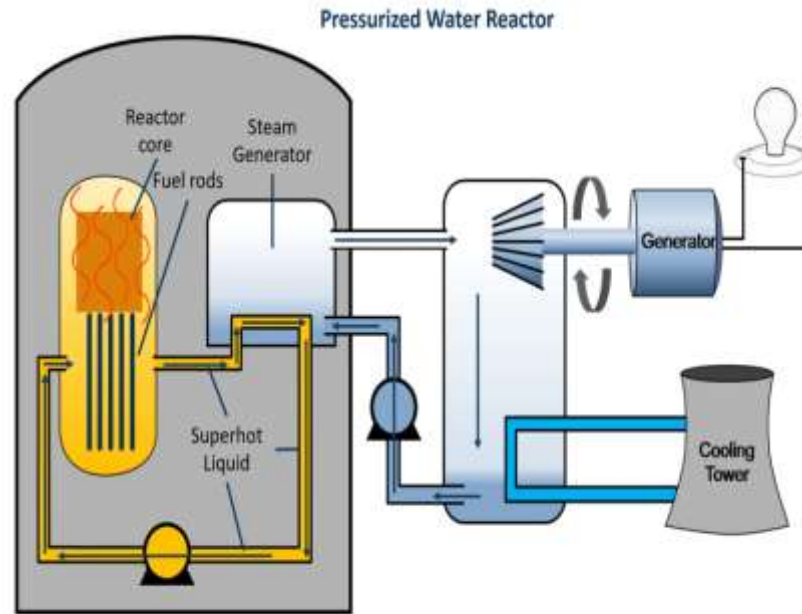
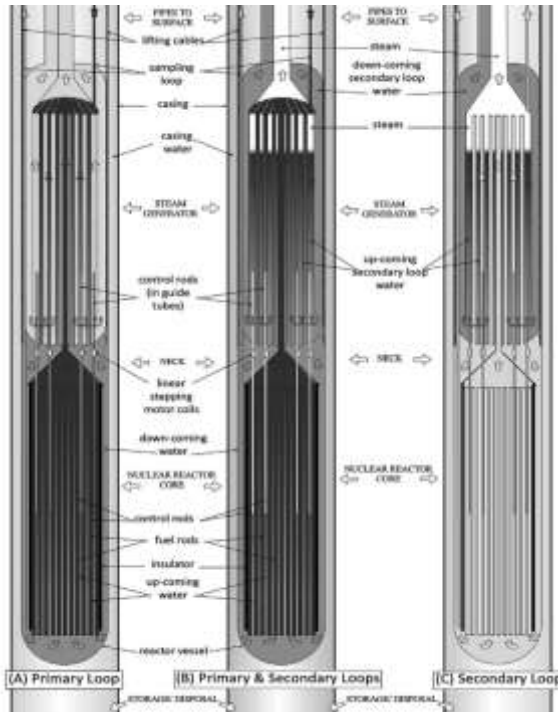


Bugünkü Nükleer Reaktörlerde Pasif Güvenlik Sistemleri Neler? Neden Çernobil ve Fukushima benzeri kazalar olamaz?

Derin kuyu, III+ Kuşak, Rusya/Çin SMR ve ThorAtom Türkiye Reaktör Projeleriyle Karşılaştırmalı Bir Değerlendirme

Kaynak: Deep Fission Inc. (DB-PWR), VVER-1200 AES-2006 (Akkuyu V509), RITM-200N (Rosatom), HTR-PM (Tsinghua/CNNC), ThorAtom/FIGES

Hazırlayan: YZ desteğiyle Yüksel Atakan: Dr.Radyasyon Fizikçisi Almanya ybatakan4@gmail.com 01.04.2026



1. GİRİŞ VE ARAŞTIRMANIN AMACI

Nükleer reaktör güvenliği, Çernobil (1986) ve Fukushima (2011) kazalarının ardından köklü bir dönüşüm geçirmiş; mühendislik topluluğu **aktif sistemlerden pasif ve özünü (inherent) güvenlik mekanizmalarına** doğru hızla yönelmiştir. Bu dönüşümün merkezinde bir soruya verilen yanıt yatmaktadır: **Elektriklerin kesildiği, pompaların çalışmadığı ve operatörlerin müdahale edemediği bir senaryoda reaktör kendiliğinden güvenli duruma gelebilir mi?**

Bu araştırmanın temel amacı, söz konusu soruyu beş farklı reaktör mimarisi üzerinden sistematik biçimde yanıtlamaktır. Karşılaştırma odağındaki sistemler şunlardır: (1) **Derin Kuyu Fisyon Reaktörü** (Deep Fission Gravity / DB-PWR), dünyanın ilk yeraltı-borehole SMR tasarımı; (2) **III+ Kuşak VVER-1200** (Akkuyu NGS, Türkiye); (3) **RITM-200N** (Rosatom, Rusya — Yakutya'da inşaat halinde); (4) **HTR-PM** (Tsinghua/CNNC, Çin — ticari işletmede); ve (5) **ThorAtom/FIGES Th-MSR** (Türkiye, AR-GE ve proje aşamasında).

