürecin, Şekil 1’de sunulan yapıya benzer şekilde sistematik bir yaklaşımla yürütülmesi önerilmektedir.

**Şekil 1:** KMR Teknolojisi Yol Haritasının Ana Akış Şeması



**Kaynak:** Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı.

Ön elemeyi başarıyla geçen KMR teknolojilerinin tasarımcıları, potansiyel yatırımcı şirketler, yüksek elektrik tüketimine sahip sanayi kuruluşları, yatırım fonları, ilgili kamu kurumları ve diğer kilit paydaşların katılımıyla ulusal bir KMR toplantısı, çalıştay veya konferansı düzenlenmelidir. Bu beklentilerin netleştirilmesi, paydaşlar arası sinerjinin sağlanması ve yol haritasının güncellenmesi açısından kritik olacaktır. Sonrasında elde edilen bildirimler doğrultusunda hem stratejik hedefleri hem de teşvik mekanizmalarını içeren kapsamlı ve uygulanabilir bir ulusal yol haritası ilan edilmelidir.

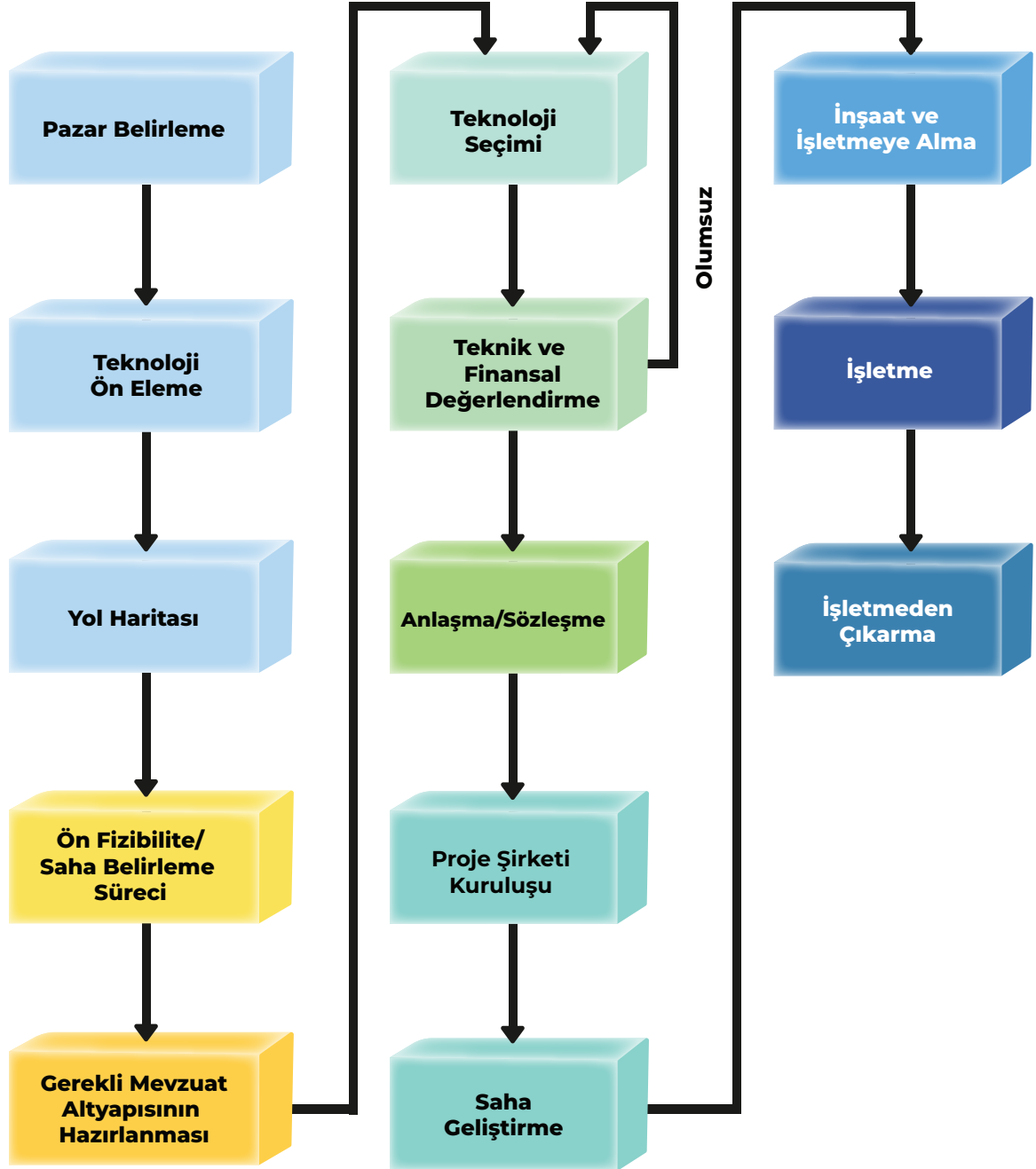
Belirlenen stratejik önceliklerle uyumlu teknoloji sağlayıcılarla görüşmeler başlatılmalı ve bu çerçevede ön fizibilite çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Bu aşamada potansiyel yatırımcıların sürece dâhil edilmesi, karar alma süreçlerini güçlendirecek ve iş birliği modellerini pekiştirecektir. Aynı zamanda saha belirleme çalışmaları başlatılarak teknik, çevresel ve ekonomik kriterler dikkate alınmalıdır. Devamında proje geliştirme yöntemi netleştirilmeli; seçilen modele bağlı olarak bir kanun taslağı, devletler arası anlaşma veya ihale şartnamesi hazırlanmalıdır. Bu çerçevede; özel sektör yatırımlarını teşvik edecek, yerileştirmeyi mümkün kılacak ve teknoloji transferi için uygun zemini oluşturacaktır. Ardından detaylı teknik ve finansal değerlendirmeler yapılmalı; tedarik zinciri ve yerileştirme stratejileri, insan kaynağı geliştirme planı, finansman ve gelir modelleriyle birlikte ekonomik etki analizleri kapsamlı bir şekilde tamamlanmalıdır.

