

4. KUŞAK NÜKLEER REAKTÖRLER

Teknoloji, Küresel Projeler ve Ekonomik Analiz

Bu yazımız ilgili kaynaklardan YZ destekli olarak hazırlanmıştır.
Yüksel Atakan, Dr.Radyasyon Fizikçisi Almanya ybatakan4@gmail.com 22.03.2026
GIF Teknoloji Ailesi · Kuyu Tipi Reaktörler · Küresel Projeler · Maliyet Analizi

ÖZET

Bu yazımızda, 4. Kuşak Global International Forum (GIF) tarafından belirlenen altı ileri nükleer reaktör teknolojisini kapsamlı biçimde inceliyoruz: (1) **Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör (SFR)**, (2) **Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör (LFR)**, (3) **Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR)**, (4) **Gaz Soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR)**, (5) **Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör (VHTR)** ve (6) **Süperkritik Su Soğutmalı Reaktör (SCWR)**. Bunlara ek olarak, son yıllarda hızla gelişen ve daha önceki iki yazımızda ayrıntılarını incelediğimiz Derin Kuyu Reaktörleri (DKR / Deep Borehole Reactor) de bu yazımızda ayrı bir teknoloji kategorisi olarak ele alınmakta ve yukarıdaki tablolarda genişletilerek yer almaktadır (Bkz. x, xx).

2025–2026 itibarıyla Dünya genelinde yalnızca üç ticari ölçekli 4. Kuşak reaktör işletmededir: Rusya'daki BN-800 ve BN-600 (toplam 1.480 MWe SFR kapasitesi) ile Çin'deki HTR-PM (210 MWe, 2021). GIF üyesi 14 ülke ve Euratom kapsamında onlarca proje çeşitli olgunluk aşamalarında sürdürülmektedir. Bu rapora 2025–2026 dönemi itibarıyla eklenen en önemli yenilik, Aralık 2025'te Kansas eyaletinde inşaatına başlanan Deep Fission 'Gravity' reaktörü aracılığıyla kuyu tipi (borehole) reaktörlerin somut bir mühendislik ve yatırım gerçekliği haline gelmesidir.

Tasarım ve inşaat halindeki öne çıkan projeler ise şunlardır: TerraPower'ın Natrium reaktörü (345 MWe SFR, Wyoming/ABD) 2031 hedefli şebeke bağlantısıyla en ileri lisanslama aşamasındaki Batılı 4. Kuşak tasarımıdır. Rusya'nın BREST-OD-300'ü 2026–2027 yıllarında başlatılması beklenen öncü kurşun soğutmalı reaktördür. Çin'in HTR-PM'i ise 2021'de şebekeye bağlanan Dünya'nın ilk ticari 4. Kuşak reaktörüdür. Deep Fission'ın Gravity reaktörü, Aralık 2025'te temel atma töreniyle başlayan dünyanın ilk derin kuyu nükleer reaktör girişimidir.

1. GİRİŞ VE ARKA PLAN

1.1 Nükleer Reaktör Kuşakları

Nükleer reaktörler tarihi gelişimlerine göre dört kuşağa ayrılmaktadır. 1950'lerin erken prototiplerinden (1. Kuşak) başlayarak, 1970–1990'larda yaygın ticari işletmeye alınan LWR ve BWR tipi reaktörler (2. Kuşak), ardından Avrupa Basınçlı Su Reaktörü (EPR) ve AP-1000 gibi geliştirilmiş tasarımlar (3. Kuşak / 3+) ve son olarak 2030'lar sonrasını hedefleyen 4. Kuşak sistemler bu sınıflamayı oluşturmaktadır.

4. Kuşak reaktörler, varolan reaktörler üzerine kademeli bir iyileştirmeyi değil; güvenlik, sürdürülebilirlik, ekonomi ve atık yönetiminde köklü bir dönüşümü öngörmektedir. Bu sistemler özellikle şu açılardan öncekilerden ayrılmaktadır: kapalı yakıt çevrimi aracılığıyla azaltılmış nükleer atık miktarı ve toksisitesi; pasif güvenlik sistemleri sayesinde aktif yaptırım gerektirmeyen reaktör tasarımları; yüksek çalışma sıcaklıkları ile elde edilen artırılmış termal verim ve hidrojen üretimi kapasitesi.

Bu geleneksel sınıflamanın yanı sıra, son beş yılda ivme kazanan Derin Kuyu Reaktörleri (DKR), konuşlanma geometrisi ve jeolojik güvenlik prensibiyle tanımlanan yeni bir alt kategori oluşturmaktadır. DKR'ler GIF'in altı teknolojisinden bağımsız bir boyut taşımakla birlikte, bu reaktörler ağırlıklı olarak mevcut PWR teknolojisini temel almakta ve GIF tasarımlarıyla kesişen yönler barındırmaktadır.

1.2 GIF ve Yönetim Çerçevesi

4. Kuşak International Forum (GIF), 2001 yılında ABD önderliğinde kurulan ve nükleer araştırma iş birliğinde iletişimi sağlayan uluslararası bir platformdur. Kuruluş aşamasında Arjantin, Brezilya, Kanada, Fransa, Japonya, Güney Kore, Güney Afrika, Birleşik Krallık ve ABD Sözleşmeyi imzalamıştır. İsviçre 2002'de, Euratom 2003'te, Çin ile Rusya 2006'da, Hindistan 2010'da ve Avustralya 2016'da Forum'a katılmıştır.

GIF, 2002 yılında yayımladığı ilk Teknoloji Yol Haritası'nda altı reaktör teknolojisini seçmiş; 2014 güncellemesiyle bu sistemlerin gösterileme (demonstrasyon) hedeflerini yeniden belirlemiştir. GIF'in en güncel çerçevesi iklim değişikliğiyle

savaşım, esnek işletim, elektrik dışı uygulamalar (endüstriyel ısı, hidrojen üretimi) ve özel sektör katılımının güçlendirilmesini öncelikli hedefler olarak tanımlamaktadır.

2. 4. KUŞAK VE DERİN KUYU REAKTÖR TEKNOLOJİLERİ

Tablo 1: GIF'in Seçtiği Altı 4. Kuşak Reaktör Teknolojisi ve Derin Kuyu Reaktörü (DKR) – Temel Teknik Özellikler

Reaktör Tipi	Soğutucu	Nötron Spektrumu	Çıkış Sıcaklığı (°C)	Güç Aralığı (MWe)	Temel Avantajlar
SFR – Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör	Sıvı Sodyum	Hızlı	500–550	50–1500	En fazla deneyim (400+ reaktör-yılı); atık yakma kapasitesi
LFR – Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör	Kurşun / Pb-Bi	Hızlı	480–800	20–1200	Pasif güvenlik; düşük basınç; uzun yakıt ömrü; yeraltı uyumlu
MSR – Ergimiş Tuz Reaktörü	Ergimiş Florür/Klorür Tuzu	Termal/Hızlı	700–1000	10–1000	Atmosferik basınç; yerinde yakıt işleme; toryum uyumlu
GFR – Gaz Soğutmalı Hızlı Reaktör	Helyum	Hızlı	850	1200	Kapalı yakıt çevrimi; çok yüksek verimlilik
VHTR – Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör	Helyum	Termal	900–1000	250–300	Hidrojen üretimi; endüstriyel ısı uygulamaları
SCWR – Süperkritik Su Soğutmalı Reaktör	Süperkritik Su	Termal/Hızlı	510–550	300–1700	Yüksek termal verim; mevcut LWR deneyimi transferi
DKR – Derin Kuyu Reaktörü (Deep Borehole Reactor)	Su (Hidrostatik)	Termal (PWR)	~280–300	15–1500*	Pasif basınçlandırma; çok düşük yüzey izi; yüksek proliferasyon direnci; hızlı konuşlanma