Karşılaştırma; özünü (inherent) güvenlik özellikleri, pasif termal-hidrolik sistemler, fiziksel izolasyon mekanizmaları ve ciddi kaza senaryolarındaki sistem davranışları temelinde beş boyutta ele alınmaktadır.

2. TEORİK ÇERÇEVE: PASİF VE ÖZÜNLÜ GÜVENLİK KAVRAMI

2.1 Pasif Güvenlik Tanımı

Pasif güvenlik sistemi; bir ivedi (acil) durumda reaktörü güvenli duruma getirmek için operatör yaptırımına (müdahalesine) ya da dış (harici) elektrik/elektronik geri bildirimine gereksinim duymayan güvenlik özelliklerini kapsar. Bu özellikler **yerçekimi, kaldırma kuvveti, basınç farkı, ısı iletim veya doğal konveksiyon** gibi doğal kuvvetlerden yararlanır. **GLOBSEC ve NucNet gibi kuruluşların yayımladığı analizlere göre Çernobil ve Fukushima kazaları, aktif güvenlik sistemlerinin güç kesildiğinde ya da operatör hatası durumunda çökebildiğini açıkça ortaya koymuştur.**

2.2 Özünü (Inherent) Güvenlik

Özünü güvenlik, reaktörün yalnızca konveksiyon, yerçekimi veya yüksek sıcaklığa fiziksel direnç gibi olgulara dayandığı; hiçbir mühendislik bileşeninin katılımını gerektirmeyen güvenlik katmanı anlamındadır. Başlıca özünü mekanizmalar şunlardır:

- **Negatif sıcaklık katsayısı:** Çekirdek fazla ısındığında fisyon verimliliği fiziksel olarak düşer; milisaniyeler içinde güç azalır.
- **Negatif boşluk katsayısı:** Soğutucuda buhar oluşursa moderasyon azalır, zincir tepkime otomatik yavaşlar.
- **Doppler genişlemesi:** Yakıt sıcaklığı arttıkça nötron soğurma kesiti değişir; güç kendiliğinden düşer.

2.3 IAEA Savunma Derinliği Çerçevesi

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın (IAEA) savunma derinliği yaklaşımına göre güvenlik, birbirini destekleyen çoklu bağımsız bariyer katmanlarından oluşmalıdır. Bu araştırmamız, söz konusu beş reaktörü beş katman üzerinden değerlendirmektedir: (I) Öznlü fizik, (II) Pasif mekanik, (III) Pasif termal-hidrolik, (IV) Fiziksel izolasyon ve (V) Kimyasal pasif kapatma.

3. KARŞILAŞTIRILAN REAKTÖRLERİN KISA TANITIMI

3.1 Derin Kuyu Fisyon Reaktörü — Deep Fission Gravity (DB-PWR)

Deep Fission Inc. tarafından geliştirilen **Gravity** reaktörü, standart basınçlı su reaktörü (PWR) teknolojisini 1.500 metre derinliğindeki bir delgi kuyusuna (borehole) yerleştiren dünyanın ilk yeraltı SMR tasarımıdır. Her reaktör modülü **15 MWe** üretir; küme halinde 1 GWe'yi aşan ölçeklendirme hedeflenmektedir. Mart 2026'da Kansas'ta tarihsel borehole sondajı başlatılmış, ABD DOE Reaktör Pilot Programı kapsamında 2026-2027 ilk kritiklik hedeflenmektedir.

Tasarımın en özgün pasif güvenlik özelliği, **1.500 metre su sütununun ~160 atm hidrostatik basınç** sağlamasıdır; bu basınç normal PWR'ların çalışma basıncına eşdeğerdir, ancak elektrik gerektiren aktif bir basınçlandırıcı kullanılmaz. Çevredeki milyarlarca tonluk ana kaya, radyasyon kalkanı, sismik söndürücü ve fiziksel izolasyon bariyeri görevi görür.

3.2 III+ Kuşak VVER-1200 — Akkuyu NGS (V509/AES-2006)

Türkiye'nin ilk nükleer santrali olan **Akkuyu NGS** (Mersin), Rusya Rosatom tarafından kurulmaktadır; dört ünite VVER-1200/V509 (AES-2006) tipi reaktörden oluşmaktadır; toplam kurulu güç **4.800 MWe**'dir. III+ kuşak reaktör sınıfında yer alan VVER-1200, aktif ve pasif güvenlik sistemlerinin özenle kombinasyonuna dayalı **çift konteyner binası**, pasif ısı uzaklaştırma sistemi (PHRS), çekirdek tutucu (core-catcher) ve çok aşamalı hidro-akümülatör (HA-1/HA-2/HA-3) sistemleri içermektedir.

3.3 Rusya SMR — RITM-200N

RITM-200N, OKBM Afrikantov tarafından geliştirilen ve Rusya'nın nükleer buz kırıcı filosundaki RITM-200 deniz reaktörünün kara tabanlı versiyonudur. **Sekiz RITM-200 reaktörü** halihazırda Arktika, Sibirya, Ural ve Yakutya buz kırıcılarında işlemektedir; 400 reaktör-yılı deneyim birikimi mevcuttur. Kara

tabanlı ilk pilot tesis Yakutya'da inşa halindedir; **2028 yılında işletmeye alınması** hedeflenmektedir. Entegral (bütünleşik birincil çevrim) tasarımıyla doğal sirküasyon için elverişlidir.