Teknoloji sağlayıcı ve yatırımcıların ortaklığında kurulacak proje şirketi; üretim altyapısının oluşturulması ve Türkiye'nin bölgesel bir KMR merkezi olması amacıyla ilgili şirketlerin ve tesislerin kurulmasına öncülük etmelidir. Bu sürece paralel olarak KMR projeleri için lisanslama ve saha geliştirme çalışmalarına ivedilikle başlanmalı, yerli firmaların katılımıyla inşaat faaliyetleri planlanmalı ve yürütülmelidir. Hem inşaat hem de işletmeye alma süreçlerinde önceden yapılacak anlaşmalara uygun hareket edilerek yerli paydaşların, etkin şekilde projeye entegre edilmesi sağlanmalıdır.

KMR'lerin ticari işletmeye geçişiyle birlikte tüm süreçlerin önceden oluşturulan planlara uygun ilerlemesi ve belirli sürelerin sonunda santralin işletme sorumluluğunun tamamen ya da büyük ölçüde Türk tarafına devredilmesi hedeflenmelidir. Aynı şekilde, işletmeden çıkarma faaliyetlerinin de bu süreçte edinilecek teknik bilgi ve deneyimle yerli imkânlarla gerçekleştirilmesi amaçlanmalıdır.

Tüm bu aşamalarda, devletin sahip olduğu politika araçlarını etkin biçimde kullanarak projeye aktif biçimde katkı sunması kritik bir öneme sahiptir. KMR projeleri için genel iş süreç akışı Şekil 2'de gösterilmiştir. Ayrıca Türkiye'de yapılacak KMR projeleri için öneri niteliğinde kısa, orta ve uzun vadeli detaylı yol haritası Tablo 2'de özetlenmiştir.