Yukarıdaki tablo, GIF'in altı seçilmiş teknolojisini ve yeni nesil Derin Kuyu Reaktör (DKR) kategorisini soğutucu türü, nötron spektrumu, çıkış sıcaklığı ve pratik güç aralıkları açısından karşılaştırmaktadır. DKR'ler geleneksel PWR teknolojisini temel almakla birlikte, yerleştirme geometrisi ve jeolojik güvenlik prensibiyle diğer kategorilerden ayrılmaktadır. DKR'ler aynı arazi üzerine çok sayıda yerleştirilebilirler: Örneğin 100 adet kuyu x 15 Mwe = 1.500 MW.

2.1 Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör (SFR)

SFR, hızlı nötron spektrumunda sıvı sodyum soğutucusuyla çalışan ve 4. Kuşak teknolojileri arasında en kapsamlı operasyonel tarihe sahip olan sistemdir. Küresel ölçekte 20'den fazla reaktör deneyimi ve 400'ü aşkın reaktör-yılı birikimi bulunmaktadır. BN-600 (1980, Rusya), BN-800 (2016, Rusya), Phénix (1973–2010, Fransa) ve EBR-II (ABD) bu deneyimin temel yapı taşlarıdır.

Sodyumun yüksek ısı iletimi kapasitesi, düşük basınçlı işletimi ve yüksek güç yoğunluğunu sağlarken, sodyumun su ile patlayıcı reaksiyonu ciddi bir güvenlik zorluğu oluşturmaktadır. Pool-tipi tasarımlar birincil soğutucu sızıntısı riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Transuranikleri yakar ve azaltılmış atık toksisitesi elde eder; bred edilen plütonyum ile kapalı yakıt çevrimi oluşturulabilir.

2.2 Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktör (LFR)

LFR, soğutucu olarak sıvı kurşun veya kurşun-bizmut ötektik (LBE) kullanan hızlı nötron sistemidir. Kurşunun su ile tepkimeye girmemesi, su buhar haline geldiğinde reaktivite artışı yaratmaması ve normal basınçta çalışması önemli güvenlik avantajları sağlamaktadır. Sistem 'nükleer pil' olarak adlandırılmakta; 15–20 yıl yakıt yenileme gerektirmeksizin çalışabilmektedir.

Başlıca teknik güçlükler arasında kurşunun yüksek yoğunluğunun gerektirdiği güçlü yapısal destekler, yüksek sıcaklıklarda malzeme korozyonu ve Pb-Bi soğutucu kullanımında ortaya çıkan radyoaktif polonyum-210 yönetimi sayılmaktadır. Rusya'nın alfa sınıfı denizaltılarında LBE soğutucusu ile elde edilen deneyim bu teknolojinin önemli bir öncülüdür.

2.3 Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR)

MSR, reaktör çekirdeğinde hem yakıt taşıyıcı hem de soğutucu işlevi gören ergimiş florid veya klorid tuzlarını kullanan sistemdir. 1960'larda Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) ile ABD'de deneysel olarak kanıtlanan bu kavram, düşük basınçlı işletimi, yerinde yakıt işleme kapasitesi ve toryum uyumluluğu ile öne çıkmaktadır.

2025’de ABD’de Molten Chloride Reactor Experiment (MCRE), Idaho National Laboratory, Southern Company ve TerraPower ortaklığıyla önemli bir kilometre taşına ulaşmıştır. Çin Akademisi Bilimler Enstitüsü (CAS/SINAP), Şangay’daki TMSR programı kapsamında MSR alanında en kapsamlı kamuya açık araştırma programını yürütmektedir.

2.4 Gaz Soğutmalı Hızlı Reaktör (GFR)

GFR, helyum soğutucu ve kapalı yakıt çevrimi ile çalışan yüksek sıcaklıklı hızlı nötron reaktörüdür. 850°C çıkış sıcaklığıyla yüksek termal verim ($\geq 48\%$) ve hidrojen termokimyasal üretim kapasitesi sunmaktadır. Orta ve Doğu Avrupa ülkelerinin Visegrad Grubu (V4G4) iş birliğiyle geliştirilen Allegro projesi, bu teknolojinin Avrupa’daki öncü demonstrasyon programıdır.

2.5 Çok Yüksek Sıcaklıklı Reaktör (VHTR)

VHTR, grafit moderatörlü, helyum soğutuculu ve 900–1000°C’yi aşan çıkış sıcaklığıyla özellikle elektrik dışı uygulamalara – hidrojen üretimi, proses ısısı – yönelik tasarlanan bir termal nötron reaktörüdür. TRISO (tri-yapısal izotropik) yakıtı kullanarak son derece yüksek yanma oranları ve pasif güvenlik özellikleri sağlamaktadır.

Çin’in HTR-PM demonstrasyonu 2021’de şebekeye bağlanarak Dünya’nın işletmedeki ilk ticari 4. Kuşak reaktörü unvanını kazanmıştır. Japonya’nın HTTR’si de 2021’de Fukushima sonrası on yıllık kapatmanın ardından yeniden faaliyete geçmiştir.

2.6 Süperkritik Su Soğutmalı Reaktör (SCWR)

SCWR, mevcut hafif su reaktörü teknolojisinin uzantısı olarak 25 MPa ve 510–550°C koşullarında süperkritik su soğutucu ile çalışmakta; %44–45 termal verim sunmaktadır. Birincil soğutucu devresi tek aşamalı olup türbin girişine doğrudan bağlanabilmektedir. Ancak bu teknoloji, süperkritik koşullarda malzeme davranışına ilişkin kapsamlı araştırma gerektirdiğinden en düşük teknoloji hazırlık seviyesindeki (TRL 4–5) 4. Kuşak adayları arasında yer almaktadır.

2.7 Derin Kuyu Reaktörü (DKR / Deep Borehole Reactor)

Derin kuyu reaktörler, nükleer reaktörün tamamının yüzeyden yüzlerce metre ila birkaç kilometre derinlikteki jeolojik bir sondaj kuyusu içine yerleştirildiği tümüyle yeni bir nükleer reaktör konuşlanma tasarımıdır. Bu teknik, belirli bir nötron spektrumuna veya soğutucu tipine göre değil; birincil olarak konuşlanma geometrisine ve jeolojik güvenlik ilkesine göre tanımlanmaktadır.

Deep Fission’ın ‘Gravity’ reaktörü, bu kategorinin dünya genelindeki öncü ve tek aktif mühendislik projesidir. Aralık 2025’te Kansas eyaletinde inşaatına başlanan bu reaktör, 2026 yılında pilot kritiklik hedeflemektedir. Standart LEU (Low Enriched Uranium) yakıtı kullanması nedeniyle HALEU (High Assay Low Enriched Uranium) gerektirmemekte, mevcut tedarik zincirleriyle tam uyumlu çalışmaktadır.