3.4 Çin SMR — HTR-PM (Yüksek Sıcaklıklı Pebble Bed Reaktörü)

Tsinghua Üniversitesi INET tarafından geliştirilen ve China Huaneng/CNNC tarafından işletilen **HTR-PM** (Shidao Bay/Shandong), iki 200 MWt reaktör modülünün ortak bir türbini sürdüğü dünyanın ilk çok modüllü yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörüdür (HTGR). Toplam elektrik üretimi **105 MWe**'dir; ticari işletme **Aralık 2023**'te başlamıştır. Temmuz 2024'te yayımlanan Joule dergisi makalesi, kaybı soğutma testinin müdahalesiz inherent güvenliği kanıtladığını doğrulamaktadır. TRISO kaplı küresel yakıt elemanları (pebble), reaktörün en güçlü pasif özelliğini oluşturmaktadır.

3.5 ThorAtom Türkiye — Toryumlu Ergimiş Tuz Reaktörü (Th-MSR)

FIGES A.Ş. bünyesinde kurulan **ThorAtom** (Türkiye), Türkiye'nin zengin toryum rezervlerini (dünya rezervlerinin önemli bir bölümü) kullanmak üzere IV. Kuşak ergimiş tuz reaktörü (MSR) geliştirmeyi hedeflemektedir. Proje, 2016–2017'den bu yana TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ile iş birliği içindedir; SAMOFAR (Avrupa H2020) gibi uluslararası projelere katılım sağlanmış, CNRS-Grenoble ile teknik temas kurulmuştur. **Reaktör henüz AR-GE** aşamasındadır; işletmeye alınmış bir ünite mevcut değildir.

MSR teknolojisinin temel pasif güvenlik özelliği, **yakıtın tuzla birlikte eriyik halde** bulunmasıdır: soğuma veya arıza durumunda alt drenaj kapakları açılarak bölünür madde pasif olarak güvenli bir tanka aktarılır. Düşük çalışma basıncı (yaklaşık atmosferik) olağanüstü bir pasif güvenlik avantajı sağlar.

4. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ TABLOLARI

Tablo 1: Pasif Güvenlik Sistemleri — Kapsamlı Karşılaştırma

Pasif Güvenlik Parametresi	Derin Kuyu (Deep Fission Gravity)	III+ Kuşak (VVER-1200 / Akkuyu)	Rusya SMR (RITM-200N)	Çin SMR (HTR-PM)	ThorAtom Türkiye (Th-MSR Tasarımı)
Reaktör Tipi / Güç	PWR / 15 MWe (derin kuyu reaktörü)	VVER-1200 PWR / 1.200 MWe	Entegre PWR / 55 MWe	HTGR Çakıl Yataklı / 105 MWe	Th-MSR tasarımı; öngörülen 100–300 MWe

Negatif Sıcaklık Katsayısı	✓ Mevcut (UO ₂ yakıt, standart PWR fiziği)	✓ Mevcut (UO ₂ /Zr kafes genleşmesi)	✓ Mevcut (marineden gelen kanıtlanmış tasarım)	✓ Çok güçlü (TRISO yakıt + grafit ısıl tepkisi, Doppler)	✓ Mevcut (egrimiş tuz negatif katsayı sağlar)
Negatif Boşluk Katsayısı	✓ Mevcut (~160 atm hidrostatik basınç buhar oluşumunu önler)	✓ Mevcut (VVER tasarımı gereği)	✓ Mevcut	● Uygulanamaz (helyum soğutmalı, sıvı su yok)	✓ Mevcut (MSR sıvı yakıt köpürmesini önler)
Doğal Sirkülasyon / Atık Isı Uzaklaştırma	✓ Yerçekimi + yoğunluk farkıyla (pompa gerektirmez, 1.500 m su sütunu termal tamponu)	✓ Pasif ısı uzaklaştırma sistemi (PHRS) + hava soğutmalı	✓ İntegral tasarım doğal sirkülasyonu destekler	✓ Çok güçlü (grafit ısıl kütlesi; test edildi: müdahalesiz soğuma kanıtlandı)	△ Tasarım aşamasında (MSR bölünür madde akışıyla çalışır)
Hidrostatik / Basınç Kaynağı	✓ 1.500 m su sütunu ~160 atm – aktif basınçlandırıcı gerektirmez	△ Aktif basınçlandırıcı (elektrik gerektirir, ancak POSV pasif çözüm)	△ Yarı-pasif (gaz basınçlandırıcı; acilde dizel yedek)	● Uygulanamaz (helyum ~7 MPa, aktif kompresör)	△ Düşük basınç avantajı (atmosferik baskıya yakın çalışır)
Fiziksel İzolasyon / Çevresel Kalkan	✓ Milyarlarca ton ana kaya (radyasyon, sismik, uçak çarpması, terörizm – hepsi pasif)	△ Çift konteyner binası (beton/çelik – aktif sistemler destekler)	△ Küçük hacim avantajı; kıyı veya yeraltı seçeneği değerlendiriliyor	△ TRISO kaplama birincil kalkan; yüzey binası ikincil	△ Sıvı yakıt hapsedme bariyer tasarımı henüz tartışmada
Kontrol Çubuğu SCRAM	✓ Yerçekimiyle düşme (elektrik kesilse çalışır, <2 sn)	✓ Yerçekimiyle düşme + bor enjeksiyonu	✓ Yerçekimiyle düşme	✓ SCRAM (grafit yansıtıcı kaldırılarak)	✓ Bölünür madde uzaklaştırma (drenaj pasif kapanma sağlar)