Şekil 2: KMR Projelerinin İş Akış Süreci



**Tablo 2:** Türkiye'deki KMR Projeleri İçin Kısa-Orta-Uzun Vadeli Yol Haritası

| <b>2025-2029<br/>(Hazırlık ve Strateji)</b>                                                                                            | <b>2030-2034<br/>(Uygulama ve Başlangıç)</b>                                                                                       | <b>2035 Sonrası<br/>(Kurulum, Yaygınlaşma ve Yerleşme)</b>                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kapsamlı KMR politika/strateji belgesi/yol haritası ilanı, teknoloji ön elemesi, pazar, ulusal ve bölgesel hedef belirleme             | KMR projelerine öncelik verilmesi, ilgili mevzuatın yürürlüğe girmesi, finansman/vergi teşvik paketlerinin aktifleşmesi            | KMR'lerin enerji portföyüne entegrasyonu, bölgesel KMR merkezi olma vizyonunun güçlendirilmesi         |
| KMR'lere özgü mevzuat ve lisanslama süreçlerinin belirlenmesi, ön yeterlilik ve teknoloji ön elemesine uyumlulaştırma                  | Seçilen KMR teknolojileri için lisanslama başvurularının değerlendirilmesi ve ön lisansların verilmesi                             | KMR'lerin seri inşası için standart lisanslama süreçlerinin oturtulması, operasyonel denetim ve teftiş |
| Devlet yatırım desteği mekanizmalarının oluşturulması, KMR konferansı sonrası finansal beklenti analizi                                | Proje finansman modellerine (proje finansman girişimi, kamu-özel sektör ortaklığı) devlet katkısı ve kredi kolaylıkları sağlanması | Uzun vadeli, sürdürülebilir finansman modelleriyle yerli KMR projelerine doğrudan veya dolaylı destek  |
| Mevcut 80+ KMR tasarımı arasında Türkiye pazarı için uygun olanların tanıtımı, ön eleme sürecine katılım                               | Ön fizibilite çalışmaları ve potansiyel proje şirketiyle stratejik iş birliği geliştirme, AR-GE ortaklıkları                       | Yerli sanayi ile ortak üretim modellerinin geliştirilmesi, teknoloji transferi                         |
| KMR konferansına katılım, ön fizibilite çalışmalarına dâhil olma, yatırım potansiyeli analizi                                          | Kanun taslağı, IGA veya ihale şartnamesi doğrultusunda yatırım taahhütleri ve proje şirketi kurulumunda yer alma                   | KMR'lerin inşası ve işletmesinde aktif rol alma, yerleştirme ve ihracat potansiyeline katkı sağlama    |
| Nükleer sanayi altyapısının güçlendirilmesi için kapasite analizleri, KMR tedarik zincirine entegrasyon için hazırlık                  | İnşaat faaliyetlerinde aktif rol alma, KMR bileşenlerinin yerli üretiminde öncü olma                                               | %50'nin üzerinde yerli katkı oranına ulaşma hedefi, uluslararası KMR tedarik zincirinde aktif rol alma |
| Yerli KMR sanayi potansiyelini artırıcı politikalar geliştirmeye destek olma, uluslararası iş birliği platformlarının bir parçası olma | Yerli firmaların uluslararası KMR projelerinde yer almasını teşvik etme, ihracat fırsatları yaratma                                | Türkiye'nin bölgesel KMR üretim ve tedarik merkezi olarak konumlandırılması, ihracatın artırılması     |