3. TEKNİK KARŞILAŞTIRMA TABLOSU

Tablo 2: 4. Kuşak Reaktör Teknolojileri ve DKR – Kapsamlı Teknik Parametre Karşılaştırması (2026)

Parametre	SFR	LFR	MSR	GFR	VHTR	SCWR	DKR
Soğutucu	Na	Pb/Pb-Bi	Ergimiş Tuz	He	He	Süperkritik H ₂ O	Su (Hidrostatik)
Çıkış Sıcaklığı (°C)	500–550	480–800	700–1000	~850	900–1000	510–550	~280–300
Sistem Basıncı (MPa)	~0,1	~0,1	~0,1	7–9	7	25	~16 (doğal)
Termal Verimlilik (%)	38–42	40–45	44–50	48	48–50	44–45	33–38*
Yakıt Tipi	Metal/MOX	Nitrit/MOX	Flüorür Tuzu	MOX/Karbür	TRISO	UO ₂	Standart LEU
Doğal Sirkülasyon	Evet	Evet	Evet	Kısmi	Hayır	Hayır	Evet (termosifon)
Yeniden İşleme İhtiyacı	Evet	Evet	Dahili	Evet	Hayır	Kısmi	Hayır (LEU)
TRL Seviyesi (2026)	7–8	5–6	4–6	4–5	7–8	4–5	3–4
Piyasaya Sürüm Tahmini	2030–2035	2030–2040	2035–2045	2040+	2025–2030	2040+	2029–2032*

TRL (Teknoloji Hazırlık Seviyesi) 1'den 9'a kadar ölçümlenmektedir; 9 ticari konuşlanmayı ifade eder. SFR ve VHTR en olgun teknolojiler olarak TRL 7–8 düzeyinde yer almaktadır. MSR ve SCWR, temel fizibilite çalışmalarını tamamlamış olmakla birlikte materyal kalifikasyon zorlukları nedeniyle TRL 4–6 aralığında bulunmaktadır. DKR, pilot inşaatı başlamış olmakla birlikte ticari ölçek henüz kanıtlanmamış olduğundan TRL 3–4 seviyesindedir. (*DKR termal verimi tünel ısı kayıpları nedeniyle geleneksel PWR'den daha düşük öngörülmekte; bağımsız analistler şirket tahminlerine temkinli yaklaşmaktadır.)

4. DÜNYA GENELİNDE BAŞLICA 4. KUŞAK VE DKR PROJELERİ

Tablo 3: Küresel 4. Kuşak ve Derin Kuyu Reaktör Projeleri – Ülke, Güç, Maliyet ve İşletme Tarihleri (2026)

Proje Adı	Ülke / Kuruluş	Tip	Güç (MWe)	İşletme Tarihi	Tahmini Maliyet	Durum
Natrium (Kemmerer)	ABD – TerraPower / GEH	SFR	345	2031	~4 Milyar \$	İnşaat izni sürecinde; NRC güvenlik değerlendirmesi tamamlandı (2025)
CFR-600	Çin – CNNC	SFR	600	2026	~2,5 Milyar \$	İnşaat halinde (2017'den beri); yakın operasyon
CFR-1000	Çin – CNNC	SFR	1000–1200	2034	~5 Milyar \$	Kavramsal tasarım; 2028 inşaat başlangıcı hedefi
BREST-OD-300	Rusya – Rosatom	LFR	300	2026–2027	~1,5 Milyar \$	İnşaat halinde (SCC, Seversk); Proryv programı
BN-1200M	Rusya – Rosatom	SFR	1220	2030+	~3 Milyar \$	Tasarım onaylandı; Beloyarsk için planlanıyor
PFBR (Kalpakkam)	Hindistan – BHAVINI	SFR	500	2025–2026	~1,2 Milyar \$	Gecikmeli; kritikliğe yakın
MYRRHA	Belçika – SCK CEN	LFR-ADS	~100	2036	~1,96 Milyar €	Faz 1 lineer hızlandırıcı 2026 hedefi
ALFRED	Romanya / AB – ESNII	LFR	125	2035+	~1,96 Milyar €	Tasarım aşaması; Romanya'da inşaat planlanıyor
MBIR	Rusya – Rosatom	SFR (AR)	150 MWt	2028	~1 Milyar \$	İnşaat halinde; uluslararası araştırma merkezi
HTR-PM (Shidaowan)	Çin – CNNC/Tsinghua	VHTR	210	2021 ✓	~1,4 Milyar \$	Operasyonel – Dünya'nın ilk ticari Gen IV reaktörü
Allegro GFR	Çekya/Macaristan/Slovakya	GFR	75 MWt	2035+	~1,2 Milyar €	Kavramsal aşama; 2025/26 karar bekleniyor
TMSR-SF1	Çin – CAS/SINAP	MSR	10 MWt	~2030	~500 M \$	Prototip geliştirme; pilot faz
Gravity (DFBR-1)	ABD – Deep Fission	DKR (PWR-BH)	15 / klüster 1.500	2026 (pilot); 2029+	~%70–80 maliyet tasarrufu iddiası; 30 M\$ finansman	Kansas'ta inşaat başladı (Ara. 2025); NRC ön-uygulama; DOE Pilot Program
DLFR	ABD/UK – Westinghouse	LFR (yarı-yeraltı)	210 MWe (500 MWt)	2035+	Bütçe açıklanmadı	İngiltere'de 8 test tesisi (2023); pre-lisans görüşmeleri; TRL 4–5

(*) DKR klüster kapasitesi: Tek bir 15 MWe reaktörün borehole sondajı yaklaşık 3 dönüm arazi kaplamaktadır. Aynı arazi üzerine çok sayıda sondaj açılarak 1.500 MWe'ye kadar kapasiteye ulaşılması öngörülmektedir. Tablo 3'te açık mavi renkle işaretlenen satırlar DKR kategorisini temsil etmektedir.

4.1 Amerika Birleşik Devletleri

ABD, Enerji Bakanlığı'nın (DOE) Gelişmiş Reaktör Demonstrasyon Programı (ARDP) çerçevesinde iki önde gelen 4. Kuşak demonstrasyon projesini aktif olarak desteklemektedir. ARDP kapsamında eşit maliyet paylaşımı modeli benimsenmiş; ABD Hükümeti Natrium projesine 2 milyar dolara kadar katkı taahhüt etmiştir.

TerraPower Natrium (345 MWe SFR, Wyoming)

Wyoming eyaletinin Kemmerer kentinde eski bir kömür santralinin yerine kurulacak olan bu sistem, 345 MWe'lik sodyum hızlı reaktörü ile ergimiş tuz termal depolama sistemini bir arada sunmaktadır. İhtiyaç anında üretilen enerjiyi 500 MWe'ye kadar yükseltme kapasitesine sahip bu depolama, sistemi değişken yenilenebilir enerjiyle uyumlu kılmaktadır. NRC güvenlik değerlendirmesi Aralık 2025'te tamamlanmış; inşaat izni 2026 başında beklenmektedir. Ticari işletme hedefi 2031'dir.

X-energy Xe-100 (VHTR, 80 MWe)

TRISO yakıtlı pebble-bed tipi reaktör; DOE ARDP kapsamında geliştirilmekte olup Texas'a kurulması planlanmaktadır.