Kimyasal Pasif Kapatma (Bor)	✓ Çözünmüş bor (son savunma, aktif enjeksiyon gerektirmez)	✓ HA-1, HA-2, HA-3 Hidro-akümülatörler bor çözeltisi enjekte eder	✓ Borsuz tasarım; reaktivite kontrolü CRDM ile (donanma kanıtı)	● Uygulanamaz (grafit moderatör + Doppler yeterli)	✓ MSR, bölünür madde konsantrasyonu ayarıyla kontrol eder
Elektriksiz Çalışma Süresi	✓ Süresiz (fizik yasaları; müdahale gerekmez)	✓ ≥72 saat (pasif PHRS + HA sistemi; Fukushima sonrası şart)	✓ 24–72 saat (gaz presörleri + pasif soğutma)	✓ Süresiz (teorik) (grafit ısıl kütlesi; kanıtlanmış 2024 testi)	△ Tasarıma bağlı (konsept aşama; veri yok)
İşletme Durumu (2025)	Prototip sondaj kazısı (Kansas, ABD 2026; ticari 2027+)	İşletmede (Rusya, Beyaz Rusya; Akkuyu inşaatta)	İnşaat halinde (Yakutya, Rusya – 2028 hedefi)	İşletmede (Shidao Bay, Çin; ticari Ara. 2023)	Kavram/AR-GE (FIGES/ThorAtom; TÜBİTAK ile iş birliği)

Tablo Göstergeleri: ✓✓✓ = Olağanüstü pasif özellik | ✓✓ = Güçlü pasif özellik | ✓ = Mevcut | △ = Kısmen pasif/tasarıma bağlı | ● N/A = Uygulanamaz (farklı fizik)

Tablo 2: Kaza Senaryosu Karşılaştırması — Sistem Davranışı Analizi

Kaza Senaryosu	Derin Kuyu Reaktörü (Deep Fission Gravity)	III+ Kuşak (VVER-1200/Akkuyu)	Rusya/Çin SMR (RITM-200N/HTR-PM)	ThorAtom Türkiye (Th-MSR)
İstasyon Karartması (SBO)	Yerçekimiyle SCRAM + doğal sirkülasyon; hidrostatik basınç düşmez; müdahale gerekmez	Yerçekimiyle SCRAM + PHRS devreye girer; ≥72 saat müdahalesiz soğuma	Yerçekimiyle SCRAM; RITM: gaz presörü + doğal sirkülasyon; HTR-PM: grafit ısıl kütlesi	Teorik: bölünür madde drenajı pasif kapatma; tasarım kanıtlanmamış
Soğutucu Kaybı (LOCA)	Negatif boşluk katsayısı tepkimeyi durdurur; 1.500 m su rezervi (~180 m³) termal tampon	HA-1/HA-2/HA-3 pasif enjeksiyon; PHRS çekirdek soğutmasını sürdürür	RITM: küçük hacim + pasif ECCS; HTR-PM: gaz soğutucu kaybı çekirdek hasarına yol açmaz	MSR sıvı yakıt sisteminde boru hasarı farklı risk profili; tam analiz yok
Kontrol Çubuğu Arızası	Negatif sıcaklık + boşluk katsayısı güç artışını bastırır;	Negatif reaktivite geri beslemesi + HA sistemleri; 4'te 2	RITM: negatif katsayılar; HTR-PM: Doppler ve grafit	MSR: bölünür madde drenajı ile durdurulabilir; düzeltici

Çernobil Benzeri Senaryo (Pozitif Boşluk)	kimyasal bor son savunma	bağımsız kapatma traini	sıcaklık geri beslemesi çok güçlü	eylem mekanizmaları tasarımı
	İmkânsız: negatif boşluk katsayısı; RBMK aksine soğutucu kaybı gücü ARTIRMAZ	İmkânsız: VVER mimarisi gereği negatif boşluk katsayısı; Çernobil'den çıkarılan ders	İmkânsız: her iki tasarımıda negatif geri besleme; HTR-PM'de bütbütün farklı fizik	İmkânsız: MSR sıvı yakıtın köpürmesi gücü azaltır; RBMK grafit moderatörü yok
Fukushima Benzeri Senaryo (Aktif Soğutma Kaybı)	İmkânsız: aktif soğutmaya bağımlı değil; doğal sirkülasyon + su sütunu kütlesi yeterli	Büyük ölçüde azaltılmış: PHRS + HA; 72 saat müdahalesiz; bağımsız dizel yedek	RITM: pasif soğutma aktif kayıptan bağımsız; HTR-PM: 2024 kaybı soğutma testi başarılı	Tasarıma bağılı; MSR boru hasarı sıvı yakıt sızması riski taşır; henüz test yok

Tablo 3: IAEA Savunma Derinliği — Pasif Katman Değerlendirmesi

Savunma Katmanı	Derin Kuyu	VVER-1200 Akkuyu	RITM-200N (Rusya)	HTR-PM (Çin)	ThorAtom Türkiye
1. Özünü Fizik (Negatif katsayılar)	✓✓ Ekstra güçlü (hidrostatik)	✓✓ Standart güçlü	✓✓	✓✓✓ En güçlü (TRISO/Doppler)	✓✓
2. Pasif Mekanik (Yerçekimiyle SCRAM)	✓✓	✓✓ + Kimyasal	✓✓	✓✓	✓✓ (drenaj = SCRAM)
3. Pasif Termal-Hidrolik (Doğal sirkülasyon / basınç)	✓✓✓ Çok güçlü (1.500 m su sütunu)	✓✓ PHRS 72 saat+	✓✓ (integral tasarım)	✓✓✓ Çok güçlü (grafit kütlesi)	⚠ Tasarım aşamasında
4. Pasif Fiziksel İzolasyon (Kaya / çevresel engel)	✓✓✓ En güçlü (milyarlarca ton kaya)	⚠ Çift konteyner (beton/çelik, aktif ile)	⚠ Sınırlı (küçük hacim avantajı)	⚠ TRISO kaplama (birincil bariyer)	⚠ Sıvı yakıt hapsedme (tasarım tartışmada)

5. Kimyasal Pasif (Bor / sıvı yakıt kontrolü)	✓✓ (çözünmüş bor)	✓✓✓ HA-1/2/3 (çok aşamalı enjeksiyon)	✓ (borsuz tercih)	⊙ N/A (gaz soğutma)	✓✓ (konsantrasyon kontrolü)
Toplam Pasif Katman Skoru (gösterge niteliğinde, 15 üzerinden)	13/15	12/15	11/15	13/15	7/15

Not: Skor, her katmanda pasif niteliğin kapsamına ve kanıtlanmışlık düzeyine göre 0-3 arasında belirlenen gösterge niteliğinde bir değerlendirmedir; resmi IAEA değerlendirmesi değildir.

Tablo 4: Temel Güvenlik ve Teknik Parametreler

Temel Güvenlik Parametresi	Derin Kuyu (Gravity/DB-PWR)	VVER-1200 (Akkuyu V509)	RITM-200N	HTR-PM	ThorAtom Th-MSR
Güç Çıkışı (MWe)	15 (ölçeklenebilir >1 GWe küme)	1.200	55 (2 modül = 110 MWe)	105 (2 × 200 MWt türbüne bağlı)	100–300 (planlanan)
Çalışma Basıncı	~160 atm (hidrostatik, pasif)	160 atm (aktif basınçlandırıcı)	~155 atm (karma)	~7 MPa helyum (aktif kompresör)	Yakın atmosferik (düşük basınç avantajı)
Çalışma Sıcaklığı (çıkış)	~315 °C	320 °C	295–313 °C	750 °C (gaz çıkışı)	600–700 °C (öngörülen)
Yakıt Tipi	LEU UO ₂ (2×2 ve 3×3 montaj)	LEU UO ₂ (%4,95 zenginleşme)	LEU UO ₂ (<20% zenginleşme)	TRISO küre (UO ₂ < %17)	Th-232 / U-233 (tuz içinde)
Yakıt Yenileme Periyodu	2–8 yıl (reaktör değişimi)	12–18 ay	5–6 yıl (kara) 10 yıl (buz kırıcı)	Sürekli doldurma (pebble bed)	Sürekli (sıvı yakıt)

Çekirdek Hasar Frekansı (CDF, reaktör-yıl başına)	$< 10^{-8}$ (tasarım hedefi)	$< 10^{-7}$ (III+ standart)	$< 10^{-7}$ (Rosatom hedefi)	$< 10^{-8}$ (TRISO ile)	Belirsiz (konsept aşama)
Tasarım Ömrü (yıl)	Kuyu: ~50 yıl (reaktör: 2–8 yıl)	60 yıl	60 yıl	40–60 yıl	40+ yıl (öngörülen)

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

5.1 Derin Kuyu Reaktörünün Özgün Pasif Avantajları

Deep Fission Gravity reaktörü, beş karşılaştırma parametresinden **dördünde mevcut tüm tasarımlar arasındaki en güçlü pasif konumunu** korumaktadır. Özgün farkı yaratan iki temel mekanizma şunlardır:

- Hidrostatik Basınç Kaynağı:** 1.500 m su sütununun sağladığı ~160 atm basınç, normal PWR'ların çalışma basıncıyla özdeşdir. Aktif basınçlandırıcı devre dışı kalsa dahi basınç düşmez; çünkü su sütunu fiziksel olarak mevcuttur. **Bu mekanizma VVER-1200 dahil hiçbir mevcut III+ reaktörünün sunmadığı bir özünü güvenlik katmanıdır.**
- Ana Kaya Fiziksel İzolasyonu:** Milyarlarca tonluk taş örtüsü, uçak çarpması, kasırga, sel, terörist saldırısı gibi olağan dışı durum senaryolarına karşı pasif ve ezici üstünlük sunar. Olası bir radyonüklid sızıntısının yüzey biyosferine ulaşması jeolojik simülasyonlara göre yüz binlerce yılı aşacaktır.