| 2025-2029<br>(Hazırlık ve Strateji)                                                                                                                 | 2030-2034<br>(Uygulama ve Başlangıç)                                                                                                                                                       | 2035 Sonrası<br>(Kurulum, Yaygınlaşma ve Yerleşme)                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nükleer mühendislik ve teknoloji alanında AR-GE faaliyetlerine yatırım, nükleer enerji ve KMR özelinde uzman yetiştirme programlarının hazırlanması | KMR teknolojisine yönelik AR-GE projeleri yürütme, KMR özelinde uzman yetiştirme programlarının geliştirilmesi, yakıt çevrimi ve radyoaktif atık yönetimini yerleştirme sürecine hazırlama | KMR için yetiştirilen uzman desteğiyle KMR'lere özgü ileri AR-GE, radyoaktif atık yönetimi ve işletmeden çıkarma alanlarında yerli kapasitenin oluşturulması |
| KMR teknolojileri arasından ön eleme sürecinin parçası olunması, KMR konferansı sonrası yol haritası güncellemesine katkı sağlanması                | Ön fizibilite ve saha belirleme çalışmalarını yönetme, yasal çerçeveye uygun proje sözleşmelerinin hazırlanması                                                                            | KMR tesislerinin inşaat ve işletmesi, tedarik zinciri ve yerleştirme planlarını uygulama                                                                     |
| Projenin erken aşama risklerinin belirlenmesi ve sigorta çözümleri geliştirilmesi için analizler                                                    | KMR projelerine özgü sigorta ürünleri sunma, uluslararası reasürans desteği sağlama                                                                                                        | KMR projelerinin operasyonel risklerini kapsayan uzun vadeli sigorta çözümleri sunma                                                                         |
| KMR'lerin elektrik piyasasına entegrasyonu için düzenleyici çerçeve analizi ve hazırlığı                                                            | KMR'lerden üretilen elektriğin piyasaya arzı için tarifelerin ve mekanizmaların belirlenmesi                                                                                               | Piyasa mekanizmalarının KMR'lere uyumunun sürekli denetlenmesi ve optimize edilmesi                                                                          |
| KMR'lerin çevresel etkilerine yönelik metodolojilerin belirlenmesi, saha seçimi ve çevresel uygunluk analizi                                        | Potansiyel saha belirleme çalışmalarının çevresel boyutunun değerlendirilmesi ve saha onayı süreçleri                                                                                      | İşletme süresince çevresel performansın denetlenmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerine uyum, yeni sahalar için onay süreçleri                                 |
| KMR modüllerinin taşımacılığı için altyapı ihtiyaçlarının analizi ve planlaması                                                                     | Ağır nakliyat ve lojistik koordinasyonunun sağlanması                                                                                                                                      | Modüler inşaat ve yakıt/atık taşımacılığı için lojistik altyapısının optimize edilmesi                                                                       |
| Nükleer teknoloji alanında ihtiyaç duyulan nitelikli iş gücünün tespiti, eğitim programlarının tasarlanması ve geliştirilmesi                       | Mesleki ve akademik eğitim programlarının geliştirilmesi, KMR için yerli ve yabancı ortaklıklarla staj imkânlarının değerlendirilmesi                                                      | KMR teknolojileri için sürekli eğitim ve uzmanlaşma programlarının yürütülmesi, sektörde istihdam artışı                                                     |
| KMR projelerinin faydaları ve riskleri hakkında şeffaf bilgilendirme, kamuoyu algı yönetimi                                                         | Halkın katılımını sağlayacak platformlar oluşturulması, gerekli desteklerin sağlanması, projenin toplumsal kabulünün sağlanması                                                            | KMR tesislerinin bölgesel kalkınmaya katkılarının sürdürülmesi, halkla ilişkilerin devamlılığı                                                               |

Türkiye'nin nükleer sanayi altyapısının güçlendirilmesi yalnızca enerji sektörüne değil, aynı zamanda yüksek katma değere sahip sanayi kollarına da doğrudan katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda hazırlanacak kapsamlı ve gerçekçi politika belgeleriyle devletin öncülüğünde ve yatırım destekleriyle atılacak adımlar hem KMR projelerindeki yerli sanayi katkısını artıracak hem de enerji, madencilik, petrokimya, demir-çelik ve denizcilik gibi stratejik sektörlerde geniş bir etki yaratacaktır. Bu etki, uzun vadede ihracat kapasitesinin artırılması ve ithalat bağımlılığının azaltılması yoluyla cari açığın düşürülmesine de katkı sunacaktır. Aynı zamanda, **KMR projeleri kapsamında elde edilecek mühendislik ve sanayi deneyimi, Türk firmalarına sürdürülebilir ve ihracata dayalı bir yerli nükleer endüstri oluşturma fırsatı sağlayacaktır.**

