



Geleceğin Gücü: SMR Teknolojisiyle Savunma Sanayinde Malzeme ve Çevre Dönüşümü

Doç. Dr. Murat ŞAHİN

08 Ocak 2026

ANKARA

SMR'nin Temel Özellikleri

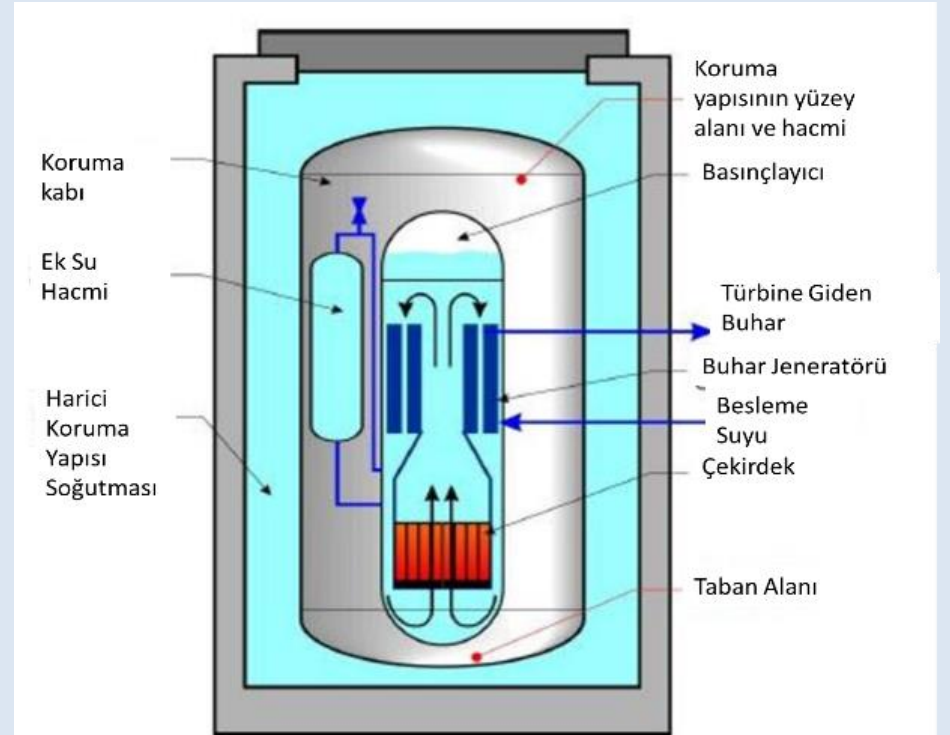
10–300 MWe güç aralığı
Fabrikada üretilen modüler tasarım

Sahada hızlı kurulum

Pasif soğutma → dış enerji gerekmez

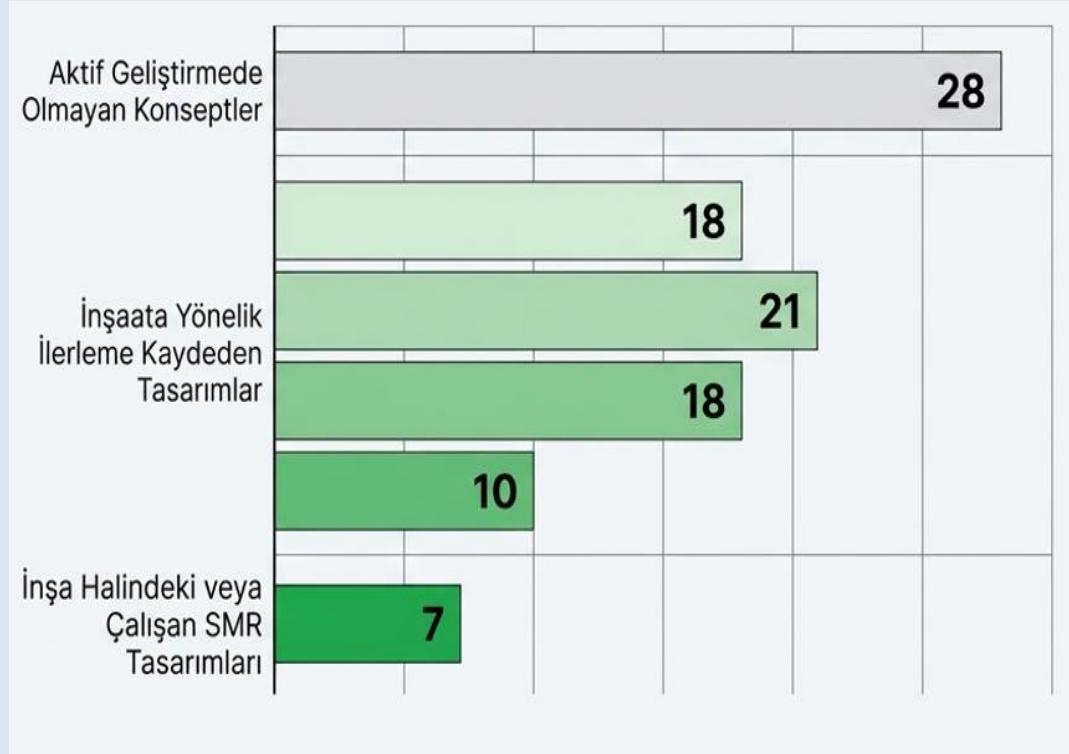
Şebekeden bağımsız “ada modu” çalışması

Uzun yakıt çevrimi (yıllarca ikmalsiz çalışma)



SMR'LAR KONSEPTEN GERÇEKLİĞE EVİRİLİYOR

2025 yılı itibarıyla 12 ülkede toplam 127 SMR projesi aktif olarak geliştirilmektedir. Bu projelerden 7 tanesi ya inşaat halinde ya da ticari işletmededir.



SMR Teknolojisinin Savunma Sanayinde Kullanımı

- Askerî operasyonlarda enerji kritik bir unsur olması
- Yakıt konvoyları saldırıya açık ve riskli olması
- Üslerin büyük kısmı şebekeye bağımlı olması
- Uzun süre yakıt ikmali gerektirmeden çalışabilir olması
- SMR'ler: modüler, taşınabilir, pasif güvenli sistemlerin önemini arttırmaktadır.



Army Nuclear Power Program (ANPP)

Reaktör	Kategori	Yer	Yıllar	Öne Çıkan Özellik
SL-1	Düşük Güç / Sabit	Idaho	1958–1961	Tek ölümcül reaktör kazası
SM-1	Sabit	Fort Belvoir	1957–1973	İlk çalışan ANPP reaktörü
SM-1A	Sabit	Fort Greely (Alaska)	1962–1972	Soğuk iklim prototipi
PM-2A	Taşınabilir	Camp Century (Greenland)	1960–1963	İlk taşınabilir reaktör
PM-3A	Taşınabilir	McMurdo (Antarktika)	1962–1972	Antarktika'daki tek reaktör
MH-1A	Yüzen	Panama Bölgesi	1967–1976	İlk yüzen nükleer santral
ML-1	Mobil	Test Sahaları	1961–1965	Gaz-soğutmalı mobil reaktör

SMR'lerin Denizaltı Platformlarında İlk Kullanımı

- İlk başarılı uygulama alanı: **denizaltılar**

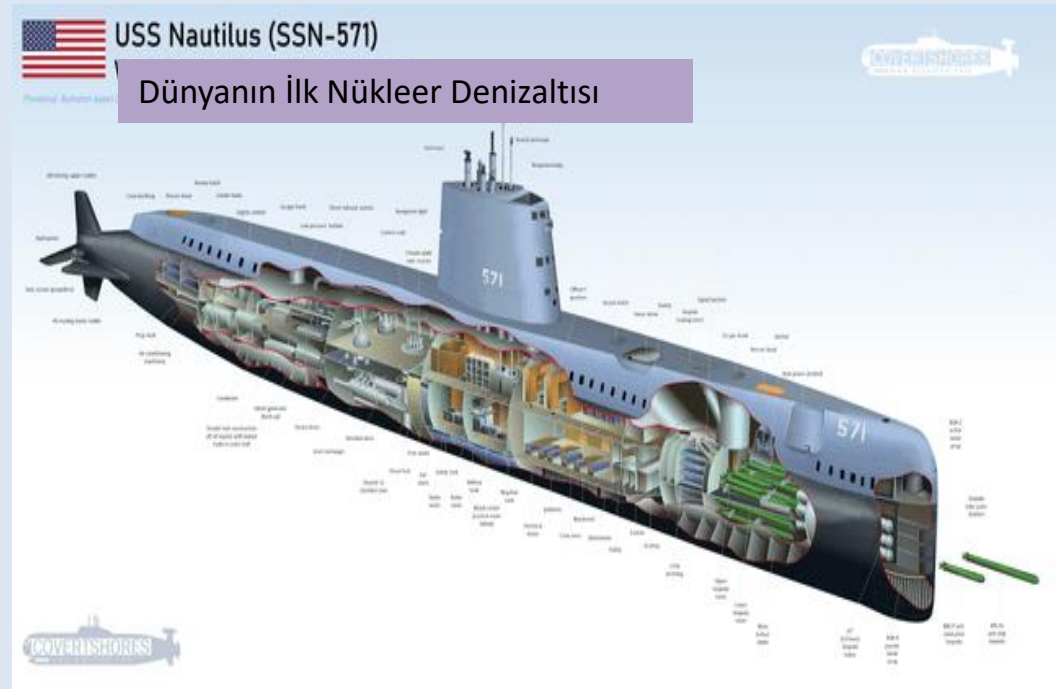
- USS Nautilus (1955)** → ilk nükleer denizaltı

- USS Enterprise (1961)** → ilk nükleer uçak gemisi

- Günümüzde **160'tan fazla gemi, 200'den fazla reaktör** ile çalışıyor (World nuclear org)

- Sivil örnek: **Akademik Lomonosov** (yüzer nükleer santral)

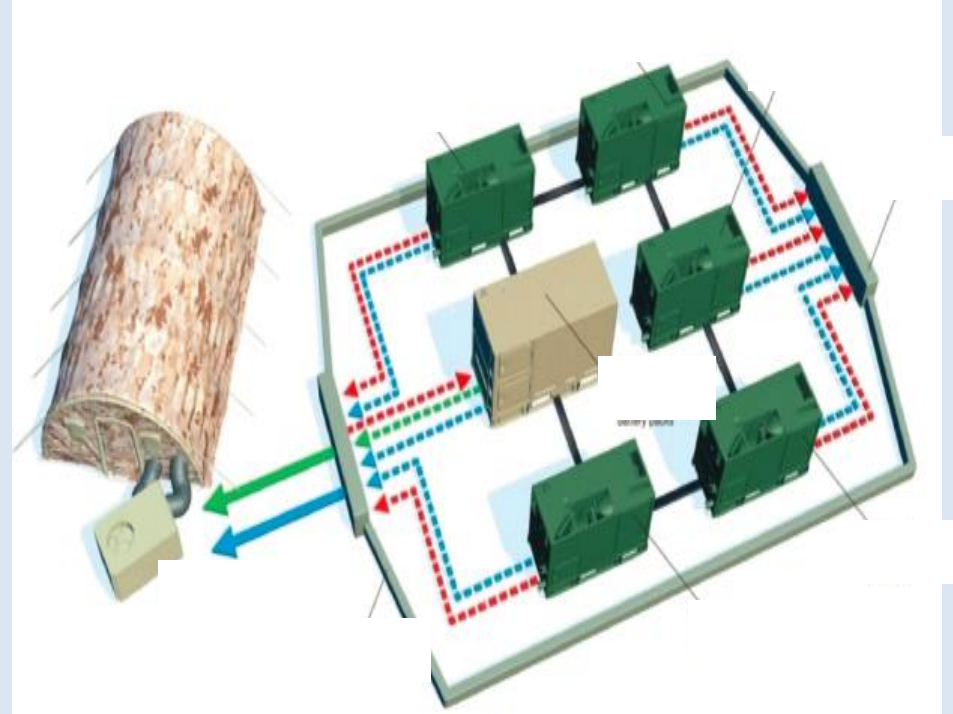
- Avantaj: uzun süre kesintisiz seyir, hız, gizlilik, yakıt bağımsızlığı