Deep Fission Gravity (15 MWe DKR, Kansas)

Aralık 2025'te Kansas eyaletinin Parsons kentindeki Great Plains Endüstriyel Parkı'nda (eski Kansas Ordusu Mühimmat Tesisi) temel atma töreniyle inşaatına başlanan bu derin kuyu reaktörü, DOE Reaktör Pilot Programı'nın 11 seçilmiş katılımcısından biridir. Şirket, Endeavour Energy ile 2 GW nükleer enerji ortak geliştirme anlaşmasını imzalamış olup ilk reaktörlerin 2029'da devreye alınması hedeflenmektedir.

4.2 Rusya Federasyonu

Rusya, on yıllar öncesine uzanan BN serisi reaktör deneyimiyle 4. Kuşak SFR ve LFR teknolojilerinde dünya lideri konumundadır. Rosatom'un Proryv (Atılım) programı, tam kapalı nitrit yakıt çevrimini ve yerinde yeniden işlemeyi kapsayan entegre bir yaklaşım benimsemektedir.

BREST-OD-300 (300 MWe LFR, Seversk)

Sibirya Kimyasal Kombinasyon tesisinde (SCC) inşa edilmekte olan yerli kurşun soğutuculu hızlı reaktördür. Uranyum-plütonyum mononitrit yakıtıyla çalışarak tam plütonyum üretimi sağlamak ve atık yeniden işleme tesisiyle birlikte kapalı döngüyü kapalı bir komplekste tamamlamaktadır. Reaktöre 809 milyon dolar, yakıt çevrimi tesislerine ise 550 milyon dolar bütçe ayrılmıştır.

BN-1200M (1.220 MWe SFR, Beloyarsk)

BN-800'ün ticari ölçekli halefi olarak tasarlanan BN-1200M için Rosatom'un Bilim ve Teknoloji Konseyi Beloyarsk santralini onaylamıştır. İki adet BN-1200 planlanmakta; birincisinin 2030 sonrasında devreye girmesi beklenmektedir.

4.3 Çin Halk Cumhuriyeti

Çin, 4. Kuşak teknolojisinde hem operasyonel hem de yapım aşamasındaki sistemlerle en geniş portföye sahip ülkedir. Devlet nükleer şirketi CNNC ve Çin Ulusal Nükleer Güç Teknoloji Şirketi (CGNPC), birden fazla 4. Kuşak konseptini eş zamanlı geliştirmektedir.

HTR-PM (210 MWe VHTR, Shidaowan), Tsinghua Üniversitesi ve CNNC iş birliğiyle geliştirilen pebble-bed reaktördür; 2021'de şebekeye bağlanarak 2022'de tam güce ulaşmıştır. CFR-600 (600 MWe SFR), 2017'den beri inşaatı sürmekte olup 2024–2026 döneminde işletmeye alınması beklenmektedir.

4.4 Hindistan

PFBR – Kalpakkam (500 MWe SFR): BHAVINI tarafından geliştirilen Prototype Fast Breeder Reactor, MOX yakıtlı havuz tipi bir sodyum hızlı reaktördür. Birkaç yıl süren gecikmelerden sonra 2025–2026 döneminde kritikliğe ulaşması beklenmektedir. Hindistan, nükleer enerji stratejisini üç aşamalı bir program kapsamında uranyum ağır su reaktörleri, FBR'lar ve toryum üzerine inşa etmiştir.

4.5 Avrupa Birliği / Belçika / Romanya

MYRRHA (Belçika, ~100 MWe LFR-ADS): Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications, bir proton hızlandırıcıyla birleştirilmiş kurşun-bizmut soğutuculu hızlı reaktördür. 2036 tamamlanma hedefiyle inşaatı planlanmakta; 1. fazda 100 MeV lineer hızlandırıcı 2026 itibarıyla tamamlanması öngörülmektedir.

ALFRED (Romanya / AB, 125 MWe LFR): Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator; ESNII çerçevesinde Romanya'ya kurulması planlanan bu demonstratör, 300–400 MWe'lik sanayi ölçekli Avrupa LFR'sinin (ELFR) habercisidir.

5. GIF ÜYELERİ VE ÜLKE BAZINDA KATILIM**Tablo 4: GIF Üye Ülkeler, Öncelikli Teknolojiler ve Aktif Programlar (2025)**

Ülke / Kuruluş	Katılım Yılı	Öncelikli Teknoloji	Aktif Proje / Program
Amerika Birleşik Devletleri	2001	SFR, VHTR, MSR, DKR	Natrium (TerraPower), X-energy, Deep Fission Gravity, ARDP programı
Çin Halk Cumhuriyeti	2006	SFR, VHTR, MSR, LFR	CFR-600, CFR-1000, HTR-PM, TMSR
Rusya Federasyonu	2006	SFR, LFR	BN-1200, BREST-OD-300, MBIR
Fransa	2001	SFR, GFR	ASTRID (iptal 2019); Joule II programı
Japonya	2001	SFR, VHTR	HTTR (yeniden devrede), Monju sonrası program
Güney Kore	2001	SFR, VHTR	PGSFR (600 MWe) tasarım geliştirme

Ülke / Kuruluş	Katılım Yılı	Öncelikli Teknoloji	Aktif Proje / Program
Kanada	2001	SCWR, SFR, MSR	Canadian SMR Yol Haritası
Hindistan	2010	SFR	PFBR (Kalpakkam), FBR-2 planları
Euratom (27 AB ülkesi)	2003	LFR, GFR, SFR	ALFRED, MYRRHA, Allegro, ESNII
Birleşik Krallık	2013	MSR, LFR	Özel sektör MSR girişimleri (Moltex, Seaborg); DLFR Westinghouse
Avustralya	2016	Tüm sistemler	Araştırma ve politika geliştirme
İsviçre	2002	SFR, SCWR	PSI araştırma programları

6. MALİYET ANALİZİ VE EKONOMİK DEĞERLEME

Tablo 5: 4. Kuşak ve DKR Projelerinde Sermaye Maliyeti Karşılaştırması (2025–2026 Verileri)

Proje / Reaktör Tipi	Toplam Sermaye Maliyeti	\$/MW Özgül Maliyet	İşletme Tarihi	Finansman Kaynağı
Natrium (TerraPower, ABD)	~4,0 Milyar \$	~11,6 M\$/MWe	2031	DOE %50 + Özel
CFR-600 (Çin)	~2,5 Milyar \$	~4,2 M\$/MWe	2026	Devlet (CNNC)
BREST-OD-300 (Rusya)	~1,5 Milyar \$	~5,0 M\$/MWe	2026–27	Rosatom/Devlet
PFBR (Hindistan)	~1,2 Milyar \$	~2,4 M\$/MWe	2025–26	BHAVINI/Devlet
MYRRHA (Belçika)	~1,96 Milyar €	~19,6 M€/MWe	2036	AB + Belçika Devleti
ALFRED (Romanya/AB)	~1,96 Milyar € (paylaşımlı)	~16 M€/MWe	2035+	ESNII + AB Fonu
BN-1200M (Rusya)	~3,0 Milyar \$	~2,5 M\$/MWe	2030+	Rosatom
Gravity / DKR – Pilot (Deep Fission)	30 M\$ (pilot faz)	TBD	2026 pilot	Özel + DOE
Gravity / DKR – Ticari (Hedef)	<1,0 Milyar \$	~2,0–3,0 M\$/MWe*	2029–2035	Özel Sektör
Natrium Ticari (Hedef)	<1,0 Milyar \$	~2,9 M\$/MWe	2035+	Özel Sektör

(*) DKR ticari maliyet hedefi: Deep Fission'ın %70–80 maliyet tasarrufu iddiası henüz bağımsız analistler tarafından doğrulanmamıştır. Pilot proje tamamlanmadan kesin maliyet tespiti yapmak mümkün değildir. Tablo değerleri şirket açıklamalarını esas almaktadır.