KMR projelerinde risklerin; en iyi yönetebilecek taraflara devredilmesi, proje genelinde risk profilini düşürecektir. Bu bağlamda saha geliştirme ve onay süreçlerinin, ilgili alanda deneyimli kamu kurum ve kuruluşları tarafından yürütülmesi önerilmektedir. Bununla birlikte özel sektörün projeye etkin şekilde katılımı için gerekli teşvik mekanizmalarının oluşturulması ve özellikle teknoloji sağlayıcılarla erken aşamalarda stratejik ortaklıkların kurulması büyük önem taşımaktadır. Projelerin erken aşamalarında yüksek risk seviyeleri göz önünde bulundurulduğunda, devletin daha güçlü bir rol üstlenmesi; projenin olgunlaşmasıyla birlikte özel sektörün giderek artan bir sorumluluk alması yönünde bir politika çerçevesi oluşturulması tavsiye edilmektedir.

Teknoloji transferi süreçlerinde AR-GE faaliyetleri kritik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte yakıt çevriminin yerleştirilmesi, enerji arz güvenliği açısından stratejik bir hedef olarak ön plana çıkmaktadır. Türkiye'de henüz yeterli kapasiteye sahip olmayan radyoaktif atık yönetimi ve işletmeden çıkarma alanları, yalnızca KMR projeleri açısından değil, tüm nükleer enerji yatırımları açısından da geliştirilmesi gereken temel yetkinlik alanlarıdır. Bu başlıklarla birlikte insan kaynağının niteliksel ve niceliksel olarak geliştirilmesi de kapsamlı politika belgelerine entegre edilmelidir.



# SONUÇ VE STRATEJİK ÇIKARIMLAR

## SONUÇ VE STRATEJİK ÇIKARIMLAR

KMR teknolojilerinin, Türkiye'nin uzun vadeli enerji politikalarında kritik bir rol oynayacağı değerlendirilmektedir. Analiz bulguları, bu teknolojilerin sadece enerji üretimi açısından değil; ekonomik kalkınma, sanayi dönüşümü ve uluslararası iş birliği açısından da stratejik değer taşıdığını göstermektedir. Düşük ilk yatırım maliyeti, modüler yapısı, esnek yer seçimi ve elektrik dışı uygulamalara (desalinasyon, hidrojen üretimi, bölgesel ısıtma gibi) uygunluğu sayesinde KMR'ler; özellikle enerji altyapısı sınırlı bölgelerde, cazip bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Mevcut projeksiyonlar doğrultusunda, Türkiye'nin 2040-2053 döneminde 15 GWe büyük ölçekli ve 5 GWe küçük ölçekli nükleer kurulu güce ulaşması hedeflenmektedir. KMR'ler, bu hedefin tamamlayıcısı olarak değil, dönüştürücü ve yaygınlaştırıcı bir unsur olarak konumlandırılmalıdır. Ancak bu fırsatların hayata geçirilmesi; uzun soluklu, çok paydaşlı ve dikkatle planlanmış bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Teknoloji seçimi, lisanslama, finansman modelleri, mevzuat uyumu, insan kaynağı yetiştirme ve kamuoyu desteği gibi çok sayıda unsurun entegre bir strateji çerçevesinde ele alınması gerekmektedir. Özellikle teknolojik belirsizlikler, yüksek birim elektrik üretim maliyeti, lisanslama sürecindeki karmaşıklıklar ve radyoaktif atık yönetimi gibi alanlar; hâlâ çözüm bekleyen önemli zorluklar olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye için stratejik olarak belirlenmesi gereken yol haritasının hazırlanmasında şu çıkarımların üzerinde durulması önerilmektedir:

1. İmalat merkezi olma hedefi doğrultusunda atılacak en kritik adımlardan biri, uygun teknoloji seçimidir. Sınırlı sayıda ve stratejik açıdan uyumlu teknolojiye odaklanılması, lisanslama süreçlerini sadeleştirmenin yanı sıra "imalat, eğitim, işletme ve öğrenme eğrisi" gibi alanlarda süreklilik ve derinlik sağlayarak ekonomik faydaların maksimize edilmesine olanak tanıyacaktır.
2. Yenilikçi tasarımlar, gelişmiş güvenlik özellikleri sunarak önemli avantajlar sağlarken lisanslama süreçlerindeki belirsizlikler, radyoaktif atık yönetimi, kullanılmış yakıtın işlenmesi ve reaktörlerin işletmeden çıkarılması gibi konularda yeterli düzenleme ve deneyimin bulunmaması; süreçlerin öngörülebilirliğini azaltmaktadır.
3. Modüler yapıları sayesinde KMR'ler; kısa inşaat süresi, taşınabilirlik, tasarım standartlaştırması ve nükleer silahsızlanma hedeflerine katkı gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak yüksek teknolojik hassasiyetleri ve tedarik zinciri bağımlılıkları nedeniyle teknoloji transferi ve yerleştirme süreçleri daha karmaşık ve uzun vadeli bir planlama gerektirmektedir.
4. Paydaşların KMR projelerine zamanında ve etkin katılımı, kamuoyu nezdinde kabulün artırılması ve proje risklerinin azaltılması; finansal sürdürülebilirliğin sağlanması ve yerleştirme yoluyla ekonomik katma değer maksimize edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.
5. Yönetişim tarafında, kurumlar arası koordinasyonu güçlendirmek ve süreklilik sağlamak için T.C. Cumhurbaşkanlığı bünyesinde "Nükleer Enerji Başkanlığı" kurulması önerilmektedir. Böyle bir yapı; teknoloji seçimi, yerleştirme ve insan kaynağı planlamasının bütüncül olarak yürütülmesine katkı sağlayacaktır. Bunların yanı sıra karar alma süreçlerinde yetki karmaşasını önleyecek, kurumsal koordinasyonu sağlayacak ve stratejik planlamanın etkisini artıracaktır. Zira nükleer enerji; aynı anda birçok bakanlık ve kamu kurumunun çalışma alanına girmesi nedeniyle ortak çalışmaya

ihtiyaç duymaktadır. Bunlara ek olarak yatırım süreçlerinin verimli bir şekilde yürütülmesi, siyasi irade desteği, stratejik planlama ve yönetim ihtiyacı sebebiyle bir üst yapıya ihtiyaç duyulacaktır. Dolayısıyla söz konusu yapı; başta KMR projeleri olmak üzere nükleer enerji alanında üst düzey yönetim, stratejik rehberlik ve sürdürülebilirlik açısından kritik rol üstlenecektir.

6. Türkiye'nin nükleer kapasite hedefleri doğrultusunda, işletme sürecinin en kritik unsurlarından biri olan nükleer yakıt tedarikinin millileştirilmesi, stratejik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, yakıt tedarik zincirinin belirli aşamalarında faaliyet gösterecek yerli bir yakıt şirketinin kurulması, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve dışa bağımlılığın azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.
7. Kullanılmış yakıt, radyoaktif atık yönetimi ve işletmeden çıkarma gibi uzun vadeli ve yüksek uzmanlık gerektiren operasyonel süreçlerin etkin bir şekilde yürütülebilmesi için bu alanlara özel yetkinliğe sahip merkezî uzman şirketlerin kurulması ve ilgili faaliyetlerin bu yapılar aracılığıyla gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım hem kurumsal kapasitenin artırılmasına hem de sürdürülebilir bir nükleer altyapının oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.
8. KMR'lerin; Türkiye'ye kazandırılması, yaygınlaştırılması, işletilmesi, yerleştirilmesi ve insan kaynağının geliştirilmesi, uzun soluklu ve çok boyutlu bir süreç gerektirmektedir. Bu nedenle "teknik, ekonomik, mevzuatsal ve kurumsal gereklilikleri" dikkate alan, gerçekçi, uygulanabilir ve Türkiye'nin uzun vadeli enerji hedeflerine uygun bir yol haritasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yol haritasının oluşturulmasında; temel veri setlerinin hazırlanması, kritik karar noktalarının netleştirilmesi, alternatif senaryoların değerlendirilmesi ve tüm paydaşların görev ve sorumluluklarının açık biçimde tanımlanması önemlidir.
9. Türkiye'nin KMR'ler hususunda orta/uzun vadede üretici ve ihracatçı konumuna gelmesi; savunma sanayisi, özellikle de İHA/SİHA teknolojilerinin bölgesel güç projeksiyonu ve stratejik otonomi hedefleri doğrultusunda yaptığı katkının benzeri bir imkân yaratabilir. Özellikle stratejik iş birliği boyutunda KMR'ler, Türkiye'nin bölgesel iş birliği ve kalkınma vizyonunu hayata geçirmede yeni ve başat faktör olabilme potansiyeline sahiptir.
10. Nükleer denizaltı tahrik ekosistemine temel oluşturacak kompakt reaktör, ısı yönetim, radyasyon güvenliği, ileri malzeme ve sessizleşme teknolojileri için AR-GE ve yetkinlik birikimi; stratejik öncelik hâline getirilmelidir. Bu yönelim; NPT/UAEA yükümlülüklerine tam uyum, şeffaf bir ihracat kontrol rejimi, müttefiklerle teknik/standart uyum ve yüksek nükleer emniyet kültürü ile dengelenerek sivil-askerî ayrımı, net bir yönetim yapısıyla güvence altına almalıdır.