Enerji Güvenliği ve Taktik Avantaj

Askerî Üslerde SMR'nin Sağladığı Avantajlar

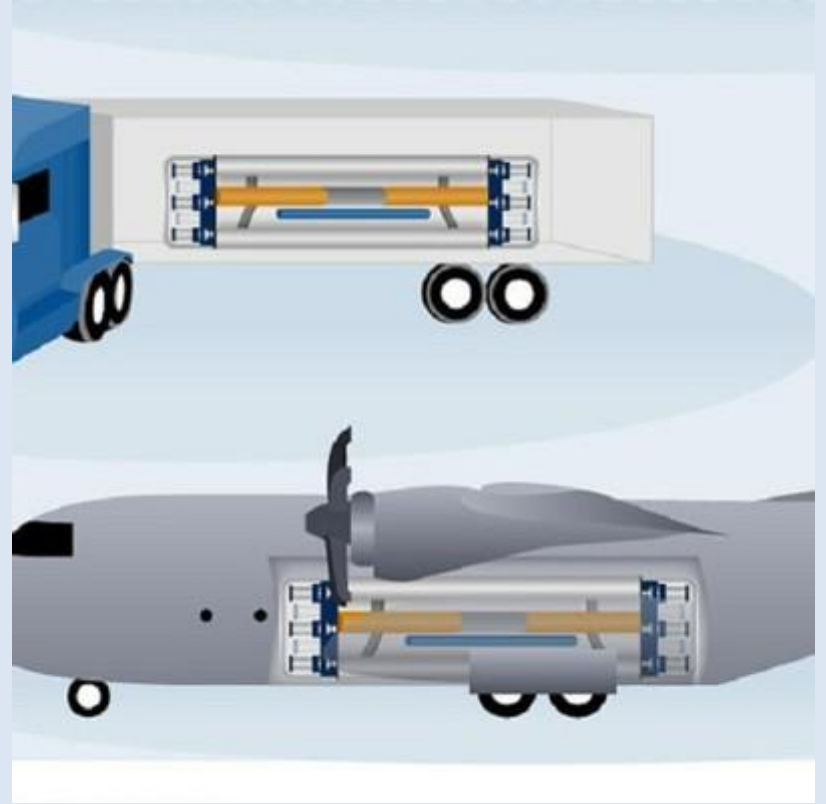
- Şebekeden bağımsız çalışabilir (ada modu)
- Kesintisiz ve güvenilir güç üretimi
- Yakıt konvoyu ihtiyacını ortadan kaldırır / azaltır
- Saldırı ve sabotaj riskini düşürür
- Karbon emisyonu dizel jeneratörlere göre **%90 daha düşük**
- Lojistik maliyetleri ve riskleri ciddi ölçüde azalır



Project PELE

Project PELE (ABD Stratejik Kabiliyetler Ofisi, 2019)

- 1–10 MWe gücünde **taşınabilir mikro reaktör** geliştirme projesi
- 72 saat içinde** kurulup çalışır hâle gelebilir
- Kara, hava ve deniz yoluyla taşınabilir
- C-17 kargo uçağıyla taşınabilirlik** temel gereksinim
- Testler: Idaho National Laboratory (INL) ve Eielson Hava Üssü
- Amaç: ileri üslerde dizel bağımlılığını azaltmak, enerji güvenliği sağlamak



JANUS Programı

JANUS Programı (ABD, 2025–)

- Dayanak: **Executive Order 14299 (23 Mayıs 2025 tarihli Başkanlık Kararnamesi)**
- Ortak yürütücü kurumlar:
 - **ABD Savunma Bakanlığı (DoD)**
 - **ABD Enerji Bakanlığı (DOE)**
- Amaç: askeri üslerde mikro reaktör konuşlandırmak
- Hedef: **2028'e kadar bir ABD üssünde SMR kurulumu**
- Teknik destek: Idaho National Laboratory (INL)
- Project PELE'nin geniş kapsamlı ve kalıcı sürümü



Kara Platformlarında SMR Kullanımı

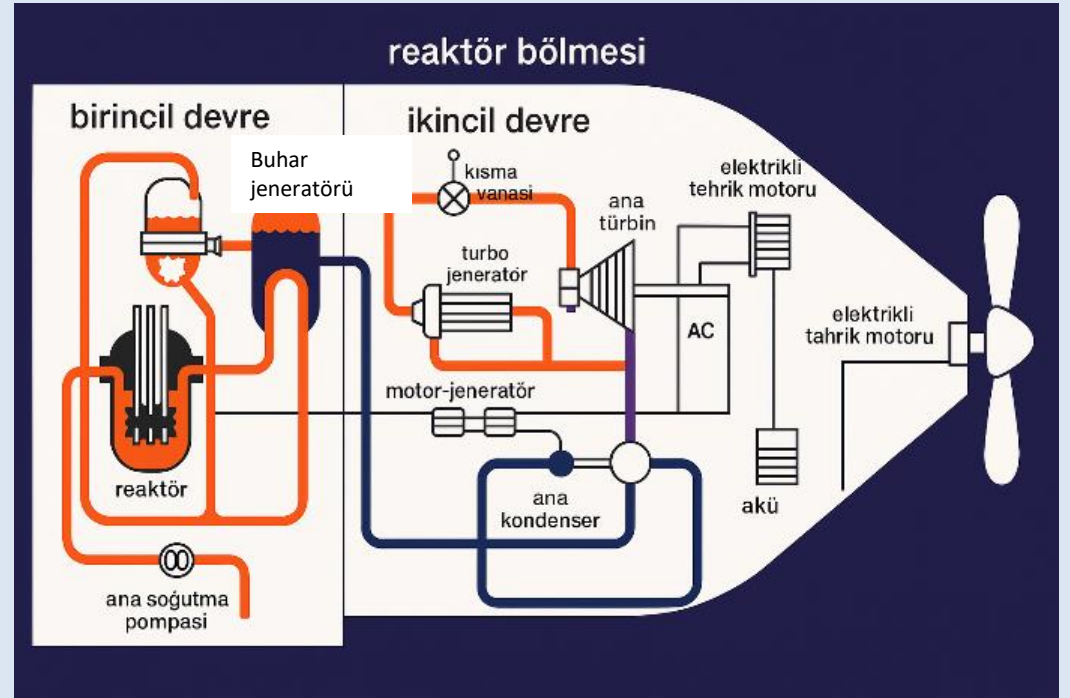
Kara Tabanlı Mikro Reaktörler

- ML-1'in modern versiyonları: mobil, konteyner boyutunda reaktörler
- ~3 MWt güç, **3 yıl** yakıt ikmali olmadan çalışma kapasitesi
- İleri konuşlu üslerde dizel bağımlılığını azaltır
- Yakıt konvoyu ihtiyacını **%30–50 azaltabilir**
- Hızlı kurulum, zorlu arazi koşullarında bile güvenilir güç üretimi



Modern Deniz Gücünde SMR'nin Rolü

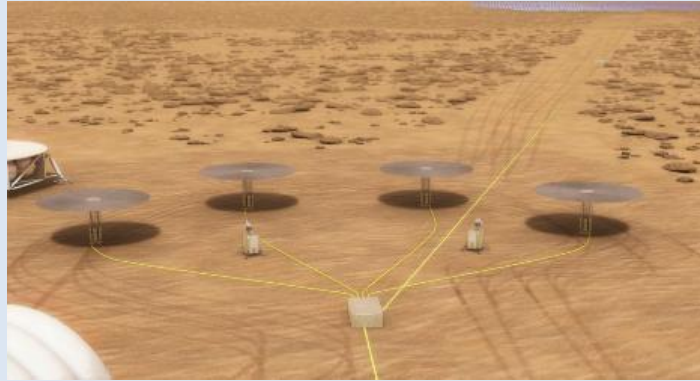
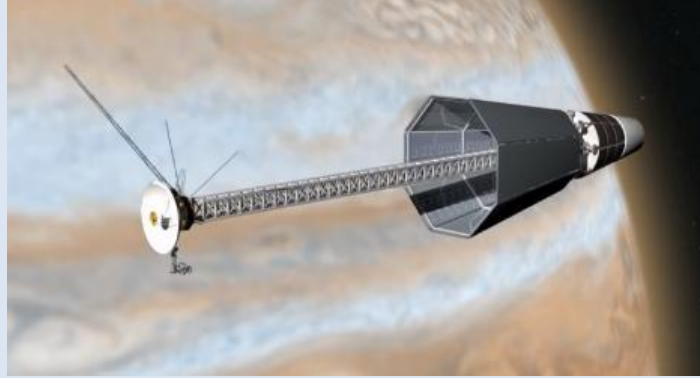
- Aylarca yakıt ikmali gerektirmeyen **sürekli enerji**
- Yüksek hız ve uzun menzil
- Sessiz çalışma sayesinde **gizlilik ve düşük tespit edilebilirlik**
- Stratejik caydırıcılık kapasitesinin artması
- Lojistik bağımsızlık → ikmal zafiyetlerinin azaltılması
- Soğutma avantajı: deniz ortamı güvenliği artırır



Hava ve Uzay Uygulamaları

Hava ve Uzay Platformlarında SMR / Mikro Reaktör Kullanımı

- 1960’larda nükleer uçak denemeleri güvenlik nedeniyle durduruldu
- Modern dönemde odağımız: **uzay görevleri**
- KRUSTY (Kilopower) projesi: 1–10 kWe güç
- Mars, Ay ve derin uzay misyonları için uzun süreli enerji kaynağı
- Askerî uydularda: uzun ömür, radyasyon dayanımı, kesintisiz güç
- Havacılıkta güvenlik ve kaza riski nedeniyle sınırlı kullanım



Tartışma:

Avantajlar ve Sınırlamalar

Avantajlar

- Enerji bağımsızlığı ve yüksek operasyonel süreklilik
- Pasif güvenlik sistemleri → düşük dış bağımlılık
- Lojistik risklerin azalması (yakıt konvoyları)
- Düşük karbon emisyonu
- Siber saldırılara karşı dayanım

Sınırlamalar

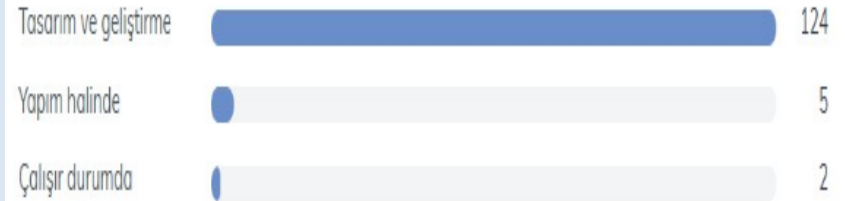
- Lisans ve düzenleyici süreçlerde belirsizlikler
- İlk üretim maliyetlerinin yüksek olması
- Kamuoyu algısı ve nükleer güvenlik endişeleri
- Nükleer atık yönetimi
- Askerî uygulamada güvenlik protokollerinin karmaşıklığı

Çıkarımlar

- SMR'ler modern ordular için **stratejik bir enerji çözümü**dür
- ANPP'den PELE ve JANUS'a uzanan süreç → teknolojinin olgunlaştığını gösteriyor
- Kara, deniz ve uzay platformlarında geniş uygulama alanı
- Enerji güvenliği, lojistik bağımsızlık ve caydırıcılık sağlar
- Türkiye için: ileri üslerde enerji avantajı + gelecekte nükleer tahrikli denizaltı potansiyeli
- SMR = sadece güç üretimi değil, **askerî kapasiteyi güçlendiren bir unsur**



Toplam 131 SMR projesinden Çin’de çalışan mevcut: 2 adet SMR bulunmaktadır. Kaynak (<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-power-reactors/small-modular-reactors/small-modular-reactor-smr-design-database>)



	HTR-PM	KLT- 40 S	BWRX-300
			
Ülke/ Şirket	ÇİN/CNNC/INET	RUSYA/ROSATOM	KANADA/GE/HITACHI
Tip	Yüksek Sıcaklıklı Gaz Reaktörü	PWR (Yüzer Nükleer Güç Santrali)	Kaynar Su Reaktörü (BWR)
Güç	210 MWe	64 Mwe (2 × 32)	300 MWe
Yakıt	TRISO (LEU<20%)	LEU	UO ₂
Durum (2025)	Ticari işletmede. (Aralık 2023'ten beri çalışıyor.)	Ticari işletmede. (Mayıs 2020'den beri Pevek'te elektrik ve ısı sağlıyor.)	(İnşaat lisansı alındı (Mayıs 2025).Darlington sahasında ilk SMR yapımı başladı.)