5.2 VVER-1200/Akkuyu'nun Güçlü Yanları ve Kısıtları

VVER-1200 (AES-2006), Fukushima sonrası düzenleme gerekliliklerini karşılayan geniş çaplı **pasif ısı uzaklaştırma sistemi (PHRS)**, üç kademeli bor-enjeksiyonlu hidro-akümülatör sistemi (HA-1/HA-2/HA-3) ve çift konteyner binasıyla III+ kuşağın en iyi örneklerinden birini temsil etmektedir. **72 saatlik müdahalesiz soğuma kapasitesi Fukushima tipi senaryolara karşı önemli bir güvence sağlamaktadır.**

Bununla birlikte, çalışma basıncının aktif basınçlandırıcı sistemi gerektirmesi en belirgin kısıttır. Bina ve altyapı boyutu, sismik tasarım gereksinimleri ve yüzey tesisi gereklilikleri kaçınılmaz biçimde aktif sistemlerin desteğini zorunlu kılmaktadır.

5.3 HTR-PM ve Kanıtlanmış Özünü Güvenlik

Shidao Bay'deki HTR-PM, **Temmuz 2024 yayımlanan Joule makalesiyle ticari ölçekte ilk kez** müdahalesiz doğal soğuma kapasitesini deneysel olarak doğrulamıştır. TRISO yakıtının olağanüstü yüksek sıcaklık dayanımı (~1.600 °C'ye kadar), grafitin büyük ısı kütlesi ve çok güçlü Doppler geri beslemesi, bu tasarımı fizik yasaları açısından en sağlam inherent güvenlik profiline sahip kılmaktadır.

Tablo 3'teki skor analizine göre HTR-PM, Derin Kuyu reaktörüyle birlikte en yüksek pasif katman puanını paylaşmaktadır; ancak her iki tasarımın güçlü olduğu katmanlar birbirinden farklıdır.

5.4 RITM-200N'nin Operasyonel Temeli

RITM-200N'nin güçlü yanı tasarım özgünlüğünden değil, **400'den fazla reaktör-yıllık deniz işletmesi** deneyiminden gelmektedir. **Entegral tasarım, birincil devredeki boru sayısını azaltarak LOCA olasılığını zaten düşürür. Bununla birlikte aktif-pasif hibrit basınçlandırma ve dizel yedek gereksinimleri, Derin Kuyu reaktörüne kıyasla pasif bağımsızlık açısından sınırlı bir profil sergilemektedir.**

5.5 ThorAtom Th-MSR: Potansiyel ve Belirsizlik

Toryum-MSR tasarımı, özünü güvenlik açısından kuramsal olarak en elverişli nükleer yakıt döngüsünü sunmaktadır: yüksek sıcaklıktaki sıvı yakıt, atmosferik basınca yakın çalışma, pasif drenaj SCRAM ve minimal yarı ömrü olan atıklar. Türkiye'nin küresel toryum rezervleri içindeki payı bu teknoloji için stratejik bir zemin oluşturmaktadır.

Ancak ThorAtom, 2026 'da **yalnızca AR-GE ve kavram aşamasındadır**; işletmeye alınmış bir reaktörü henüz yok. Sıvı yakıt boru hasarları, tuz yönetimi ve uzun vadeli malzeme uyumluluğu gibi mühendislik zorlukları, pasif güvenlik potansiyelinin pratikte ne ölçüde gerçekleşeceğini belirsiz kılmaktadır. Bu nedenle analizimizdeki skor kestirimleri diğer teknolojilere göre, en düşük güven aralığını yansıtmaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışma, beş farklı reaktör mimarisini IAEA savunma derinliği çerçevesinde beş pasif güvenlik katmanı üzerinden karşılaştırmıştır. Temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

3. **Derin Kuyu Fisyon Reaktörü**, hidrostatik pasif basınç ve ana kaya fiziksel izolasyonu bakımından mevcut tüm tasarımlar arasında eşsiz bir konumdadır. Pasif bağımsızlık açısından en yüksek potansiyele sahiptir; ancak henüz proto-tip aşamasındadır.
4. **VVER-1200/Akkuyu**, III+ kuşağın en kapsamlı pasif-aktif hibrit sistemine sahip; kanıtlanmış, işletmedeki ve Fukushima sonrası gereklilikleri karşılayan olgun tasarımıdır.

5. **HTR-PM**, TRISO yakıtı ve grafit ısıl kütlesinin sağladığı özünü güvenlikle 2024 deneysel testleriyle kanıtlanmış en güçlü inherent güvenlik profili sunan işletmedeki yegâne reaktördür.
6. **RITM-200N**, 400 reaktör-yıllık deniz deneyimine dayanan kanıtlanmış teknoloji temeli ve entegral tasarımıyla güvenilir bir SMR seçeneğidir; ancak pasif bağımsızlık III+ kural gerektiren hibrit yapısı nedeniyle sınırlıdır.
7. **ThorAtom Th-MSR**, Türkiye'nin toryum rezervlerine dayanan yüksek potansiyelli ancak henüz kanıtlanmamış bir konsepttir. Pasif güvenlik özellikleri kuramsal olarak yüksek olmakla birlikte, teknik olgunluk düzeyi diğer teknolojilerin çok gerisindedir.

Sonuç olarak, nükleer güvenliğin geleceği tek bir tasarımda değil, çoklu pasif bariyer katmanlarının sinerjik bütünleşmesinde yatmaktadır. Bu analizimizde incelenen beş teknoloji, söz konusu yaklaşımın farklı boyutlarını temsil etmekte; birbirinin tamamlayıcısı olan güvenlik felsefeleri geliştirmektedir.

ÇERNOBİL VE FUKUŞİMA KAZALARIYLA BUGÜNKÜ MODERN REAKTÖRLERİN PASİF GÜVENLİK ÖNLEMLERİNİN VE YAPILARININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÇERNOBİL (1986) — RBMK Reaktörü

En kritik eksiklik **pozitif boşluk katsayısıydı**: soğutucu kaynadığında reaktör gücü düşmek yerine *artıyordu* — modern reaktörlerin tam tersi. Buna ek olarak kontrol çubukları yerçekimiyle düşmüyordu; elektrik ve aktif sürücü sistemleri gerektiriyordu. Grafit uçlu çubukların kısa süreli güç artışı yaratan tasarım kusuru da süreci hızlandırdı. **Derin kuyu veya VVER-1200'deki negatif katsayılar bu senaryoyu fiziksel olarak imkânsız kılar.**

FUKUSHİMA (2011) — BWR Mark-I Reaktörleri

Temel sorun **pasif ısı uzaklaştırma sisteminin yokluğu**ydı. Tsunami aktif soğutma pompalarını ve dizel jeneratörleri devre dışı bırakınca artık ısıyı (decay heat) uzaklaştıracak hiçbir bağımsız mekanizma kalmadı. **Reaktörler kapansa da çekirdek eridi. VVER-1200'in PHRS sistemi ile Derin Kuyu'nun doğal sirkülasyonu (pompa gerektirmez) ve su sütununun ısıl kütlesi bu senaryoya karşı doğrudan geliştirilmiştir.** HTR-PM'in 2024'te yapılan kaybı soğutma testi de bu boşluğu kapattığını deneysel olarak kanıtlamıştır.

Ortak Eksiklik

Her iki reaktörde de fiziksel izolasyon yoktu — yüzey tesisleri uç senaryolara (sismik dalgalar, tsunami) karşı savunmasızdı. Derin kuyu tasarımının ana kaya ve toprak örtüsü bu zayıflığı kökten ortadan kaldırır.

Ayrıca reaktör projelerinin çok farklı olması bu pasif eksikliklerle kazayı hızlandırdı ve genişletti. Örneğin Çernobil'in Containmentı yoktu, Fukushima'da ise ivedi elektrik üreteçleri yer altı katta bulunduklarından Tsunami suları ile işlemez hale geldiler.

Özetle sonuçlar

ÇERNOBİL (1986) — RBMK Reaktörü

Pasif güvenlik eksiklikleri: Pozitif boşluk katsayısı — soğutucu kaynadığında güç düşmek yerine artıyordu. Kontrol çubukları yerçekimiyle değil aktif elektrikli sürücülerle çalışıyordu.

Proje/mimari hatası — Containment yokluğu: RBMK reaktörünün batı standartlarındaki gibi sağlam bir çelik-beton basınçlı konteyner binası (containment) yoktu. Güç artışı ve buhar patlaması çekirdeği havaya uçurunca radyoaktif maddelerin önünde hiçbir mühendislik bariyeri kalmadı; grafit yangını 10 gün boyunca açık atmosfere yayıldı. VVER-1200/Akkuyu'nun çift katmanlı containment'ı ve Derin Kuyu'nun ana kaya örtüsü bu senaryoyu fiziksel olarak engellerdi.

FUKUSHIMA (2011) — GE BWR Mark-I Reaktörleri

Pasif güvenlik eksiklikleri: Aktif soğutma pompalarına tam bağımlılık; doğal sirkülasyona dayalı bağımsız artık ısı uzaklaştırma sistemi yoktu.