Sonuç olarak KMR'ler, nükleer enerjinin geleceğinde güçlü bir dönüşüm potansiyeli taşımakta olup dünya genelinde henüz ölçekli yaygınlaşmanın başlangıç aşamasındadır. Bu erken dönem; doğru teknoloji seçimi, öngörülebilir düzenleyici çerçeve, rekabetçi finansman, yerleştirme odaklı tedarik stratejisi ve uluslararası ortaklıkların eş güdümüyle hareket eden ülkeler için "ilk hamle" fırsatı sunmaktadır. **Türkiye, savunma sanayisindeki tecrübesine benzer biçimde hedef odaklı bir yönetim modeli, nitelikli insan kaynağı ve test-sertifikasyon altyapısıyla ilerlediği takdirde, KMR ekosisteminde parçadan sisteme uzanan geniş bir yelpazede, küresel aktör ve ihracatçı konumuna yükselebilir.** Böylelikle enerji arz güvenliği güçlenirken yüksek katma değerli üretim ve teknoloji ihracatı üzerinden, ekonomik bağımsızlık pekişecektir. Türkiye, uzun vadeli stratejik çıkarlarıyla uyumlu bir şekilde sadece bölgesel değil, aynı zamanda küresel bir nükleer teknoloji üssü hâline gelecektir.



## KAYNAKÇA

**KAYNAKÇA**

- <sup>1</sup> ETKB, Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022, Erişim Adresi: [https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye\\_Ulusal\\_Enerji\\_Plan%C4%B1.pdf](https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf) [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>2</sup> ETKB, Türkiye Plans Over 20 Gigawatts of Nuclear Capacity by end of 2050, Erişim Adresi: <https://enerji.gov.tr/news-detail?id=21184> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>3</sup> IAEA, PRIS-Home, 2025, Erişim Adresi: <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>4</sup> IAEA, Small Modular Reactors, 2016, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>5</sup> OECD, The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition, 2025, Erişim Adresi: [https://oecd-nea.org/jcms/pl\\_108326/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-third-edition?details=true](https://oecd-nea.org/jcms/pl_108326/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-third-edition?details=true) [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>6</sup> IAEA, Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy, International Atomic Energy Agency, 2017, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/publications/10877/opportunities-for-cogeneration-with-nuclear-energy> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>7</sup> IAEA, Technical Meeting on Generic User Recommendations and Considerations for Small Modular Reactor Technology, 2024, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/events/evt2304522> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>8</sup> OECD NEA, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, OECD, 2021, Erişim Adresi: [https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560\\_smr\\_report.pdf](https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf) [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>9</sup> NITI, The Role of Small Modular Reactors in the Energy Transition, 2023, Erişim Adresi: <https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2023-06/The-Role-of-Small-Modular-Reactors-in-the-Energy-Transition-05162023.pdf> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>10</sup> OECD, The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables, 2019, Erişim Adresi: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7299-system-costs.pdf> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>11</sup> K. Godsey, Life Cycle Assessment of Small Modular Reactors Using U.S. Nuclear Fuel, 2019, Erişim Adresi: [https://open.clemson.edu/all\\_theses/3235/](https://open.clemson.edu/all_theses/3235/) [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>12</sup> IAEA, Guidance on Nuclear Energy Cogeneration, International Atomic Energy Agency, 2019, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/publications/13385/guidance-on-nuclear-energy-cogeneration> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>13</sup> IAEA, ARIS, Advanced Reactor Information System, 2025, Erişim Adresi: <https://aris.iaea.org> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>14</sup> İTÜ, TRIGA MARK-II Reaktörü, 2025, Erişim Adresi: <http://www.triga.itu.edu.tr/> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>15</sup> T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Yerli Nükleer Reaktör Geliştirilmesi Projesi Çağrı Duyurusu, 2025, Erişim Adresi: <https://rip.sanayi.gov.tr/anasayfa/Home/CagriDuyurusuNukleer> [Erişim Tarihi: 22.09.2025].