NuScale VOYGR

Ülke/Şirket: ABD/NuScale

Tip:Entegre (PWR)

Güç :77MWe/modül

Yakıt: LEU

Durum (2025): NRC Standart Tasarım onayı alındı. CFPP projesi iptal edildi,yeni müşteri arayışı sürüyor)

NATRIUM

Ülke/Şirket: ABD/Terra Power/GEH

Tip: Sodyum Soğutmalı Hızlı Reaktör + Erimiş Tuz Depolama

Güç :345 MWe

Yakıt: HALEU

Durum (2025): Yakıt anlaşmaları yapıldı. Hedef 2030.

ROLLS-ROYCE SMR

Ülke / Şirket: Birleşik Krallık/Rolls-Royce SMR

Tip: PWR

Güç :470 MWe

Yakıt: LEU

Durum (2025): Birleşik Krallıkta tercih edilen teknoloji. CEZ ile saha çalışmaları devam ediyor.

PROJECT PELE

Ülke/Şirket: ABD/Do D SCO/BWXT

Tip: HTGR Mikroreaktör

Güç :1.5 MWe/modül

Yakıt: TRISO (HALEU)

Durum (2025): Çekirdek üretimi başladı.2028 için taşınabilir demo hedefi.

SMR Seçeneklerinin Türkiye Açısından Değerlendirilmesi

REAKTÖR	ARTILARI	EKSİLERİ	UYGUNLUK DURUMU
BWRX-300	Şebekeye uygun güç; lisanslama sürecinde ilerlemiş olması; Batı finansmanına erişim potansiyeli	Yakıtta dışa bağımlılık; Türkiye'nin BWR tecrübesinin olmaması	GÜÇLÜ ADAY
Rolls-Royce SMR	Yüksek gücüyle şebekeye çok uygun ; AB/UK finansman potansiyeli	Henüz geliştirme aşamasında; maliyet belirsizliği	GÜÇLÜ ADAY
Natrium	Enerji depolama özelliğiyle yenilenebilir kaynakları destekleme potansiyeli	HALEU yakıtının Türkiye'de bulunmaması; teknolojinin erken aşamada olması.	Gelecek Vadeden (Uzun Vadeli)
NuScale VOYGR	Kanıtlanmış teknoloji; çok modüllü esneklik; ilk ticari SMR olma potansiyeli	Yüksek proje maliyeti; yeni müşteri bulma ihtiyacı; CFPP iptali.	Gelecek Vadeden (Orta Wade)
Xe-100	Yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal; inherent güvenlik özellikleri; yakıt esnekliği	Teknoloji ve yakıt döngüsü olgunlaşmamış; düzenleyici belirsizlikler	Gelecek Vadeden (Uzun Vadeli)
ThorAtom (Yerli)	Yerli toryum kaynaklarını kullanma; uzun vadede enerji bağımsızlığı; yerli teknoloji geliştirme.	Teknoloji geliştirme aşamasında; endüstriyel ölçekte deneyim eksikliği; uzun lisanslama süreci.	Gelecek Vadeden (Stratejik)

TÜRKİYE İÇİN YOL HARİTASI ÇİFT YÖNLÜ İLERLEMELİ

Yol 1: Yakın Vadeli Fırsatların Değerlendirilmesi (2025-2035)



Aksiyon: BWRX-300 ve Rolls-Royce SMR gibi lisanslama süreçlerinde ilerlemiş Batılı tasarımlar için fizibilite çalışmaları, teknoloji transferi ve potansiyel ortaklıkların araştırılması.



Amaç: Hızlı kurulum ile enerji arz güvenliğine katkı sağlamak, SMR işletme ve düzenleme tecrübesi kazanmak.

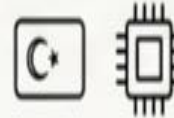


**Taktiksel ve
Hızlı Kazanım**

Yol 2: Uzun Vadeli Stratejik Yatırım (2025-2040+)



Aksiyon: ThorAtom projesine yönelik Ar-Ge fonlarının artırılması, üniversite-sanayi işbirliklerinin güçlendirilmesi ve uluslararası standartlara uygun bir lisanslama sürecinin başlatılması.



Amaç: Enerjide tam bağımsızlık, yerli toryum kaynaklarının kullanımı ve Türkiye'nin yüksek teknoloji ihracatçısı konumuna gelmesi.



**Stratejik ve
Dönüştürücü**

Termik Santrallerin Çok Boyutlu Çevresel Yükü



Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri

SO₂, NO_x ve PM_{2.5} (Partikül madde iki buçuk veya iki nokta beş mikrometreden küçük partikül madde) gibi kirleticiler, solunum ve kalp-damar hastalıklarına yol açıyor. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre, bu kirleticiler her yıl milyonlarca erken ölümün nedenlerinden biridir.



Su Kaynakları ve Termal Kirlilik

Bir kömür santrali, 1 MWh enerji üretimi için yaklaşık 1.5–2.0 m³ su çeker. Deşarj edilen sıcak su, nehir ve göllerdeki oksijen seviyesini düşürerek ekosistemi bozar.



Katı Atık ve Toprak Kirliliği

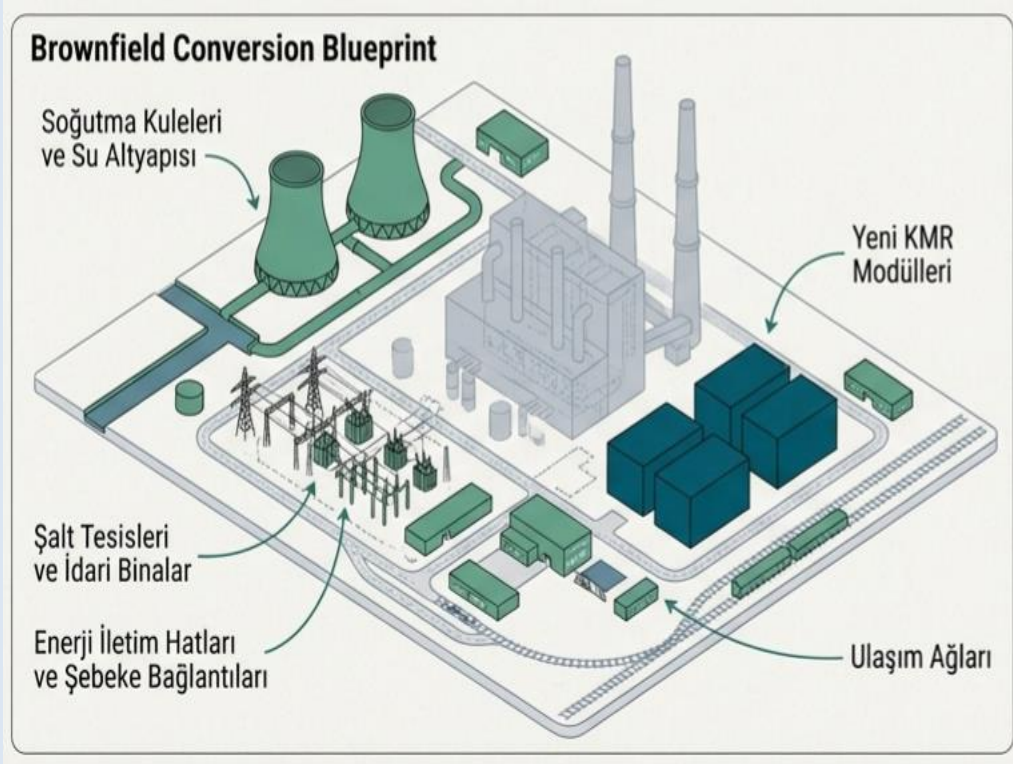
Kömürün yanmasıyla oluşan kül ve cüruf, arsenik, kurşun, cıva gibi ağır metaller içerir. Bu atıklar yeraltı sularına ve toprağa sızarak kalıcı kirlilik yaratır.



Arazi Kullanımı ve Habitat Kaybı

Kömür madenciliği ve kül depolama sahaları, geniş araziler gerektirerek habitat kaybına, toprak erozyonuna ve biyoçeşitlilikte azalmaya neden olur.

Termik Santralleri Yıkmak Yerine Dönüştürmek (Brownfield Dönüşümü)



KMR dönüşümü, 'brownfield conversion' (mevcut sanayi alanının yeniden kullanımı) yaklaşımına dayanır. Bu, sıfırdan bir tesis inşa etmenin çevresel ve ekonomik yükünü ortadan kaldırır.



Termik santralleri devreden çıkarmak, çevresel yükü ortadan kaldırırsa da beraberinde ciddi sosyoekonomik sorunlar ve varlık kaybı getirir:

- **Altyapı Kaybı:** Milyarlarca dolarlık şebeke bağlantıları, soğutma sistemleri ve iletim hatları atıl kalır.
- **İstihdam Sorunu:** Bu santraller, bölgelerinde önemli bir istihdam kaynağıdır. Kapatılmaları, sosyal ve ekonomik istikrarsızlığa yol açar (“Adil Geçiş” ilkesine aykırı).
- **Arz Güvenliği Riski:** Portföyden büyük bir baz yük kapasitesinin aniden çıkması, şebeke kararlılığını ve enerji arz güvenliğini tehlikeye atar.