6.1 İlk İnşaat Maliyeti Analizi

4. Kuşak reaktörlerinin ilk inşaat maliyetleri, geleneksel LWR'lere kıyasla önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu farklılığın temel nedenleri şunlardır: yenilikçi soğutucu sistemleri gerektiren özel malzemeler ve ekipmanlar; lisanslama ve düzenleyici onay süreçlerinin yüksek maliyeti; küçük seri miktarları nedeniyle ölçek ekonomisinin henüz gerçekleşmemiş olması.

TerraPower'ın Natrium demonstrasyon tesisi için beklenen yaklaşık 4 milyar dolar, ilk inşaat maliyetleri için üst sınırı temsil etmektedir. Şirket temsilcileri ticari Natrium tesislerinin 1 milyar doların altında olmasını hedeflemekte; bu da MWe başına yaklaşık 2,9 milyon dolara karşılık gelmektedir. Çin ve Rusya devlet destekli projelerde MWe başına birim maliyet 2,5–5 milyon dolar aralığında seyretmektedir.

Deep Fission'ın DKR konsepti, geleneksel basınç kabı ve konteyment yapısı **gerektirmemesi** nedeniyle maliyet yapısı açısından köklü bir farklılık ortaya koymaktadır. Ancak bu maliyet avantajı iddiası henüz pilot proje verisiyle kanıtlanmamıştır; 2026–2027 yıllarında elde edilecek gerçek maliyet verileri teknolojinin rekabet gücünü belirleyecektir.

6.2 Pazar Büyüklüğü ve Büyüme Projeksiyonları

Küresel 4. Kuşak reaktör pazarının 2025 yılında yaklaşık 1,28 milyar dolar değerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu pazarın 2035 yılına kadar yaklaşık 2,25 milyar dolara çıkması ve %6,52'lik bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) kaydetmesi beklenmektedir. Teknoloji segmentasyonu itibarıyla VHTR %27 pay ile lider konumda yer alırken onu SFR (%22), MSR (%18), LFR (%12), SCWR (%11) ve GFR (%10) izlemektedir.

7. DERİN KUYU (BOREHOLE) VE YERALTI REAKTÖRLER

Derin kuyu reaktörler (DKR veya İngilizce: Deep Borehole Reactor, DBR), nükleer reaktörün tamamının yüzeyden yüzlerce metre ila birkaç kilometre derinlikteki jeolojik bir sondaj içine yerleştirildiği tamamen yeni bir nükleer enerji

konuslanma paradigmasını temsil etmektedir. Bu kavram, geleneksel 4. Kuşak tasarımları gibi belirli bir nötron spektrumuna veya soğutucu tipine göre değil; birincil olarak konuşlanma geometrisine ve jeolojik güvenlik prensibine göre tanımlanmaktadır. **Bu nedenle derin kuyu reaktörler, 4. Kuşak teknoloji ailesiyle kesişen – ancak ondan bağımsız bir boyut da olan – bir alt kategori oluşturmaktadır.**

7.1 Tarihsel Arka Plan ve Kavramın Kökeni

Yeraltı nükleer tesisleri fikri yeni değildir. İsveç'in Ågesta reaktörü (1963–1974), kaya oyuğu içinde işletilen 10 MWe kapasiteli ilk ticari yarı-yeraltı nükleer santrali olma özelliğini taşımaktadır. Norveç'in Halden Reaktörü (1958–2018) ise 60 yıl boyunca bir kaya tüneli içinde çalışarak yeraltı nükleer operasyonunun fizibiliteini kanıtlamıştır. **Ancak bu tesisler yalnızca birkaç on metre derinliğindeydi ve modern 'derin kuyu' kavramından esasen farklıdır.**

Modern derin kuyu reaktör kavramının kökeninde, petrol ve gaz endüstrisinin geliştirdiği yönlü sondaj (directional drilling) teknolojisi yatmaktadır. Bu teknoloji sayesinde 1,6–5 km derinliğe 76 cm çapında sondajlar açmak artık ekonomik olarak olası hale gelmiştir. Deep Fission'ın kurucusu Elizabeth Muller, nükleer atık bertaraf şirketi Deep Isolation'ı yönetirken bu teknolojiyle tanışmış ve reaktörü bizzat borehole'a yerleştirme fikrinden doğan konsepti 2023'te şirket olarak hayata geçirmiştir.

7.2 Temel Çalışma Prensibi

Standart bir basınçlı su reaktörünün (PWR) çalışması için yaklaşık 160 atmosfer (16 MPa) basınç gerekmektedir. Geleneksel PWR'lerde bu basınç, pahalı ve büyük hacimli aktif basınçlandırma sistemleri ile masif çelik basınç kabı aracılığıyla sağlanmaktadır. **Derin kuyu tasarımında ise bu basınç, reaktörün üzerinde duran yaklaşık 1.600 metrelik su sütununun hidrostatik ağırlığından doğal olarak elde edilmektedir.**

Reaktörde üretilen ısı enerjisi, sondaj içindeki kapalı su devresine aktarılır. Isınan su buharlaşarak sütun boyunca yüzeye yükselir; yüzeyde bir türbini döndürerek elektrik üretir ve ardından soğuyarak tekrar sondaja geri döner. Bu sistem, jeotermal enerji üretimi ile petrol/gaz sondaj teknolojisinin bir bileşimini kullanmaktadır.

Jeolojik derinlik, hem nükleer güvenlik hem de fiziksel güvenlik açısından doğal bir bariyer işlevi görmektedir. Milyarlarca ton kaya örtüsü, herhangi bir kaza senaryosunda reaktörü yüzeyden izole etmekte; olası bir arıza durumunda borehole mühürlenebilmektedir. Sismik hareketliliği düşük olan kararlı jeolojik formasyon içine konumlandırılmış reaktörler, tornadolar, uçak çarpması veya sabotaj gibi yüzey tehlikelerine karşı son derece dayanıklıdır.

7.3 Deep Fission 'Gravity' Reaktörü – Teknik Profil

Deep Fission, 2023 yılında Berkeley (California) merkezli olarak Elizabeth ve Richard Muller tarafından kurulmuştur. Şirketin önde gelen ürünü, 'Gravity' adını alan ve daha önce DFBR-1 (Deep Fission Borehole Reactor-1) olarak bilinen derin kuyu reaktörüdür.