- <sup>16</sup> N. Butcher, C. Ciaravino, S. Healey ve Z. Anam, Economic and Finance Working Group SMR Roadmap, 2021, Erişim Adresi: <https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/12/Economics-Finance-WG.pdf?x93402> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>17</sup> IAEA, Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, 2021, Erişim Adresi: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf) [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>18</sup> IAEA, Nuclear Harmonization and Standardization Initiative (NHSI), (2025), Erişim Adresi: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/SitePages/Nuclear-Harmonization-and-Standardization-Initiative.aspx> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>19</sup> S.S. Kilic, S. Yigit ve B. Sreenivasulu, Assessing the Potential of Small Modular Reactors (Smrs) for Electricity Generation in Cyprus and Techno-Economic Analysis, SSRN Scholarly Paper (2025), doi:10.2139/ssrn.5258312
- <sup>20</sup> E. Shobeiri, F. Genco, D. Hoornweg ve A. Tokuhito, Small Modular Reactor Deployment and Obstacles to Be Overcome, *Energies*, 16(2023), 3468. doi:10.3390/en16083468
- <sup>21</sup> AFAD, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları, 2024, Erişim Adresi: <https://tdth.afad.gov.tr> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>22</sup> History, USS Nautilus-World's First Nuclear Submarine is Commissioned, September 30, 1954, History, (2010), Erişim Adresi: <https://www.history.com/this-day-in-history/september-30/uss-nautilus-commissioned> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>23</sup> Mohammed Haddad, Are Nuclear Submarines Better?, 2021, Erişim Adresi: <https://www.aljazeera.com/news/2021/9/21/infographic-how-many-submarines-does-each-country-have-interactive> [Erişim Tarihi: 22.09.2025].
- <sup>24</sup> Naval Technology, Nimitz Class Aircraft Carrier, Erişim Adresi: <https://www.naval-technology.com/projects/nimitz/> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>25</sup> NTI, Russia Submarine Capabilities, The Nuclear Threat Initiative, 2024, Erişim Adresi: <https://www.nti.org/analysis/articles/russia-submarine-capabilities/> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>26</sup> IAEA, The IAEA and the Non-Proliferation Treaty, Text, 2016, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/topics/non-proliferation-treaty> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>27</sup> IAEA, Joint Protocol Relating to the Application of the Vienna Convention and the Paris Convention, 2020, Erişim Adresi: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-liability-conventions/joint-protocol-relating-to-application-of-vienna-convention-and-paris-convention> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].
- <sup>28</sup> Resmî Gazete, Nükleer Düzenleme Kanunu, 2022, Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/03/20220308-1.htm> [Erişim Tarihi: 13.08.2025].

## This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

RA -  
POR

**NÜKLEER ENERJİDE  
STRATEJİK FIRSAT:**

KÜÇÜK MODÜLER  
REAKTÖRLER VE  
TÜRKİYE

EKİM 2025