Mevcut Termik Santral Sahalarını Yeniden Değerlendirmek (Brownfield Dönüşümü)

ÖNCESİ



SONRASI



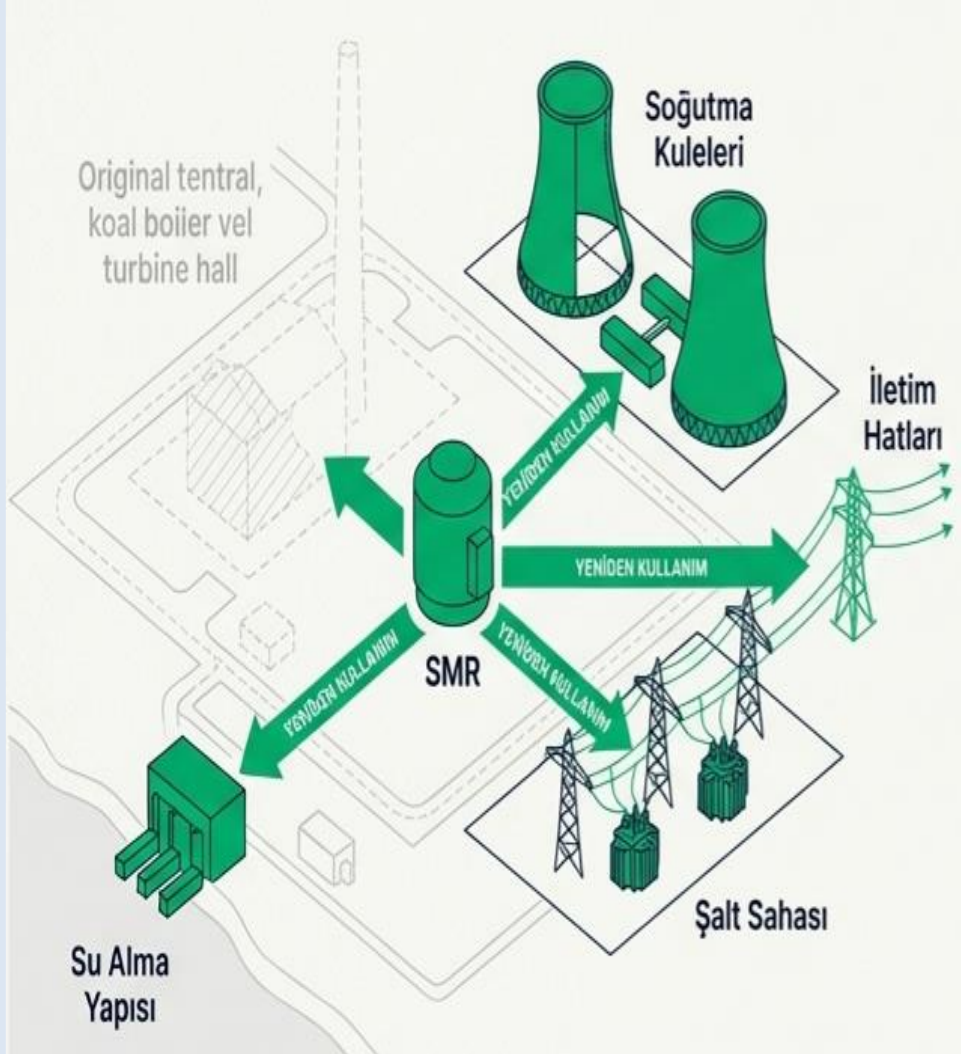
Yeniden Kullanılan Altyapı:



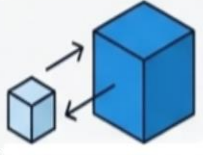
Temel Kazanımlar

- Maliyet Avantajı
- Zaman Kazanımı
- Çevresel Koruma
- Sosyal Süreklilik

Termik Santral Dönüşüm Kolaylığı



- **Mevcut Altyapıyı Kullanma:** İletim hatları, şalt sahaları ve soğutma sistemleri yeniden kullanılır. Bu, milyarlarca dolarlık tasarruf sağlar.
- **Daha Az Çevresel Etki:** Yeni arazi kullanımı ve inşaat kaynaklı çevresel tahribat önlenir. Gömülü karbon emisyonları azalır.
- **Hızlandırılmış İzin Süreçleri:** Enerji üretimi için zaten lisanslanmış olan sahalar, izin süreçlerini kolaylaştırır.
- **Sosyal Süreklilik:** Mevcut iş gücü, yeni teknolojide yeniden istihdam edilerek "Adil Enerji Dönüşümü" sağlanır.



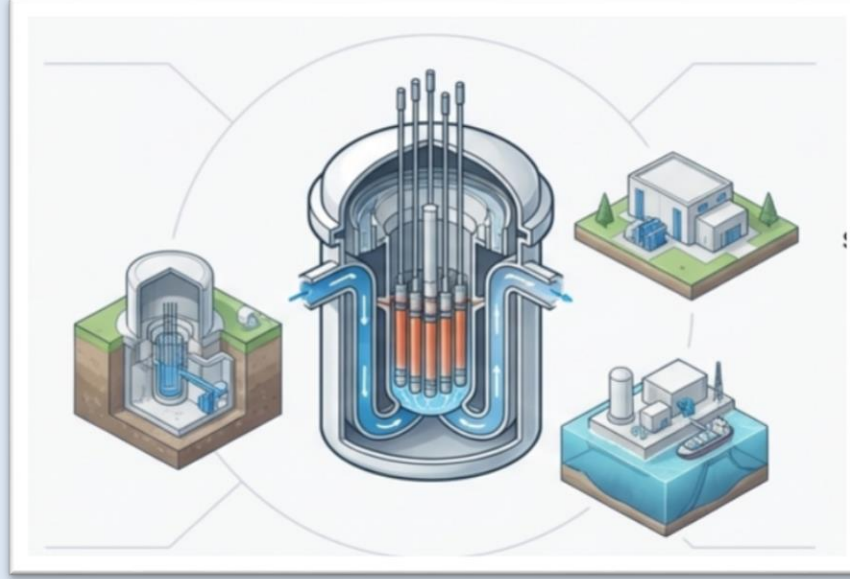
SMR



DAHA HIZLI
Fabrika üretimi
ve modüler yapı
sayesinde 3-5 yıl
gibi kısa inşaat
süreleri.

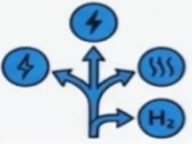


DAHA GÜVENLİ
Gelişmiş "3+ Nesil" pasif
güvenlik sistemleri
sayesinde insan
müdahalesi olmadan
kendi kendini soğutma ve
durdurma yeteneği.



DAHA KÜÇÜK

Düşük ilk yatırım
maliyeti ve esnek saha
seçimi. Mevcut
Altyapılara
entegrasyon kolaylığı



DAHA ESNEK

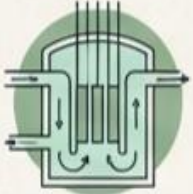
Elektrik üretiminin yanı
sıra sanayi ısı, hidrojen
üretimi ve su arıtma gibi
çok yönlü kullanım alanları.

SMR'ın Teknik Yapısı

Temel Tasarım Tipleri



Basınçlı Su Reaktörleri (PWR): En yaygın ve kanıtlanmış teknoloji; mevcut altyapıyla en uyumlu olan tip.



Gaz Soğutmalı Reaktörler (GCR): Yüksek verimlilik ve endüstriyel ısı üretimi potansiyeli.

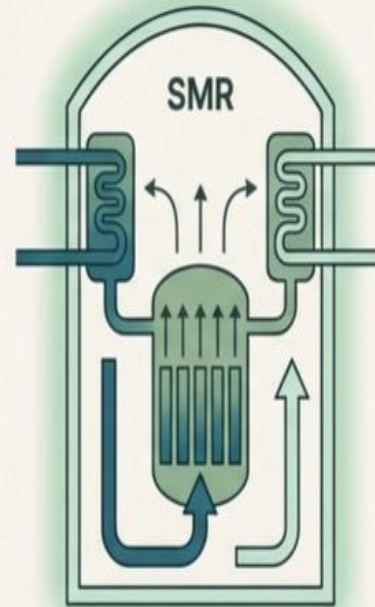


Sıvı Metal Soğutmalı Reaktörler (SFR/LFR): Atık miktarını azaltma potansiyeli sunan kapalı yakıt döngüsü imkanı.

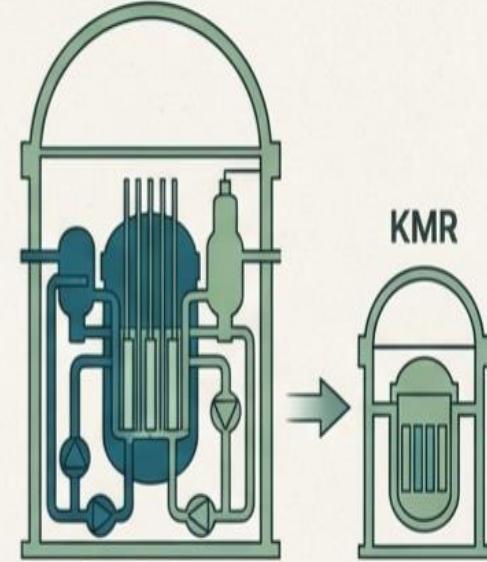


Erimiş Tuz Reaktörleri (MSR): Düşük Düşük basınçta çalışarak patlama riskini ortadan kaldıran, doğal güvenliğe sahip tasarımlar.

Güvenlik Paradigmaları



Pasif Güvenlik: Dış müdahale veya enerji olmadan reaktörün kendini soğutabilmesi ve durdurabilmesi, kaza riskini en aza indirir.

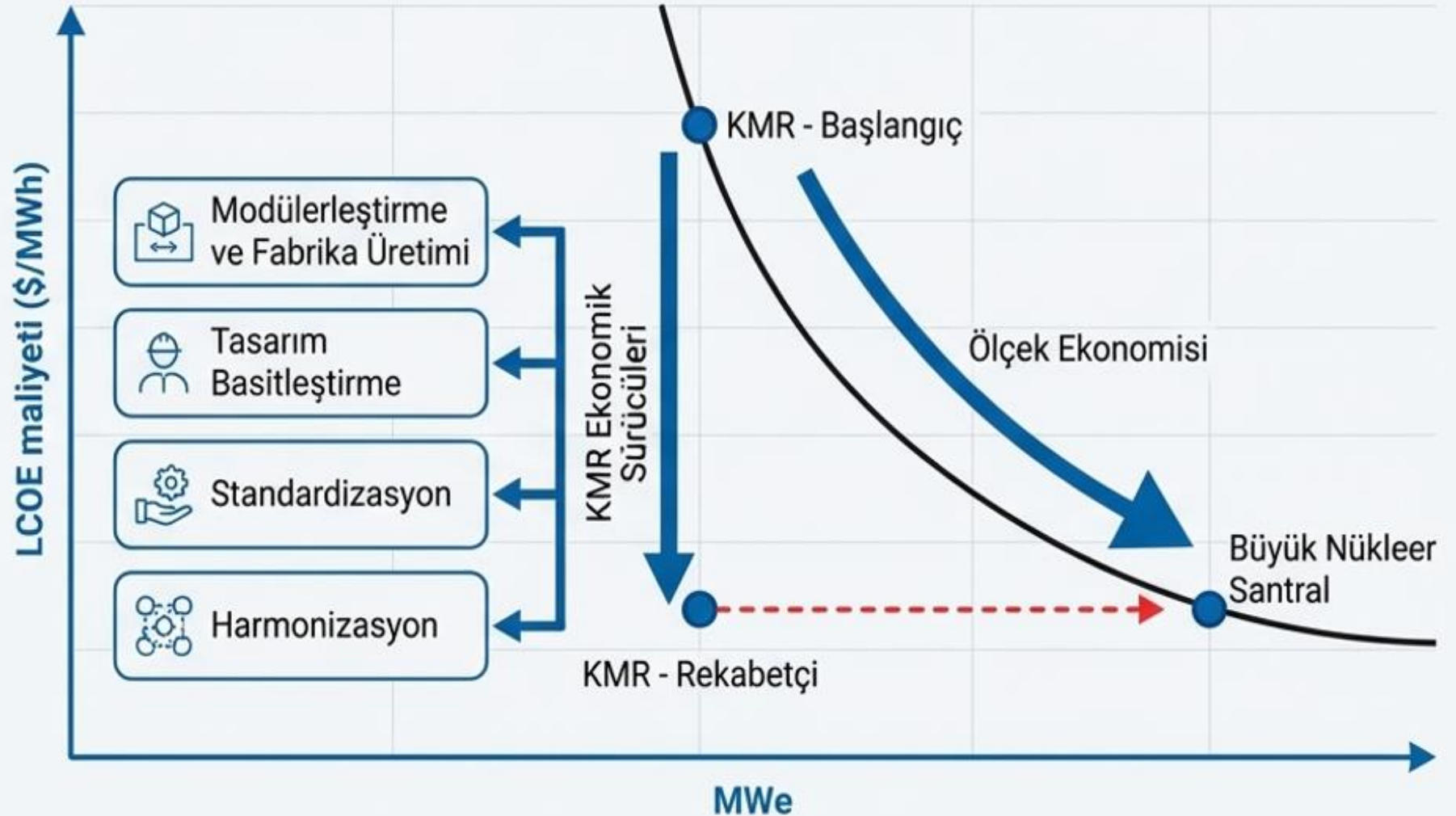


Geleneksel Büyük Reaktör

KMR

Küçük Çekirdek Yapısı: Düşük yakıt yoğunluğu, reaktör kontrolünü kolaylaştırır ve atık üretimini optimize eder.

