

Küçük Modüler Reaktörler (SMR):

Dünya'daki Gelişmeler ve Büyük Reaktörlerle Karşılaştırmalar

“Avustralya Nükleer Bilim ve Teknoloji Kurumu” Raporunun Özeti..

Hazırlayan : Yüksel Atakan, Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com 03.11.2025

1. Giriş ve bağlam

- ANSTO (“Avustralya Nükleer Bilim ve Teknoloji Kurumu”), Avustralya’nın nükleer bilim otoritesi olarak dünyadaki yeni nükleer teknoloji gelişmelerini izlemektedir. Küçük Modüler Reaktörler (SMR’ler) bu gelişmelerin en çok ilgi çeken alanlarından biridir.
 - SMR’lere yönelik ilgi, potansiyel avantajlarından kaynaklansa da, bu teknolojiler hâlen erken aşamadır ve ticari olarak büyük ölçekte kanıtlanmamıştır.
- SMR ile Büyük Basıncılı Su Reaktörü karşılaştırması (Satırların incelenmesi):**



- OECD'nin Nükleer Enerji Ajansı'na (NEA) göre dünya genelinde **50'den fazla SMR tasarımı** geliştirilmektedir.
- Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), bu gelişmeleri barışçıl kullanım açısından izleyen ve yönlendiren ana uluslararası kurumdur.

2. SMR nedir?

- IAEA'ya göre, bir SMR **300 MW(e)** ya da altıda elektrik kurulu gücündeki gelişmiş bir nükleer reaktördür. En büyük SMR, tipik 1000 MW'lık büyük bir reaktörün yaklaşık üçte biri kadardır.
- **Öne çıkan özellikleri:**
 - **Küçük ölçek ve yer seçimi esnekliği:** Daha küçük oldukları için geniş alan gerektirmez, uzak veya sınırlı altyapıdaki bölgelerde kurulabilir.
 - **Modüler üretim:** Reaktör modülleri fabrikada üretilebilir ve kurulum yerine taşınabilir; bu da yapım süresini ve maliyet belirsizliğini azaltabilir.
 - **Güvenlik ve basitlik:** Çoğu tasarım pasif güvenlik sistemlerine, düşük basınçta çalışma ilkesine ve doğal soğutma özelliklerine dayanır.
- Potansiyel olarak daha düşük maliyet, kısa inşaat süresi ve isteğe göre modül ekleme gibi avantajlar sunsa da, bunlar henüz **kanıtlanmış** değildir.

3. Teknolojik olgunluk ve geliştirme süreci

- SMR tasarımı 2000'li yılların ortalarından itibaren geliştirilmeye başlanmıştır.
- NEA (Nükleer Enerji Kurumu), Dünya çapında **yaklaşık 98 SMR teknolojisi** bulunduğunu belirtmektedir; ancak bunların çoğu hâlen tasarım veya lisanslama öncesi aşamadır.
- Ticarileşme takvimi yalnızca teknolojik olgunluğa değil; aynı zamanda şu etkenlere de bağlıdır:
 - Yasal ve düzenleyici yönetmelikler, sınırlamalar
 - Finansman ve ekonomik sürdürülebilirlik
 - Üretim zincirleri ve tedarik kapasitesi
 - Nitelikli personel kaynağı
 - Yakıt temini ve atık yönetimi sistemleri
 - Toplum desteği ve sosyal kabullenme

4. SMR'ler ve 4. Kuşak Reaktörler

- Geleneksel reaktörler I., II., III. ve IV. Kuşak olarak sınıflandırılır.
- Güncel SMR tasarımlarının çoğu **III+ Kuşak** teknolojilere dayansa da, bazıları **IV. Kuşak** reaktör tasarımını temel alır.
- IV. Kuşak SMR'ler; helyum, erimiş tuz ya da sıvı metal (sodyum, kurşun) soğutucu kullanabilirler, daha yüksek sıcaklıkta ve düşük basınçta çalışarak **daha güvenli ve verimli** olmaları hedeflenir.