Proje/mimari hatası — Dizel jeneratörlerin yanlış konumlandırılması: Acil dizel jeneratörler deniz seviyesine yakın **bodrum katlara** yerleştirilmişti. 14 metrelik tsunami dalgası bu katları tamamen su altında bıraktı; jeneratörler ilk dakikalarda işlemez hale geldi. Soğutma pompalarına güç kesildi ve artık ısı (decay heat) çekirdeği eritti. Jeneratörler binalara entegre değil yüksek bir konuma veya su geçirmez yapılara yerleştirilmiş olsaydı Fukushima bir operasyonel kaza olarak kalabilirdi, felakete dönüşmezdi.

Ek olarak Mark-I'nin containment tasarımı küçük hacimli ve göreceli olarak zayıftı; yükselen buhar basıncını tahliye etmek için operatörler kasıtlı olarak konteyneri açmak zorunda kaldı — bu da radyoaktif buharı doğrudan reaktör binasına verdi ve binaların patlamasına yol açtı (**Aslında bu reaktörler 1970'de yapılırken NRC Containment'ın zayıf olduğunu yüksek basınca dayanamayacağını bir raporla bildirmiş ve yapan şirket ile Japon yetkili kurumu uyarmıştı ama uyarıya uyulmadı!**).

İki Kazanın Ortak Mimari Dersi

Her iki olayda da kazayı tetikleyen başlangıç olayı (güç artışı / tsunami) önlenemezdi; ancak felaketi yaratan asıl etken **son savunma bariyerlerinin tasarım gereği zayıf veya sistelerin yanlış konumlandırılmış olmasıydı. Modern III+ ve derin kuyu tasarımlarında bu ders şu somut önlemlerle**

karşılanmıştır: çift veya üçlü Containment, yüksek konumlu veya pasif güç kaynaklı acil sistemler, yerçekimiyle çalışan kontrol mekanizmaları ve — derin kuyu konseptinde — tüm aktif altyapının fiziksel olarak ulaşılamaz bir derinliğe taşınması.

7. KAYNAKÇA VE NOTLAR

Birincil Kaynaklar

8. Deep Fission Inc. (2024). *Technology Overview — Deep PWR, Deep Geo Vault, Deep Geothermal Steam Generator*. Şuradan alındı: <https://www.deepfission.com/technology>
9. Deep Fission Inc. (2024). *Regulatory Engagement Plan (REP) — DFBR-1 Standard Design Approval*. U.S. NRC, ML24135A163.
10. Deep Fission Inc. (2024). *Conceptual Design White Paper (DB-PWR)*. U.S. NRC, ML24172A286.
11. Redondo-Valero, E. et al. (2023). Safety systems of Gen-III/Gen-III+ VVER reactors. *Revista Nuclear — Safety Section*. <https://www.revistanuclear.es/en/safety/safety-systems-of-gen-iii-gen-iii-vver-reactors/>
12. Redondo-Valero, E. et al. (2025). Safety margins improvement by means of the passive heat removal system and the HA-2 in VVER-1000/V320 reactors. *ScienceDirect — Nuclear Engineering and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105682>
13. Nuclear Engineering International (2024). The RITM-200N reactor as a terrestrial unit. Şuradan alındı: <https://www.neimagazine.com/analysis/the-ritm-200n-as-a-terrestrial-unit/>
14. Wikipedia / RITM-200 (Güncellendi: Mart 2025). RITM-200 pressurized water reactor design. Şuradan alındı: <https://en.wikipedia.org/wiki/RITM-200>
15. Power Magazine (2024, Eylül). Nuclear Milestone: China's HTR-PM Demonstrates Inherent Safety. *Joule* dergisinde yayımlanan araştırmaya dayalı haber. <https://www.powermag.com>
16. Dong, Z. et al. (2025). Coordinated control of the World's first multi-modular high temperature gas-cooled reactor power plant HTR-PM. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S173857332500508X>
17. Nature Communications (2025). Testing the feasibility of multi-modular design in an HTR-PM nuclear plant. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58194-7>
18. ThorAtom/FIGES (2019). Scientific and Technical Activities — MSR Road Map Turkey. Şuradan alındı: <https://thoratom.com/en/nuclear-technology>
19. Nuclear Business Platform (2024). The Potential of Small Modular Reactors in Türkiye. Şuradan alındı: <https://www.nuclearbusiness-platform.com>
20. IAEA (2024). SMR Technology Catalogue 2024 Edition. IAEA, Viyana. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_catalogue_2024.pdf
21. Power Magazine / POWER (2024, Mart). A Closer Look at Two Operational Small Modular Reactor Designs. KLT-40S ve HTR-PM analizi. <https://www.worldnuclearreport.org>

22. IEEE Spectrum (2025, Kasım). Deep Fission's Plan for Underground Nuclear Reactors. <https://spectrum.ieee.org/underground-nuclear-reactor-deep-fission>
23. GLOBSEC (2022). Faster, Cheaper, Smarter: Promise and Pitfalls of Small Modular Reactors. <https://www.globsec.org>
24. Strategyinternational (2025). Passive safety injection and natural circulation features in advanced reactors. <https://strategyinternational.org/2025/02/05/publication161/>
25. ScienceDirect/Applied Energy (2023). Passive safety systems analysis for advanced PWR designs. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261923000338>