SMR; Seri Üretimle Maliyet Rekabetçiliği Sağlar



Daha Temiz Hava Ve Daha Sağlıklı Su

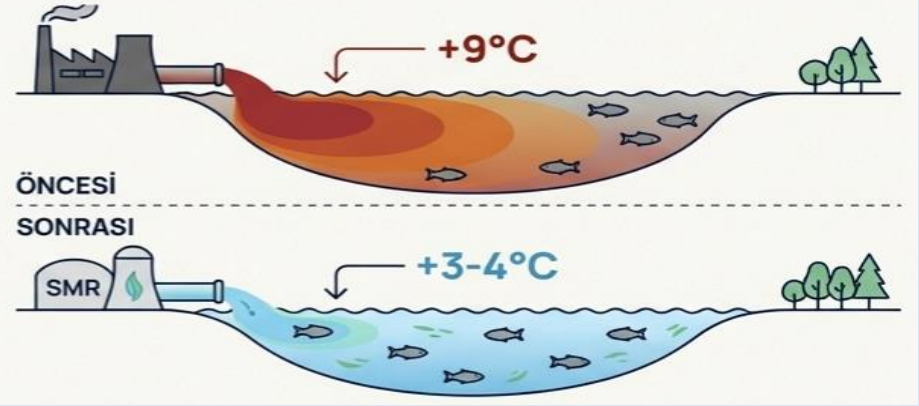
Hava Kalitesi



SMR dönüşümü ile SO₂, NO_x ve PM_{2.5} Partikül madde iki buçuk veya iki nokta beş mikrometreden küçük partikül madde) gibi sağlığa zararlı hava kirleticileri tamamen ortadan kalkar. Bu, yerel halk sağlığında doğrudan iyileşme ve asit yağmurlarının sonu demektir.

Su Kaynakları

Termal Kirliliğe Son



SMR'lerin yüksek verimli soğutma sistemleri, su kaynaklarına deşarj edilen ısıнын sıcaklığını termik santrallere göre %60 oranında azaltır (+9°C yerine +3-4°C). Bu, su ekosistemlerini ve biyoçeşitliliği korur.

Kaynak: NREL ,Thermal Pollution from Plants (2018),
UNECE,Life Cycle Assessment Of Electricity Generation Options(2021)

Dönüşümün Atık Yönetimine Etkisi



Termik Santral Atığı

Miktar: 1 GW'lık santral yılda yaklaşık 400.000 ton kül üretir.

İçerik: Toksik ağır metaller içerir ve geniş depolama alanları gerektirir. Yeraltı sularına sızma riski yüksektir.

KMR Atığı

Miktar: Aynı kapasiteli KMR sistemi yılda sadece 25-30 ton kullanılmış yakıt üretir.

Yönetim: Hacimsel olarak 10.000 kat daha azdır. Kompakt, mühendislik ürünü kaplarda güvenle depolanır. "Kapalı yakıt döngüsü" ile atıkların %90'ı yeniden yakıt olarak kullanılabilir.

Termik Santral vs. SMR Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

Çevresel Gösterge

Termik Santral (Kömürlü)
SMR

İyileşme Oranı

Karbon Ayak İzi
(gCO₂e/kWh)



Termik Santral

820-1000

KMR Sistemi

10-20

%98
Azalma ↓

Su Kullanımı (m³/MWh)



Termik Santral

1.8

KMR Sistemi

0.5

%72
Azalma ↓

Arazi Kullanımı (km²/GW)



Termik Santral

5.5

KMR Sistemi

2.0

%64
Azalma ↓

Katı Atık (m³/TWh)



Termik Santral

1200 (kül ve cüruf)

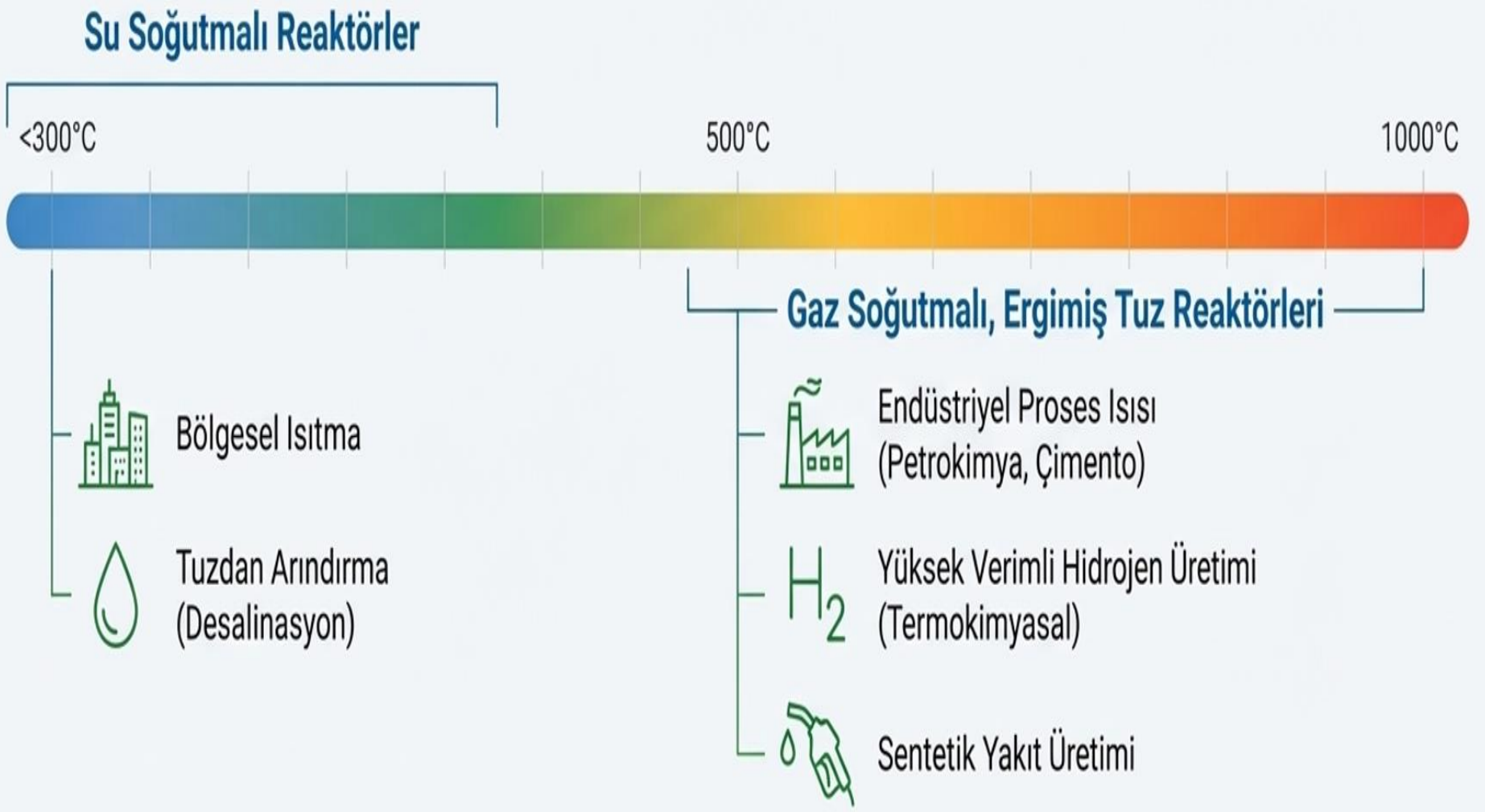
KMR Sistemi

0.15 (radyoaktif)

%99 Hacimsel
Azalma ↓

SMR, elektrik üretiminin ötesinde stratejik bir uygulamadır

SMR'ler farklı sıcaklık aralıklarında çalışabilme yetenekleri sayesinde, karbondan arındırılması zor sektörler için benzersiz fırsatlar sunar.



Dönüşümün Yol Haritası

1

2

3

4

Toplam süre:
3-5 yıl



Aşama 1:

Saha Uygunluk Analizi Mevcut santral sahasının jeolojik, sismik ve hidrolojik özelliklerinin nükleer güvenlik standartlarına göre incelenmesi.

Aşama 2:

Altyapının Yeniden Kullanımı Soğutma kuleleri, su devreleri ve iletim hatlarının KMR sistemine entegrasyonu için mühendislik planlaması.

Aşama 3:

Modül Kurulumu ve Entegrasyon Fabrikada üretilen KMR modüllerinin sahaya getirilerek reaktör binasına montajı.

Aşama 4:

Test ve İşletmeye Alma Pasif güvenlik sistemlerinin test edilmesi, yakıtın yüklenmesi ve şebekeye senkronizasyon.

Dünya Geneline SMR Dönüşüm Projeleri (Küresel Dönüşümün Öncüleri)

Kanada - Alberta Dönüşüm Programı:

Kömürden çıkış planı kapsamında, Alberta'daki termik santral alanlarının NuScale tipi reaktörlere dönüştürülmesi hedefleniyor. Amaç: 'Adil geçiş' ilkesiyle istihdamı ve çevreyi korumak.

Finlandiya - Loviisa Fizibilite Çalışması:

Fortum şirketi, eski termik santral altyapısını KMR konseptine entegre etmek için pilot bir çalışma yürütüyor.

Analizler, su çekiminde %60, karbon emisyonunda %95 azalma potansiyeli gösteriyor (Fortum, 2024).

ABD - Wyoming (Natrium Projesi):

Kapatılan bir kömür santrali sahasında, TerraPower tarafından sodyum soğutmalı bir KMR kuruluyor.

Hedef: Mevcut altyapıyı kullanarak %90 karbon azaltımı (DOE, 2023).

Türkiye İçin Stratejik Fırsat



Türkiye'nin geniş termik santral altyapısı, karbon nötr hedeflere ulaşmada benzersiz bir dönüşüm potansiyeli sunmaktadır.



Türkiye'nin Kazanımları

Ulusal Karbon Taahhütlerine Uyum (NDC):

Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmada enerji sektöründen kaynaklanan emisyonları radikal biçimde azaltır.

Enerji Arz Güvenliği: İthal fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak yerli ve kesintisiz baz yük enerji kaynağı sağlar.

"Adil Enerji Dönüşümü" (Just Transition): Kömür bölgelerindeki mevcut nitelikli iş gücünü korur ve yüksek teknolojili yeni istihdam alanları yaratır.

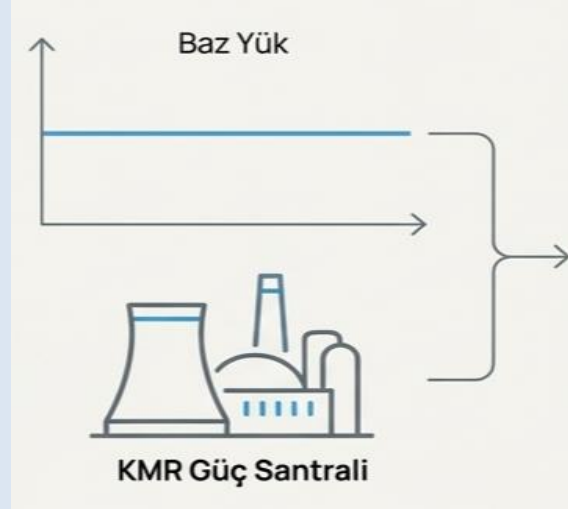
Endüstriyel Yetkinlik: Yeni nesil nükleer teknolojilerde ulusal uzmanlık ve teknoloji geliştirme kapasitesi oluşturur.

Türkiye’de SMR’ler, rüzgar ve güneş gibi değişken yenilenebilir kaynaklarla mükemmel bir uyum içinde çalışır.



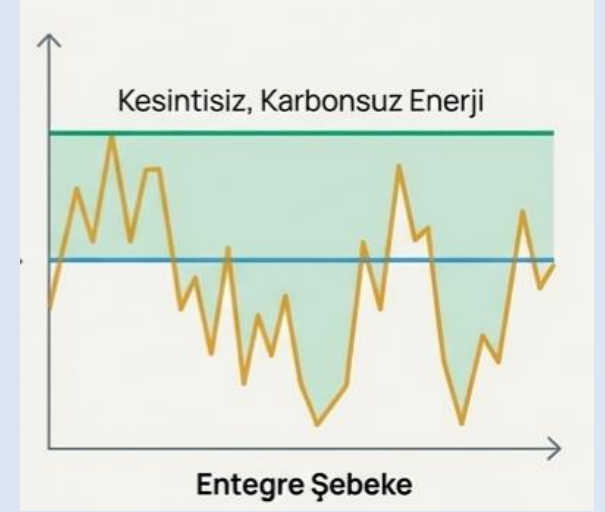
Baz Yük Gücü:

Güneşin parlamadığı veya rüzgarın esmediği zamanlarda şebekeye 7/24 kesintisiz, karbonsuz enerji sağlarlar.



Yük Takibi (Load-Following):

Üretimlerini, yenilenebilir enerjideki dalgalanmalara göre esnek bir şekilde ayarlayarak şebeke istikrarını korurlar.



Karbonsuz Sisteme Geçişin Kilidi:

KMR’ler olmadan, tamamen yenilenebilir kaynaklara dayalı bir şebekenin istikrarını sağlamak teknik ve ekonomik olarak çok daha zordur.

Elektrik Dışı Uygulamalar ve Milli Güvenlik Boyutu



Milli Güvenlik Uygulamaları

Nükleer güç; uçak gemileri ve denizaltılar için uzun menzil, yüksek hız ve güç yoğunluğu gibi vazgeçilmez avantajlar sağlar. SMR teknolojisi, bu platformlar için kompakt ve güvenli bir güç kaynağı sunar.



Türkiye'nin Nükleer Denizaltı (NÜKDEN) Projesi'ni hayata geçirmesi, stratejik önem arz etmektedir. MİLDEN sonrası, kısa vadede NÜKDEN Projesi'nin hayata geçirilmesi maksadıyla bugünden itibaren konuya odaklanılması stratejik bir önem arz etmektedir.

(Kaynak: MİA Raporu)

2030-2034

Uygulama ve Başlangıç



Hedef: İlk pilot projenin başlatılması.

- Teknoloji seçimi ve stratejik ortaklıkların kurulması.
- Finansman modelinin netleştirilmesi ve teşviklerin devreye alınması.
- İlk SMR için lisanslama başvurularının yapılması.

2035 Sonrası

Yaygınlaşma ve Yerleşme



Hedef: Seri kurulumu geçiş ve bölgesel merkez olma.

- KMR'lerin enerji portföyüne entegrasyonu.
- Yerli sanayinin tedarik zincirinde aktif rol alması (%50+ yerli katkı hedefi).
- Bölgesel pazarlara ihracat potansiyelinin değerlendirilmesi.

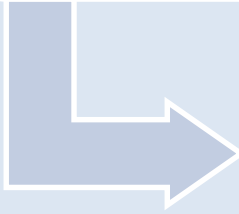


**Termik santrallerin KMR'lere dönüştürülmesi,
sadece bir teknoloji değişikliği değildir.**

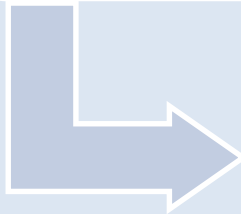
**Bu, mevcut kirletici enerji altyapımızı, iklim nötr
geleceğin en değerli varlıklarından birine
dönüştürmek için stratejik bir araçtır.**

**KMR KURULUMUNDA YENİ NESİL MALZEME
TEKNOLOJİLERİ, TEKNOLOJİK YOL HARİTASI VE
ÜLKEMİZ KALKINMA PLANINDAKİ YERİ**

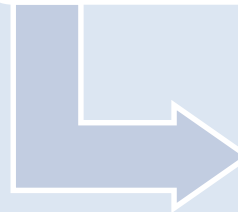
KMR Tanımı ve
Ana Bileşenleri



Kullanılan yeni
nesil malzeme
teknolojileri



Kalkınma
Planındaki yeri,
Türkiye Vizyonu



Tartışma Ve
Sonuç

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

Bileşen	Alt Parça	Malzeme Cinsi	Malzeme	Sıcaklık (C°)
Helium gas turbines	Blades	Ni-based alloys	DS IN792LC	700
Helyum Gaz Türbini	Turbine disks	Ni-based alloys	CM247LC	
			IN706	
			IN718	
			Udimet 720LI	1000
Intermediate heat exchanger		Composite C/C (VHTR)		
Ara ısı Eşanjörü		Austenitic stainless steel	Inconel 617	850
		Ni-based alloy	Alloy 230	1000
		Ni-based ODS		
		Refractory material		
		Monolithic SiC		
		SiC/SiC composites		650
Cladding, duct materials		C/SiC composites		
		SiC _f /SiC (fiber-reinforced)		
		Advanced austenitic steel		
Kaplama ve bağlantı malzemeleri		Ferritic-martensitic steel	HT9	650
			Fe-13	
			18CrWTi	
			T91	
			T92	
			EUROFER	
In-core components	Core barrel	Zircaloy		
	Core support	Ni-based alloys	Alloy 800	
Reaktör içi bileşenler	Inside shroud	Ferritic-martensitic steel	Hastelloy X	550
			Fe-13	
			18CrWTi	
			T91	
			T92	
			EUROFER	
RPV	VHTR	Ferritic-martensitic steel	9Cr-1MoV (T91)	
			PM2000	
Reaktör Basınçlı Kap	GFR	Ferritic-martensitic steel	9Cr-1MoV	
			7-9Cr-2WV	
	LFR	Stainless steel	316L(N)	
			316FR	
		Microalloyed 316	PNC 316	
			US D9	
		HT-UPS	15Cr-15Ni-Ti	
			12Cr-25Ni-Ti	
	SCWR	Low alloy steels	A508-4N	
			3Cr-3WV	
		Ferritic-martensitic steel	9Cr-1MoV	280
				500

Tablo 2 Çeşitli bileşenlerde kullanılan farklı malzemeler ve bu malzemelerin çalışma sıcaklıkları [7]

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

Element	Fe	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Nb	N	Al	V
Min.	-	0.08	0,3	-	-	0,2	-	8	0,85	0,06	0,03	-	0,18
Maks.	Bal.	0,12	0,6	0,2	0,01	0,01	0,4	9,5	1,05	0,1	0,07	0,04	0,25

Tablo 4 9 Cr-1Mo-V Kimyasal Kompozisyonu [4]

Material	Chemical compositions (wt%)															
	Range	Elements														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	Ni	B	Al	Ti	Cu
Hastelloy XR	Maximum	0.15	1.0	0.5	0.04	0.03	23.0	2.5	10.0	1.0	20.0	Remainder	0.01	0.05	0.03	0.5
	Minimum	0.05	0.75	0.25	-	-	20.5	-	8.0	0.20	17.0	Remainder	-	-	-	-
Hastelloy X	Maximum	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03	23.0	2.5	10.0	1.0	20.0	Remainder	0.01	0.5	0.15	0.5
	Minimum	0.05	-	-	-	-	20.5	0.5	8.0	0.20	17.0	Remainder	-	-	-	-

Tablo 5 XR ve X alaşımlarının kimyasal kompozisyonları [4]

Element	Ağırlık %	Fonksiyonu
Ni	44,5-62	Matris elementi, yüksek sıcaklık dayanımı sağlar.
Cr	20-24	Oksidasyon ve korozyon direncini artırır.
Co	10,0 – 15,0	Yüksek sıcaklıkta dayanımı ve mikro yapı kararlılığını artırır.
Mo	8,0 – 10,0	Katı çözelti sertleşmesi, yüksek sıcaklık mukavemeti.
C	0,05-0,15	Karbür oluşumu ile dayanımı artırır.
Al	0,8-1,5	Oksit film oluşumunu destekler.
Ti	0,3-0,6	Karbür / nitrür kararlılığını sağlar.
Fe	≤ 3,0	Mikro yapı kontrolü.
Si+Mn+Cu	≤ 1,0	Küçük miktarlarda bulunabilir

Tablo 6 Alloy 617 ye ait alaşım Elementlerinin Kimyasal Kompozisyonu ve Fonksiyonları [5]

	Malzeme
EU	9Cr-1Mo-V
France	9Cr-1Mo-V
Japan	XR ve XRII
Kore	617
İsviçre	TiAl ve PM2000

Tablo 3 Ülkelerin reaktör içi bileşenlerinde kullandıkları malzemeler [4]