Gravity, 9 metre yüksekliğinde ve yaklaşık 76 cm (30 inç) çapında sıkıştırılmış bir PWR modülüdür. Standart düşük zenginleştirilmiş uranyum (LEU, <5%) yakıt kümeleri kullanan sistem, geleneksel PWR'lerden farklı olarak özel veya tescilli yakıt gerektirmemekte; mevcut nükleer yakıt tedarik zinciriyle tam uyumlu çalışmaktadır.

Tek bir Gravity reaktörü 15 MWe üretirken, aynı 3 dönümlük arazi üzerinde 10 adet reaktörden oluşan küme 150 MWe sağlamaktadır. Şirket, çok sayıda kümenin bir arada konuşlandırılmasıyla 1,5 GWe'ye ulaşılacağını öngörmektedir. Deep Fission, bir pilot tesisin temel atımından ilk elektrik üretimine kadar yaklaşık 6 ay içinde tamamlanabileceğini ve 50–70 \$/MWh hedef LCOE (eşitleştirilmiş elektrik maliyeti) elde edileceğini açıklamaktadır.

7.4 Proje Durumu ve Kilometre Taşları (2024–2026)

Ağustos 2024: Deep Fission, NRC'ye ilk kavramsal tasarım sunumunu gerçekleştirdi ve 4 milyon dolar ön-tohum finansmanı kamuoyuyla tanıştı. NRC toplantısında düzenleyiciler, mevcut reaktör güvenlik çerçevelerinin yeraltı tasarımına doğrudan uygulanamayacağını ve ek rehberlik geliştirileceğini belirtti.

Ocak 2025: Deep Fission, Endeavour Energy ile 2 GW nükleer enerji ortak geliştirme anlaşmasını imzaladı. Bu anlaşma, Endeavour'un yapay zeka veri merkezleri için talep ettiği büyük ölçekli temiz enerjiye Deep Fission reaktörlerinin güç sağlamasını öngörmekte; ilk reaktörlerin 2029'da devreye alınması hedeflenmektedir.

Eylül 2025: Deep Fission, 30 milyon dolar özel yerleştirme finansmanını kapattı ve Surfside Acquisition ile ters birleşme yoluyla halka açık şirket statüsüne geçti. Aynı dönemde ABD Enerji Bakanlığı'nın Reaktör Pilot Programı'na dahil edilen 11 şirketten biri oldu.

Aralık 2025: Kansas eyaletinin Parsons kentindeki Great Plains Endüstriyel Parkı'nda (eski Kansas Ordusu Mühimmat Tesisi) temel atma töreni gerçekleştirildi. Şirket, Texas, Utah ve Kansas için yer belirleme mektupları (LOI) imzaladı (Bkz xx).

7.5 Teknik Karşılaştırma: Derin Kuyu ve Geleneksel Tasarımlar

Tablo 6: Derin Kuyu Reaktör (DKR) – Geleneksel Tasarımlarla Teknik Parametre Karşılaştırması

Parametre	Deep Fission Gravity (DKR)	Geleneksel Yüzey PWR	Geleneksel Yüzey SMR	Westinghouse eVinci	Westinghouse DLFR
Reaktör Tipi	PWR (Derin Kuyu)	PWR/BWR (Yüzey)	PWR/BWR (SMR)	Isı Borulu Mikro	LFR (Yarı-Yeraltı)
Kurulum Derinliği	~1,6 km (1 mil)	Yüzey (0 m)	Yüzey (0 m)	Yüzey (~0 m)	Sığ kazı (≥ 1 m)
Güç Çıkışı (MWe)	15/reaktör; 1.500 MWe klüster	1.000–1.600 MWe	50–300 MWe	5 MWe (15 MWt)	450 MWe (ticari)
Basınçlandırma	Su sütunu (~160 atm doğal)	Aktif basınçlandırma	Aktif basınçlandırma	Basınsız (ısı borusu)	Pasif (kurşun yoğunluğu)
Basınç Kabı Gereksinimi	Yok (kaya + su sütunu)	Büyük çelik basınç kabı	Modüler basınç kabı	Yok	Kompakt havuz tipi
Konteyment Yapısı	Yok (kaya jeolojisi)	Büyük beton yapı (~%30 maliyet)	Kompakt konteyment	Pasif ısı atma	Yeraltı jeolojisi
İnşaat Süresi	~6 ay (4 hf. sondaj + montaj)	10–20 yıl	3–7 yıl	Fabrika üretimi + nakliye	3–5 yıl (hedef)
Yakıt Tipi	Standart LEU (<5%)	UO ₂	UO ₂ /HALEU	TRISO (%19,75 HALEU)	Nitrit/MOX
Atık Yönetimi	Borehole'da in-situ gömme	Yüzey depolama zorunlu	Yüzey depolama zorunlu	Merkezi fabrika geri dönüşü	Kapalı çevrim (hedef)
Tahmini İnşaat Maliyeti	~%70–80 daha ucuz (iddia)	~10–15 M\$/MWe	~5–9 M\$/MWe	Dizel ile rekabetçi	~4–6 M\$/MWe (hedef)
Hedef LCOE (\$/MWh)	50–70 \$/MWh	80–120 \$/MWh	70–100 \$/MWh	Uzak bölge premium	~60–80 \$/MWh
TRL Seviyesi (2026)	3–4 (pilot inşaatı başladı)	9 (ticari olgun)	6–7	5–6	4–5
Proliferasyon Direnci	Çok Yüksek (erişilemez)	Orta	Orta–Yüksek	Yüksek	Yüksek

7.6 Küresel DKR ve Yeraltı Reaktör Projeleri

Tablo 7: Derin Kuyu ve Yeraltı Nükleer Reaktör Projeleri – Teknik ve Proje Detayları (Mart 2026)

Proje / Reaktör	Şirket / Ülke	Tip	Güç	Yerleştirme Derinliği	İlk Pilot Tarihi	Tahmini Maliyet	Durum (Mart 2026)
Gravity (DFBR-1)	Deep Fission – ABD	PWR-BH	15 MWe/reaktör; klüster 1,5 GWe	~1,6 km	Ara. 2025 (başladı); pilot 2026	~%70–80 maliyet tasarrufu; 30 M\$ özel yatırım	Kansas, Parsons'da sondaj başladı; NRC ön-uygulama; DOE Reaktör Pilot Programı
Gravity Ticari Klüster	Deep Fission / Endeavour – ABD	PWR-BH	Hedef: 2 GW (133 reaktör)	~1,6 km	İlk reaktörler 2029 hedefi	Bütçe açıklanmadı; 50–70 \$/MWh LCOE hedefi	Mektup taahhüdü; Texas, Utah, Kansas siteleri LOI aşamasında
DLFR Demonstrasyon	Westinghouse – ABD/UK	LFR (Yarı-Yeraltı)	210 MWe (500 MWt)	Sığ yeraltı kazısı	2035+	Bütçe açıklanmadı; aşamalı Ar-Ge	İngiltere'de 8 test tesisi (2023); pre-lisans görüşmeleri; TRL 4–5
Ågesta (Tarihsel)	İsveç – AB Atomenerji	PWR (Yarı-Yeraltı)	10 MWe	Kaya oyuğu (~30 m)	1963–1974 (kapatıldı)	Tarihi referans	Dünya'nın ilk yarı-yeraltı ticari reaktörü
Halden Reaktörü (Tarihsel)	Norveç – IFE	Araştırma (Tünel)	20 MWt	Kaya tüneli (~50–100 m)	1958–2018 (kapatıldı)	Tarihi referans	60 yıl kaya tüneline çalışan araştırma reaktörü; yeraltı nükleer operasyon kanıtı
PBMR-400	Güney Afrika / Çin	VHTR (yarı-yeraltı)	400 MWt / 165 MWe	Sığ kaya oyuğu (seçenek)	Erken 2030'lar (yeniden canlandırma)	~2 Milyar \$ tahmin	Tasarım tamamlandı; yeniden canlandırmagörüşmeler; Çin iş birliği araştırılıyor