5. Küresel gelişmeler

- NEA, Mart 2024'te *SMR Dashboard* raporunun ikinci baskısını yayımladı. Bu rapor, 98 Tasarımdan 56'sının gelişmesini değerlendirmektedir.
- Değerlendirme yalnızca teknik olgunluğu değil, aynı zamanda lisanslama, finansman, tedarik zinciri, yakıt yönetimi ve kamu katılımı gibi etkenleri de kapsamaktadır.

- **Bölgesel dağılım:**
 - **Kuzey Amerika:** 18 kuruluş (15 ABD, 3 Kanada)
 - **Avrupa:** 16 kuruluş (7'si Fransa'da)
 - **Asya:** 7 kuruluş (2 Japonya, 4 Çin, 2 Rusya)
- İlk uygulamalar Çin ve Rusya'da görülmekte; ABD, Kanada ve Avrupa ülkeleri de prototip aşamasındadır.
- Ancak çoğu proje hâlen “kavramsal tasarım” düzeydedir. NEA, tedarik zincirlerinin ve standardizasyonun gelişmeden, ölçek ekonomisinin yakalanamayacağını vurgular.



The NEA's SMR Dashboard's additional enablers. Source: ANSTO.

6. Zorluklar ve fırsatlar

Temel engeller:

- **Lisanslama ve düzenleme:** Yeni teknolojilere uyumlu yönetmelik eksikliği.
- **Finansman:** Prototip maliyetleri yüksek, yatırımcı ilgisi sınırlı.
- **Tedarik zinciri:** Seri üretim kapasitesi henüz oluşmadı.
- **İnsan kaynağı:** Eğitimli personel ve işletme uzmanı ihtiyacı.
- **Atık yönetimi ve yakıt döngüsü:** Uzun vadeli güvenlik gerektiriyor.
- **Kamu kabulü:** Toplum güveni ve saydam iletişim henüz kritik düzeyde.

Fırsatlar:

- İsteğe göre modül ekleme olanağı var
- Uzak bölgelerde, adalarda veya maden işletmelerinde bağımsız enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi
- Hızlı üretim ve düşük ilk yatırım potansiyeli

7. Avustralya ve ANSTO'nun rolü

- ANSTO, Avustralya Hükûmeti'ne nükleer bilim ve teknoloji konularında danışmanlık vermekle görevlidir.
- Kurum, IAEA ve NEA verilerini kullanarak SMR gelişmelerini izlemekte ve teknik analizler sunmaktadır.
- **Bu rapor, Avustralya'nın SMR'leri kısa vadede kuracağı anlamına gelmez; ancak teknolojiyi yakından izlemesi gerektiğini vurgular.**

.Sonuç

- SMR'ler, nükleer enerjinin geleceğinde önemli bir yenilik potansiyeli taşımaktadır: **daha küçük, modüler, güvenli ve esnek** reaktörler.
- Ancak teknolojik, ekonomik ve sosyal birçok unsurun olgunlaşması gerekmektedir.
- Gerçek ticari başarı; maliyet etkinlik, düzenleyici uyum, güvenlik, tedarik zinciri ve toplumsal kabulün dengeli biçimde sağlanmasına bağlıdır.
- ANSTO, bu gelişmeleri izleyerek Avustralya'nın enerji politikalarına bilimsel dayanak sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Özet Tablo: SMR'ler Hakkında Temel Bilgiler

Konu Başlığı	Açıklama / Durum
Tanım (IAEA)	300 MW(e) veya daha az kapasiteye sahip modüler nükleer reaktör
Amaç	Küçük ölçekli, güvenli, esnek ve ekonomik nükleer enerji üretimi
Geliştirme Sayısı (NEA, 2024)	98 farklı tasarım – 56'sı detaylı izleniyor
Önde Gelen Bölgeler	Çin, Rusya, ABD, Kanada, Fransa, Japonya
Teknoloji Kuşak	Çoğunlukla III+, bazıları IV. Kuşak
Avantajlar	Modüler üretim, kısa inşaat süresi, artan güvenlik, düşük arazi ihtiyacı
Zorluklar	Lisanslama, finansman, atık yönetimi, tedarik zinciri, kamu kabulü
Potansiyel Kullanım Alanları	Uzak bölgeler, ada toplulukları, sanayi tesisleri, yedek enerji
ANSTO'nun Rolü	Bilimsel izleme, teknik danışmanlık ve politika desteği
Genel Değerlendirme	Umut verici ancak henüz ticari olgunluk aşamasında değil

Kaynak
/I/ <https://www.ansto.gov.au/news/small-modular-reactors-an-overview>

Ekleme (Y.Atakan) Maliyet/Fiyat (YZ araştırması sonuçları)

1. 300 MW ölçeğinde SMR için eldeki güvenilir bir rakam, **≈US\$4.4 milyar** kadardır (≈US\$ 14,600/kW)
2. Başka kaynakların verilerine göre: 300 MW SMR küçük modüler reaktörün 3. ve 4 kuşak (nesil) olarak maliyeti/ fiyatı tahminen us dolar olarak: 300 MW'lık bir Küçük Modüler Reaktör (SMR) için 3. ve 4. kuşak reaktörlerin maliyetleri, genellikle birkaç faktöre bağlı olarak değişir. Bu faktörler arasında tasarım, inşaat süresi, yer seçimi, yönetmelikler/ düzenlemeler, kullanılan teknoloji, lisanslama süreçleri ve güvenlik gereksinimleri bulunur. Ancak, 3. ve 4. kuşak SMR'lerin genellikle daha gelişmiş, daha güvenli ve daha verimli olmaları beklenir, bu da maliyetleri etkileyebilir.

Tahmini maliyetler:

1. **3. Kuşak SMR:**

- 3. kuşak reaktörler, daha önceki kuşakların geliştirilmiş şekilleridir. Daha verimli, daha güvenli ve daha küçük yapılarla tasarlanmışlardır. Bu kuşak reaktörler için tahmini maliyetler:
 - **Maliyet:** 6.000 - 8.000 USD/kW civarındadır.
 - 300 MW'lık bir SMR için bu, yaklaşık **1.8 - 2.4 milyar USD** arasında bir maliyet olabilir.

2. **4. Kuşak SMR:**

- 4. kuşak SMR'ler, daha yeni ve gelişmiş teknolojiler kullanır. Bu reaktörler, pasif güvenlik özelliklerine sahip, daha verimli, daha dayanıklı ve daha küçük boyutlu olabilirler. Ancak, bu tür reaktörlerin üretimi henüz erken aşamalarda olduğu için fiyatlar daha belirsizdir.
 - **Maliyet:** 7.000 - 10.000 USD/kW arasında olabilir.
 - 300 MW'lık bir SMR için bu, yaklaşık **2.1 - 3 milyar USD** arası bir maliyet anlamına gelir.

Diğer Faktörler:

- **Düzenlemeler ve lisanslama:** SMR'ler için düzenleyici onay süreçleri oldukça zaman alıcı olabilir, bu da maliyetlere etki eder.
- **Üretim ve inşaat süreleri:** Geleneksel reaktörlere göre SMR'lerin daha hızlı ve daha düşük maliyetli inşa edilebileceği öngörülse de, inşaat ve tedarik zincirindeki aksaklıklar fiyatları etkileyebilir.
- **Ekstra maliyetler:** Yatırımcılar için finansman, yer seçimi, personel eğitimi gibi ek masraflar da olacaktır.

Sonuç olarak, 300 MW'lık bir SMR'nin maliyeti, özellikle 4. kuşak teknolojilerinin hala gelişim aşamasında olması nedeniyle geniş bir aralıkta değişebilir. Bu, şu anda yaklaşık **1.8 milyar USD ile 3 milyar USD** arasında olabilir. Ancak, ilerleyen yıllarda bu maliyetler düşebilir, çünkü daha fazla üretim ve daha fazla proje gerçekleştirildikçe ekonomilerdeki ölçek etkisi devreye girebilir. **Bu tahminler, dünya genelindeki mevcut verilere ve projelere dayanarak verilmiştir. Fiyatlar ülkelere ve projelere göre değişiklik gösterebilir.**