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

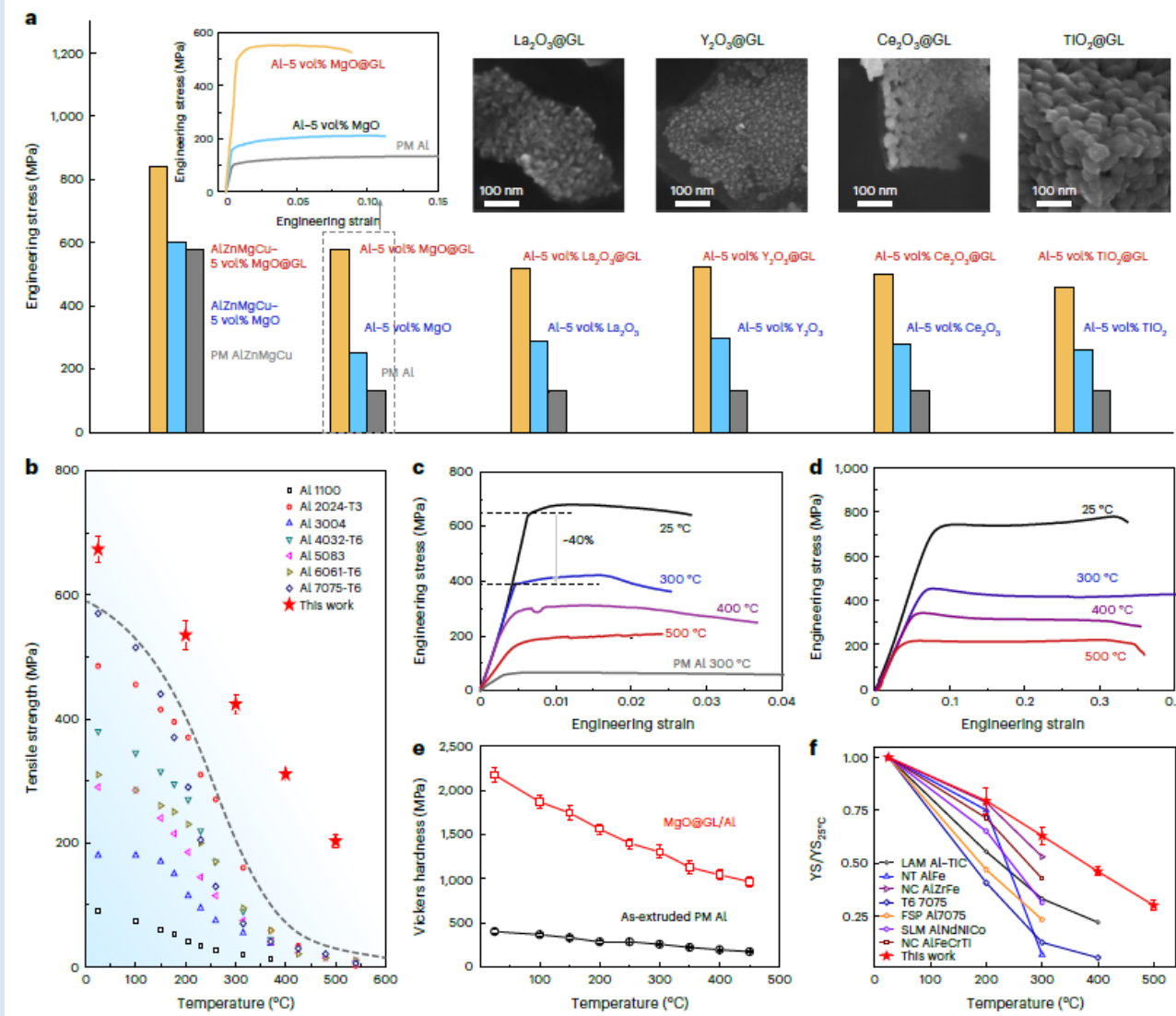
- 9Cr-1Mo-V çeliği nükleer reaktör basınçlı kapları (RPV) yapımında kullanılmaktadır.
- VHTR, gaz soğutmalı bir reaktör olacak şekilde 60 yıllık bir tasarım ömrü için 950 °C'ye kadar helyum sıcaklıklarında ve 7 MPa veya daha yüksek basınçlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. [4]
- XR ve XRİI malzemeleri çelik alaşımının ticari isimleridir. Nikel, krom, demir, molybden içermektedir.
- Bu alaşım elementlerinin temel katkısı 850-900 °C' de olan çıkış gazlarında oksidasyona karşı direnç, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda mukavemeti koruma ve sünekliğe karşı dayanım olarak sıralanabilir.
- Inconel 617 ya da Alloy 617, Ni-Cr-Co-Mo (Nikel–Krom–Kobalt–Molibden) esaslı bir yüksek sıcaklık süper alaşımdır. Çok yüksek sıcaklıklarda (700–950 °C) mükemmel mekanik dayanım, oksidasyon direnci ve termal kararlılık sağlar.
- Bu özellikleri nedeniyle Kore'nin yüksek sıcaklık SMR tasarımlarında (özellikle VHTR ve HTGR projelerinde) ısıl değiştirici boruları, basınç sınır bileşenleri, buhar reformerleri ve hidrojen üretim sistemleri gibi kritik bileşenlerde kullanılmaktadır.

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

Inconel 617 süper alaşımının başlıca kullanıldığı sistemler:

- Intermediate Heat Exchanger (IHX): Reaktör çekirdeğinden alınan ısıyı ikinci devreye aktarır.
- Steam Reformer Tubes: Hidrojen üretim sistemlerinde kullanılır.
- Hot Duct / Hot Gas Piping: Reaktörden çıkan yüksek sıcaklıkta helyum akışını taşır.
- PM (Powder Metallurgy) 2000 (Ticari isim), F/M oksit dispersiyonla güçlendirilmiş (ODS) çeliklerin ticari adlandırmasıdır.
- ODS çelikleri, olağanüstü radyasyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı nedeniyle hızlı reaktörlerde yakıt kaplama malzemesi ve füzyon reaktörlerinde örtü (blanket) yapısal bileşeni olarak kilit aday malzemeler haline gelmiştir. [6]
- **Oksit dispersiyonla güçlendirilmiş (ODS) varyantlar**, içinde küçük oksit parçacıkları dağılmış bir metal matristen oluşan alaşımlardır.

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi



a, Farklı oksit NP'ler ve karşılık gelen oxide@GL NP'leri içeren ODS Al malzemelerinin oda sıcaklığındaki çekme dayanımları karşılaştırılmıştır.

b, MgO@GL/Al vs Al alaşımları

c,d, Farklı sıcaklıklarda MgO@GL/Al ve PM Al malzemelerinin çekme (c) ve basma (d) mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

e, MgO@GL/Al vs PM Al

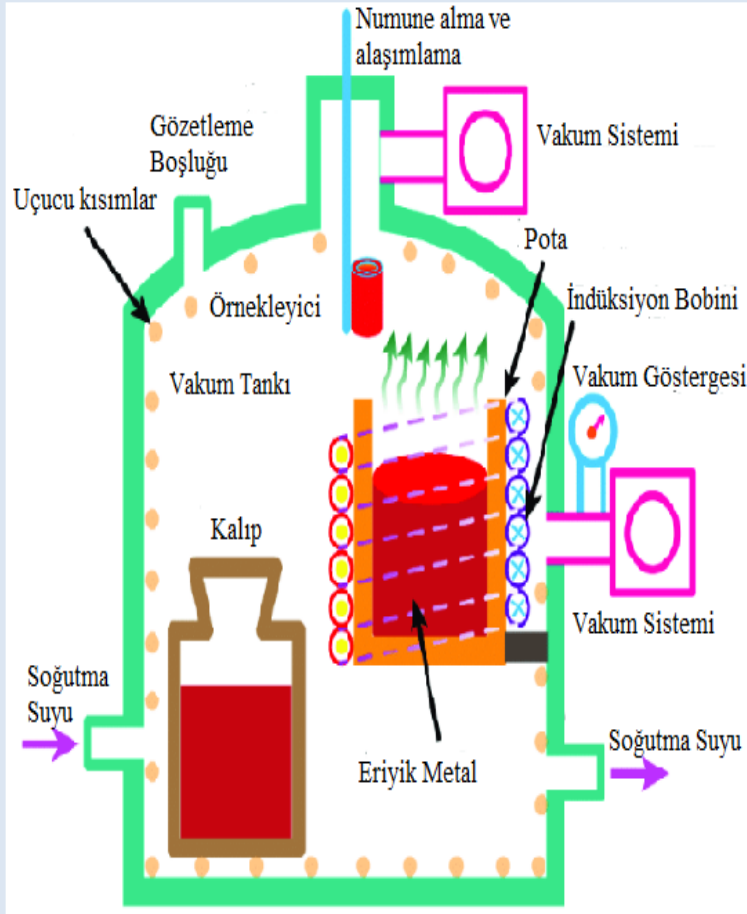
f, Yüksek sıcaklıklarda MgO@GL/Al malzemesinin YS/YS(25°C) değerleri, diğer yüksek sıcaklık Al alaşımlarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 5| ODS alaşımlarının mekanik özellikleri [8]

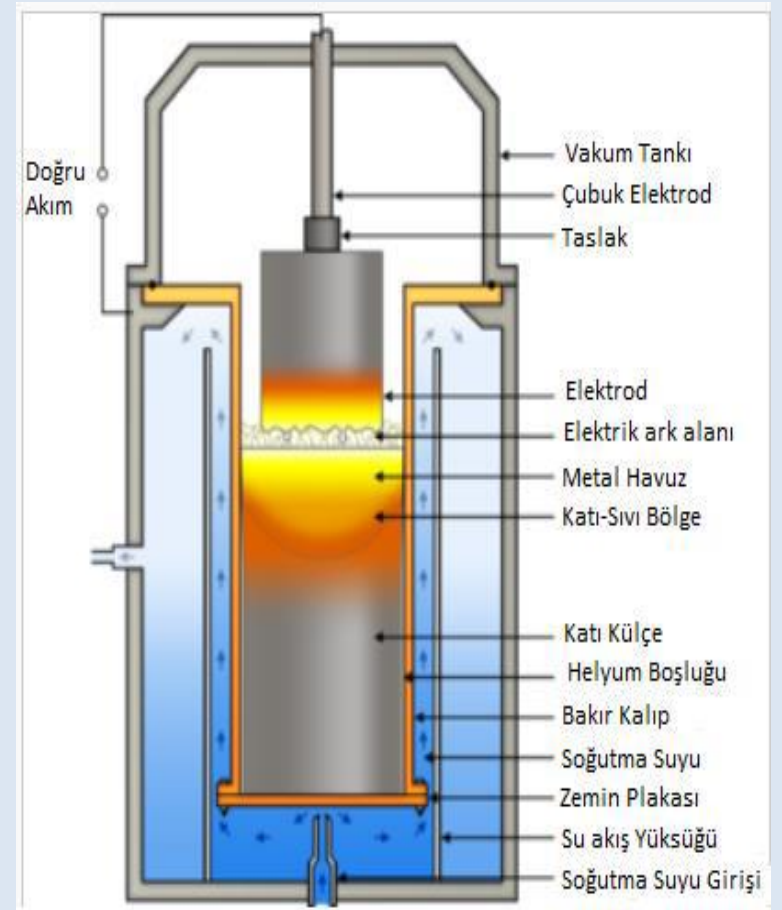
KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

Nikel Esaslı Alaşımların Üretim Aşamaları: VIM ve VAR Prosesi

- Yüksek Saflıkta malzeme elde edilmesi
- Nikel esaslı alaşımlar
- Alaşım elementlerinin hassas bir tolerans da olması



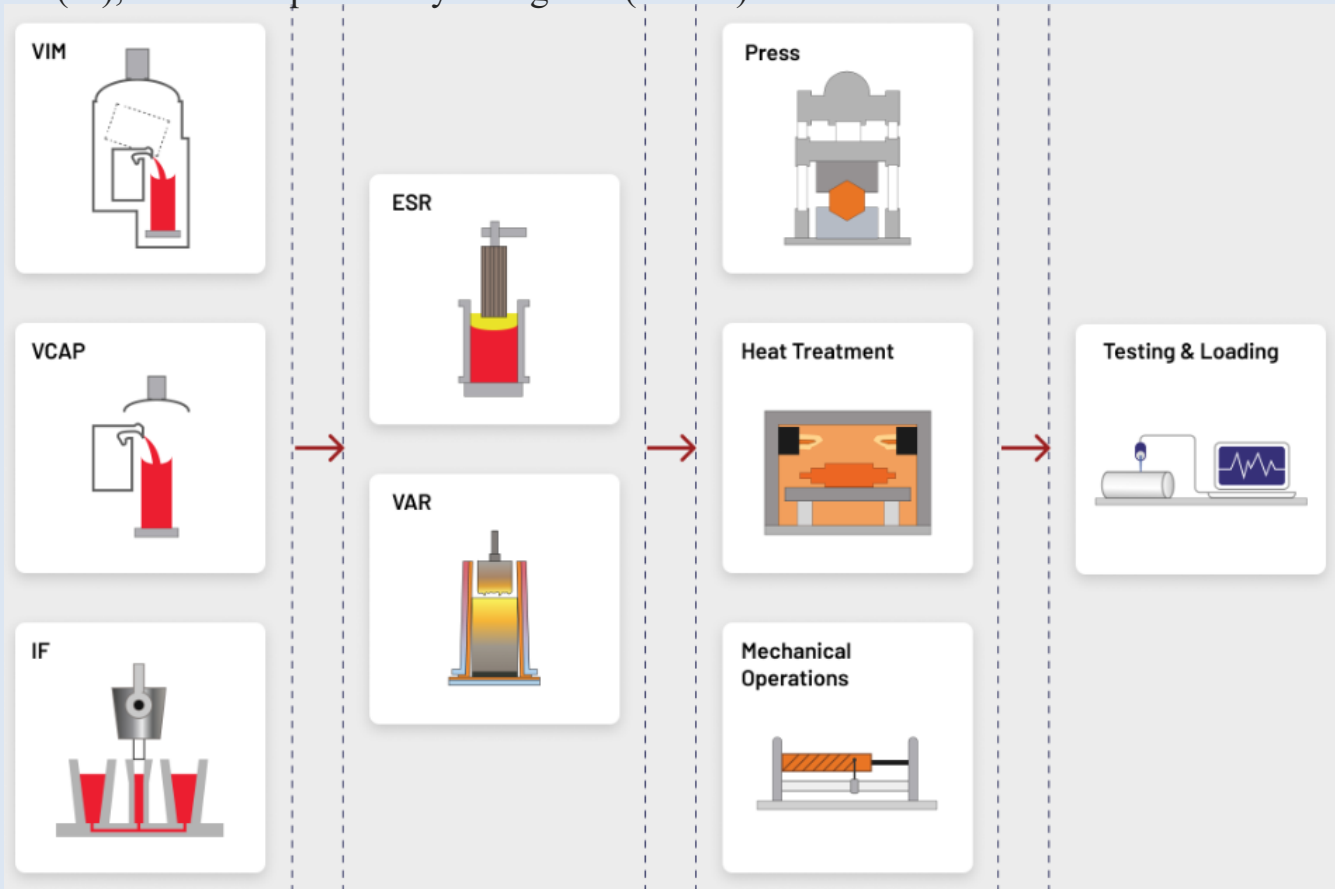
Şekil 6: Vakumda İndüksiyon Ergitme (VIM) prosesi [9]