7.7 Avantajlar

- Pasif Güvenlik: Su sütununun ağırlığı doğal basınçlandırma sağlar; aktif mekanik sistemlere olan bağımlılık en aza iner. Olası bir kaza anında borehole mühürlenerek reaktör tamamen izole edilebilir.
- Proliferasyon Direnci: Reaktör, fiziksel olarak erişilmesi son derece güç bir derinlikte bulunmaktadır. Yakıt çalma veya sabotaj riski geleneksel yüzey tesislerine kıyasla dramatik ölçüde düşüktür.
- Düşük Yüzey Ayak İzi: Küme başına yaklaşık 3 dönüm arazi yeterlidir. Şehir yakınında, endüstriyel alanlarda veya eski fosil yakıt sahalarında konuşlandırılabilir.
- Atık Bertarafı Entegrasyonu: Ömrünü tamamlayan reaktör, gerektiğinde borehole içinde in-situ olarak mühürlenebilir. Atıkların yüzeyde taşınması gerekliliği ortadan kalkabilir.
- Hızlı Konuşlanma: 6 ay içinde devreye alma iddiası doğrulanırsa, bu yaklaşım acil enerji ihtiyaçları veya afet sonrası yeniden yapılanma senaryolarında dönüştürücü bir seçenek olabilir.
- Standart Tedarik Zinciri: LEU yakıt ve mevcut PWR bileşenleri kullanıldığından özel tedarik zinciri veya HALEU gerekliliği yoktur.

7.8 Teknik Zorluklar ve Açık Araştırma Soruları

- Uzaktan Bakım ve Onarım: 1,6 km derinlikteki bir reaktörün bakım ve onarımı için robotik ve teleopere edilen ekipmanlara ilişkin kapsamlı bir mühendislik çözümü henüz kanıtlanmamıştır.
- Nötron Aktivasyonu ve Su Saflığı: Reaktörden geçen soğutma suyu nötron aktivasyonuna maruz kalabilir; bu durum boru sistemleri boyunca radyoaktif madde taşınımı riskini doğurabilir.
- Yeraltı Suyu Koruması: Sondaj geçiş noktalarında yeraltı suyu tablasının kirlenmemesi için petrol ve gaz endüstrisinden alınan sızdırmazlık teknolojisinin nükleer uygulamaya transferi doğrulanmalıdır.
- Düzenleyici Çerçeve Eksikliği: Mevcut NRC güvenlik standartları yerüstü reaktörler için tasarlanmıştır. Yeraltı reaktörlerine özgü tehlike sınıflandırması, izleme protokolleri ve lisanslama rehberi henüz geliştirilme aşamasındadır.
- Jeolojik Karakterizasyon Maliyeti: Her saha için borehole jeolojik uygunluk değerlendirme kapsamlı sondaj öncesi araştırma gerektirmektedir.
- Termal Verimlilik: Borehole boyunca ısı kaybı ve türbine ulaşan buharın kalitesi, verimlilik hesaplarında önemli bir değişken olmaya devam etmektedir. Bağımsız analistler şirket tahminlerini daha temkinli bulmaktadır.

7.9 Diğer Yeraltı Konuşlanma Tasarımları

Derin kuyu konseptinin yanı sıra, çeşitli ana akım reaktör tasarımları da yeraltı konuşlanmasını bir seçenek olarak değerlendirmektedir. Westinghouse'un 450 MWe sınıfındaki Kurşun Soğutmalı Hızlı Reaktörü (LFR / DLFR), kompakt havuz tipi tasarımı ve dış tehditlere karşı güvenlik kaygılarına yanıt olarak reaktörü sığ-yeraltı kazıya yerleştirme seçeneğini tasarım belgelerinde açıkça tanımlamıştır. Bu yaklaşım, tam derin kuyu değil; 'hafif yeraltı' veya 'yarı-gömülü' bir kategori oluşturmaktadır.

Çin ve Güney Kore'de bazı SMR tasarımlarının dağ içi oyuk (cavern) veya deniz altı konuşlanma senaryoları da araştırılmaktadır; ancak bunlar mevcut durumda kavramsal aşamadadır. Norveç'in Halden Reaktörü ve İsveç'in Ågesta reaktörü ise 1950'ler–1970'lerin yeraltı deneyimini temsil eden tarihsel referans noktaları olarak bu tabloya önemli bir perspektif katmaktadır.

8. BAŞLICA ZORLUKLAR VE ARAŞTIRMA GEREKSİNİMLERİ

8.1 Malzeme Bilimleri Zorlukları

Her 4. Kuşak teknolojisi, mevcut reaktörlerden çok daha zorlu çalışma koşulları altında performans gösteren malzemeleri gerektirmektedir. Yüksek nötron akısı ve yüksek sıcaklık altında uzun ömürlü yapısal malzemeler; SFR'lar için sodyum ile uyumlu çelikler; LFR'lar için yüksek sıcaklıkta kurşun korozyonuna dirençli alaşımlar ve MSR'lar için ergimiş florür/klorid tuzlarına karşı dayanıklı Ni-bazlı süperalaşımlar araştırmanın merkezinde yer almaktadır.

8.2 Yakıt Geliştirme

Hızlı nötron reaktörleri için nitrit, karbür veya metalik yakıtlar gibi yüksek performanslı yeni yakıt matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır. VHTR'lar için TRISO yakıtı etkileyici güvenlik özellikleri sergilemiş olmakla birlikte üretim ölçeklendirmesi hâlâ zorlu bir süreçtir. ABD'de Yüksek Çevrimlilikte Düşük Zenginleşirmeli Uranyum (HALEU) yakıtının üretim altyapısı da ciddi bir tedarik zinciri sorunu olmaya devam etmektedir.

8.3 Düzenleme ve Lisanslama

Pek çok ülkedeki mevcut nükleer düzenleyici çerçeve, hafif su reaktörleri için tasarlanmıştır. LFR, MSR veya SFR gibi farklı fizik tasarımlarına sahip sistemlerin geleneksel güvenlik değerlendirme yöntemleriyle lisanslanması, düzenleyicilerin kendi uzman kapasitelerini geliştirmesini gerektirmektedir. ABD, Mayıs 2025'te dört Cumhurbaşkanlığı kararnamesiyle NRC reformu ve gelişmiş reaktör konuşlandırmasını hızlandırmayı hedeflemiştir.

8.4 Ekonomi ve Finansman

4. Kuşak reaktörlerinin ilk örnekleri, olgun LWR'lere kıyasla doğal olarak daha pahalıdır. Ölçek ekonomisine ulaşmak ve ortak tasarımlarda seri üretim avantajından yararlanmak için önemli ölçüde daha fazla piyasaya konuşlanma gerekmektedir. Uzun lisanslama ve inşaat süreleri, özel yatırımcıların bu projelere katılımını zorlaştırmaktadır; bu nedenle hükümet maliyet paylaşımı kritik işlevini korumaya devam etmektedir.