Şekil 7: Vakumda ark ile yeniden ergitme (VAR) Prosesi [9]

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

Vakum İndüksiyon Ergitme (VIM), Vakum Ark Yeniden Ergitme (VAR), Elektrocüruf Yeniden Ergitme (ESR), Açık İndüksiyon Ergitme (IF), Vakum Kap İndüksiyon Ergitme (VCAP)



Şekil 8: TEI Alaşım Üretim Kabiliyetleri [9]

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

Superalaşım	Grup	W.Nr.	UNS	Marka Adı	Spesifikasyon	Açıklama
Alloy 617 / Inconel 617 / Inconel Alloy 617	Nickel Base	2.4663	N06617	Nicrofer 5520Co	NiCr23Co12Mo	Excellent mechanical properties up to 1100° C. Excellent resistance to oxidation up to 1100° C.

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	Al	Co	B	Fe
2.4663 / Inconel Alloy 617	0,05-0,10	≤0,20	≤0,20	≤0,01	≤0,01	20,0-23,0	Kalan	8,50-10,0	0,20-0,60	≤0,50	0,70-1,40	11,0-14,0	≤0,006	≤2,00

SAC			
KALINLIK [mm]	GENİŞLİK [mm]	UZUNLUK [mm]	
0,5 - 8	≤ 300	≤ 3000	soğuk hadde
9 - 30	üretim genişliği	üretim uzunluğu	sıcak hadde

ŞERİT			
KALINLIK [mm]	GENİŞLİK [mm]	KANGAL İ.D. [mm]	KANGAL AĞIRLIK [kg]
0,10 - 0,5	15 - 250	≤ 125, 175, 300	max. 250
0,50 - 1,2	20 - 250	≤ 300, 400,	max. 500
1,2 - 8,0	20 - 270	500	max. 800

ÇUBUK	
ÇAP [mm]	UZUNLUK [mm]
10 - 350	1000 - 5000

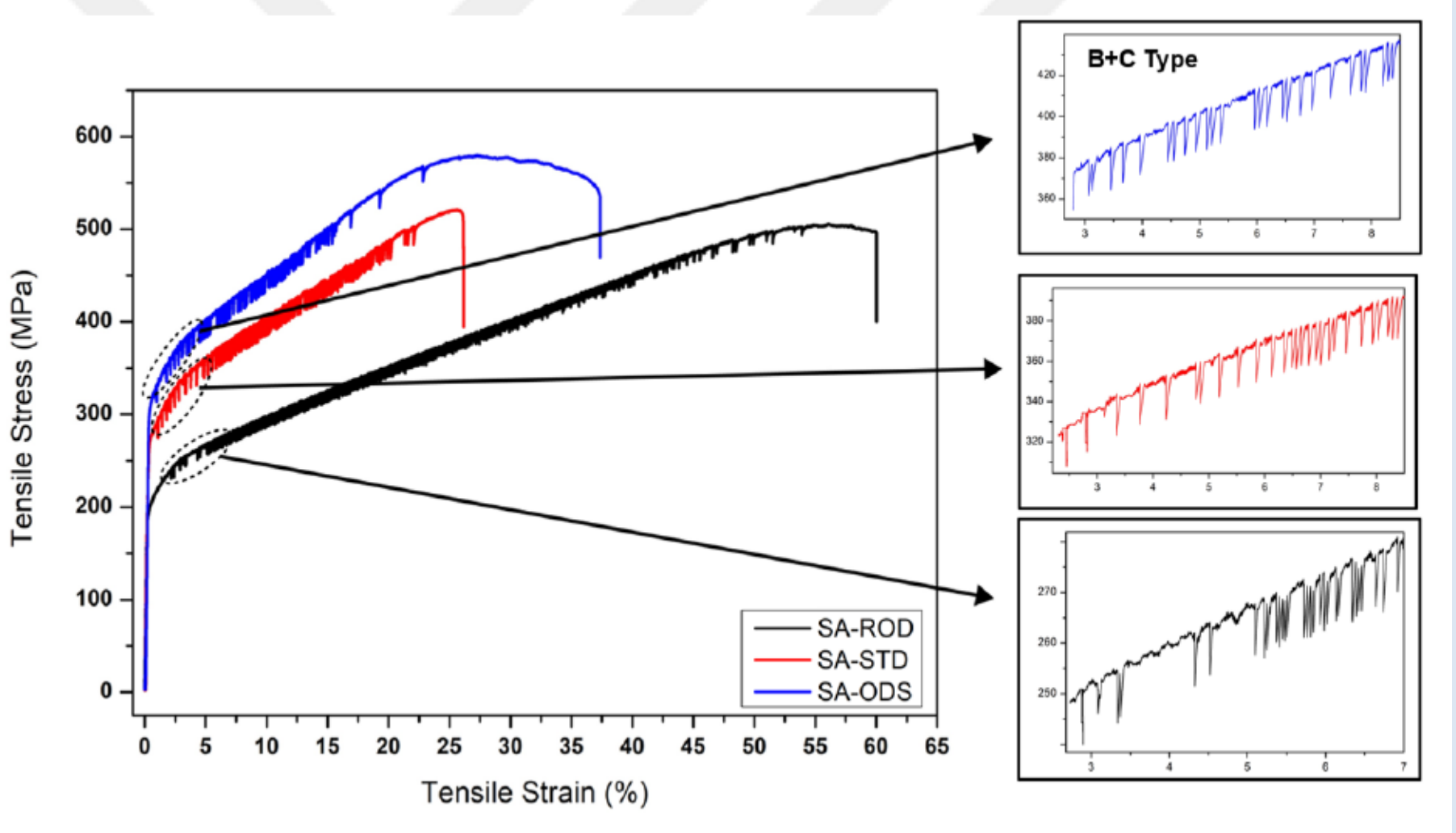
KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi

- Özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji talebinin, yaşam standartlarının yükselmesiyle birlikte önümüzdeki on yıllarda %50 oranında artması beklenmektedir. ,
- Özellikle IV. Nesil reaktörler tarafından üretilen nükleer enerji, bu talebin karşılanmasında kilit bir rol oynayacaktır.
- Bununla birlikte, mevcut yapısal malzemeler, yüksek sıcaklıklar, radyasyon ve korozyon ortamları gibi SMR'lerin ekstrem koşullarına dayanamaz.
- **Nikel esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımları ve radyasyon ile korozyon dirençleri sayesinde bu zorluklar için güçlü adaylardır.**

OKSİT DİSPERSİYONU İLE GÜÇLENDİRİLEN LAZER TOZ YATAK FÜZYONU İLE ÜRETİLMİŞ INCONEL 625 ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ (Demirci, Kadir Tuğrul, ODTÜ, Kasım 2024)

- Bu çalışmada, en önemli katmanlı imalat (AM) yöntemlerinden biri olan lazer toz yatağı füzyonu (L-PBF) kullanılarak, %0.3 ağırlık oranında Y₂O₃ ve %0.4 ağırlık oranında Hf içeren yeni bir ODS Inconel 625 (IN625) alaşımı geliştirilmiş ve üretilmiştir.
- Değişken lazer gücü ve tarama hızı değerlerini içeren üretim matrisi, ODS IN625 için %99.9'dan fazla yoğunluk elde edilmesini sağlamıştır.
- Mikroyapısal analiz, karbürler ve iri oksit oluşumlarını ortaya çıkarırken, nano oksitler TEM kullanılarak gözlemlenmiştir.
- Numunelere çözündürme ve yaşlandırma ile doğrudan yaşlandırma içeren iki farklı ısıl işlem uygulanmıştır.
- Isıl işlem uygulanmış malzemeler arasında, doğrudan yaşlandırma uygulanmış ODS numuneleri hem oda sıcaklığında hem de 700 °C'de en uygun mekanik özelliklere sahip olmuştur.
- Karşılaştırma amacıyla, aynı mekanik testler L-PBF ile üretilmiş standart bir IN625 ve geleneksel yöntemle üretilmiş bir IN625 çubuğa da uygulanmıştır.

KMR tasarımında Yeni Nesil Malzeme Teknolojileri ve Malzeme Seçimi



Şekil 10: 700 °C’de SA (Çözeltiye alma+yaşlandırma) koşulundaki konvansiyonel yöntemle üretilmiş çubuk, STD ve ODS IN625 için gerilme-gerinim diyagramı.”(Oksit dispersiyonu ile güçlendirilen lazer toz yatak füzyonu ile üretilmiş inconel 625 alaşımlarının mekanik özellikleri Demirci, Kadir Tuğrul, ODTÜ, Kasım 2024)

Ülkemiz Kalkına Planındaki Yeri ve Türkiye Vizyonu

- Ekim 2025’de Milli İstihbarat Akademisi (MİA) tarafından yayınlanan “Nükleer enerjide stratejik fırsat: Küçük Modüler Reaktörler ve Türkiye” raporun ülkemizin KMR yol haritası hakkında bilgiler vermiş, teknolojik, ekonomik ve altyapı gereksinimlerini belirtmiştir.
- Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığının 12. Kalkınma Planında (2024-2028)
- İklim Değişikliği Bakanlığının 2053 uzun dönemli iklim stratejisi raporunda;
 - 0 emisyon hedefi
 - 2053 yılında ülkemizin 5 GWe kurulu KMR kapasitesine ulaşacağı ön görülmüş, Toplam enerjinin %29.3
- Türkiye ulusal enerji planında hazırlanan senaryoya göre 2020-2035 yılları arasında ülkemizin elektrik kurulu gücü toplamda 189,7 GW’a, güneş enerjisinde 52,9 GW’a, rüzgar enerjisinde 29,6 GW’a, nükleer enerjide 7,2 GW’a çıkmakta olduğu öngörülmüştür.

SONUÇ VE TARTIŞMA



Dinlediğiniz İçin Teşekkür Ederim.

Kıymetli görüşleriniz, sorularınız, katkılarınız için şimdiden çok teşekkür ederim.

Sağ olun, Var olun..