9. YOL HARİTASI VE BEKLENEN İŞLETME TARİHLERİ

GIF'in güncellenmiş Teknoloji Yol Haritası (2014) üç aşamayı kapsamaktadır: Fizibilite (Viability), Performans ve Demonstrasyon. Orijinal 2002 yol haritasına göre çoğu sistem 2025'e kadar demonstrasyon aşamasına ulaşacaktı; ancak bu hedefler sonraki güncellemelerde 2030'lara kaydırılmıştır.

- SFR: Demonstrasyon reaktörleri 2026–2031 (CFR-600, BREST-OD-300, Natrium); ticari konuşlanma 2030–2040
- LFR: MYRRHA/ALFRED demonstrasyon aşaması 2030–2036; ticari boyut 2040–2050
- VHTR: HTR-PM halihazırda operasyonel; sonraki ticari birimler 2030+
- MSR: Pilot demonstrasyon ~2030; ticari konuşlanma 2040+
- GFR (Allegro): Kavramsal karar 2025–2026; demonstrasyon 2035+
- SCWR: Malzeme araştırmaları devam ediyor; demonstrasyon 2040+
- Derin Kuyu – Deep Fission Gravity: Pilot reaktör inşaatı Aralık 2025'te başladı; DOE Pilot Program çerçevesinde 2026 kritiklik hedefi; ticari ilk reaktörler 2029 (iyimser senaryo); NRC lisansı ve teknik doğrulamaya bağlı 2032–2035 (ihtiyatlı senaryo)

Bu projeksiyonlar, düzenleyici süreçlerde yaşanan gecikmeler, tedarik zinciri kısıtları ve malzeme kalifikasyon sonuçlarına bağlı olarak değişebilir. Tarihsel eğilimler nükleer projelerde sistemik gecikmelerin yaygın olduğuna işaret etmektedir.

10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

4. Kuşak nükleer reaktörler, nükleer enerjinin sürdürülebilirlik, güvenlik, ekonomi ve proliferasyon direnci açısından dönüşümsel bir sıçrama yapmasını temsil etmektedir. 2025–2026 itibarıyla bu teknolojiler, tek bir ticari modelden küresel ölçekte devlet destekli demonstrasyon ve özel yatırım programlarına doğru önemli bir geçiş yaşamaktadır.

Çin'in HTR-PM'inin 2021'de faaliyete geçmesi, Rusya'nın BN-800'ünün süregelen operasyonu ve CFR-600 ile BREST-OD-300'ün yaklaşan işletmeye alınmasıyla bu on yıl, 4. Kuşak için kritik bir demonstrasyon dönemi niteliği taşımaktadır. TerraPower Natrium projesinin 2031 işletme hedefi, Batılı özel sektörün bu alana güçlü biçimde yatırım yaptığının somut göstergesidir.

Bu genel tabloya ek olarak, derin kuyu reaktör teknolojisi son derece dikkat çekici yeni bir boyut olarak ortaya çıkmaktadır. Deep Fission'ın Gravity reaktörü, Aralık 2025'te Kansas'ta inşaata başlayarak nükleer tarihin yeni bir sayfasını açmıştır. Bu konsept başarılı olursa, büyük basınç kaplarını ve konteyment yapılarını ortadan kaldırarak reaktör inşaat maliyetlerini %70–80 oranında düşürebilir ve konuşlanma süresini 6 aya indirebilir. 2 GW Endeavour Energy ortaklığı ve DOE Pilot Programı onayı, bu teknolojinin yalnızca teorik olmaktan çıktığını ve somut mühendislik ve yatırım kararlarının alındığını göstermektedir.

Bununla birlikte temel zorluklar varlığını sürdürmektedir: malzeme kalifikasyonu, yakıt arzı (özellikle HALEU), düzenleyici uyum ve uzun vadeli finansman yapıları. Gerçekleştirilen yatırımların ölçeği – yalnızca ESNII için 10,8 milyar euro, DOE ARDP kapsamında 4 milyar dolar artı eşleştirme fonları – ülke hükümetlerinin enerji güvenliği ve iklim hedefleri çerçevesinde 4. Kuşak teknolojisine verdiği stratejik önemi açıkça ortaya koymaktadır.

Uzun vadeli enerji projeksiyonlarına göre küresel elektrik talebinin 2050'ye kadar iki ila üç kat artması beklenmektedir. 4. Kuşak reaktörleri; uzun ömürlü nükleer atıkları dönüştürme, uranyum kaynaklarını daha verimli kullanma ve yüksek kaliteli endüstriyel ısı sağlama kapasiteleriyle düşük karbonlu enerji dönüşümünde güçlü bir seçenek olmayı sürdürmektedir.

KAYNAKÇA

Aşağıdaki kaynaklar bu raporun hazırlanmasında esas alınmıştır:

- [1] 4. Kuşak International Forum (GIF). (2014). Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. GIF-TCR14 004.
- [2] World Nuclear Association. (2025). Generation IV Nuclear Reactors.
- [3] World Nuclear Association. (2025). Fast Neutron Reactors.
- [4] TerraPower. (2025). Natrium Technology Overview & FAQ.
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). (2025). Advanced Reactor Highlights 2025.
- [6] Stanford University. (2023). Generation IV Nuclear Reactor – Overview (PH240 Course).
- [7] Wikipedia – Generation IV Nuclear Reactor (Küresel sürüm, erişim: Mart 2026).
- [8] Enerdata. (2024). Small Modular Reactors: World Trends.
- [9] World Nuclear Industry Status Report (WNISR). (2025).
- [10] Business Research Insights. (2026). Generation IV Reactor Market Trends [2035].
- [11] ANS Nuclear Newswire. (2025). Deep Fission to Break Ground This Week.
- [12] IEEE Spectrum. (2025). Deep Fission's Plan for Underground Nuclear Reactors.
- [13] World Nuclear News. (2024). Deep Fission unveils underground reactor concept.
- [14] KOSU / KCUR. (2025). Kansas will get the world's first mile-deep nuclear reactor.
- [15] Deep Fission Inc. (2025). Gravity Nuclear Reactor – Official Press Release.

- [16] Interesting Engineering. (2026). US firm's mile-deep underground nuclear reactor gets funding boost.
[17] ANS Nuclear Newswire. (2025). Deep Fission Raises \$30M in Financing.
[18] World Nuclear News. (2025). Three US states in line for Deep Fission underground SMRs.
[19] Westinghouse Electric. (2024). Westinghouse Lead-cooled Fast Reactor (LFR / DLFR).
[20] NucNet. (2025). Deep Fission and Deep Isolation Sign MOU on Managing Spent Fuel.

Derin kuyu nükleer reaktörleriyle ilgili ayrıntılı son yazılarımızın linkleri:

(x) Derin Kuyu Nükleer Fisyon Reaktörleri YZ Y.Atakan GENISLETİLDİ 18.03.2026 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan

(xx) Deep Fission Derin Kuyu Reaktöründe TORYUM KULLANIMI ANALİZİ YZ Y.Atakan 19.03.2026 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan