

Deep Fission Derin Kuyu Reaktöründe

Toryum Ergimis Tuz Yakıtı (MSR-Th) Kullanımı Analizi

Bu yazımız ilgili kaynaklardan YZ destekli olarak hazırlanmış bir Ön Çalışma olup eleştiri ve önerilere açıktır
Yüksel Atakan, Dr.Radyasyon Fizikçisi Almanya ybatakan4@gmail.com 19.03.2026

Yakıt Miktarı · Sistem Değişiklikleri · Ek Ekipman · Maliyet Etkisi

Kaynak: ORNL/Gehin & Powers 2013, WNA 2024, Lazard 2023, Steigerwald vd. 2023, IEA 2024, Tandfonline 2021

Bu makale, Deep Fission'ın 15 MWe derin kuyu reaktöründe mevcut Düşük Zenginleştirilmiş Uranyum (DZU-PWR) yakıtı yerine Toryum Ergimis Tuz Reaktörü (MSR-Th) yakıtının kullanılması durumunu tekno-ekonomik açıdan inceler. Toryum yakıt miktarı, reaktör ve devre değişiklikleri, ek ekipman gereksinimleri ve LCOE üzerindeki etkisi kanıtlanmış bilimsel verilerle analiz edilmektedir.

1. Giriş — Neden Toryum?

Toryum (Th-232), doğada uranyumdan yaklaşık 3–4 kat daha bol bulunan, hafif radyoaktif bir aktinid elementidir. Nükleer reaktörde fisyon yakıtı olarak doğrudan kullanılamaz; nötron soğurarak önce Protaktinyum-233 (Pa-233), ardından Uranyum-233 (U-233) üretir. U-233 mükemmel bir fisyon yakıtıdır ve ısı nötron spektrumunda U-235'den daha iyi nötronik özellikler gösterir.

Toryum yakıt döngüsünün en verimli kullanıldığı reaktör tasarımı Ergimis Tuz Reaktörü'dür (Molten Salt Reactor — MSR). MSR'de toryum flüorür tuzu (ThF_4) lityum flüorür (LiF) ve berilyum flüorür (BeF_2) karışımıyla eritilerek sıvı yakıt oluşturulur; bu sıvı hem yakıt hem soğutucu işlevi görür. Çin'in 2023'te dünya tarihinde ilk kez ticari toryum üretimini başarıyla gerçekleştiren TMSR-LF1 reaktörü, bu teknolojinin pratikte çalışabildiğini kanıtlamıştır.

ÖNEMLİ UYARI: Deep Fission'ın mevcut Yerçekimi Reaktörü tasarımı standart PWR teknolojisine dayanmaktadır ve DZU yakıtı için NRC onay sürecindedir. Bu rapordaki toryum-MSR senaryosu, mevcut tasarımın tamamen farklı bir reaktör fizigi ve mühendislik altyapısı gerektiren hipotetik bir dönüşümünü analiz etmektedir. Bu dönüşüm gerçekleşirse tasarım sıfırdan başlayacak ve yeni bir NRC lisanslama süreci zorunlu olacaktır.

2. 15 MWe Reaktör için Toryum Miktarı

2.1 Hesaplama Yöntemi ve Referans Veriler

Doğrudan 15 MWe ölçeğinde MSR-Th tasarımı için güvenilir yayımlanmış veri bulunmamaktadır. Bu nedenle iki referans kullanılmıştır:

Referans 1 — ORNL 1.000 MWe MSBR: Gehin ve Powers (Oak Ridge National Laboratory, 2013) tarafından yayımlanan ve ABD Enerji Bakanlığı'nca desteklenen analize göre 1.000 MWe MSBR için toryum envanteri 68.100 kg, yıllık toryum besleme hızı ~6.000 kg/yıldır. Fisyon yakıt (U-233/U-235) envanteri ~1.501 kg'dır.

Referans 2 — AVR Jülich 15 MWe: Almanya'da 1967–1988 yılları arasında çalıştırılan 15 MWe kapasiteli AVR pebble-bed reaktörü, toryum-HEU yakıtı kullanmıştır. Toplam 1.360 kg toryum tüketilmiştir (WNA, 2024). Bu, 21 yıllık işletme için yaklaşık 65 kg/yıl toryum anlamına gelmektedir.

2.2 15 MWe için Toryum Miktarı Hesabı

ORNL verisinden doğrusal ölçekleme (yaklaşık, sıkı olmayan):

- Toryum envanteri: $68.100 \text{ kg} \times (15/1.000) \approx 1.022 \text{ kg Th-232}$ (başlangıç dolumu)
- Yıllık tüketim: $6.000 \text{ kg/yıl} \times (15/1.000) \approx 90 \text{ kg/yıl Th-232}$
- Başlatıcı fisyon yakıt (U-233 veya U-235): $\sim 1.501 \times (15/1.000) \approx 23 \text{ kg}$ (başlangıç için)
- Termal güç: $15 \text{ MWe} / 0,45 \text{ verim} \approx 33 \text{ MWt}$ (MSR yüksek verimli)

SONUÇ: 15 MWe Toryum MSR için yaklaşık 1.020 kg Th-232 başlangıç envanteri ve yıllık ~90 kg Th-232 takviyesi gerekmektedir. Bu, 15 MWe PWR-DZU'nun ~2.628 kg UO_2 ihtiyacıyla karşılaştırıldığında kütle bakımından çok daha az materyal demektir; ancak tuz kimyasının karmaşıklığı ve hacimsel gereksinimler farklıdır.

Tablo 1. 15 MWe Reaktör için Toryum Yakıt Miktarı — Referans Veriler ve Ölçekleme

Güç (MWe)	Th Envanteri (kg)	Yıllık Th Tük. (kg/yıl)	Başlatıcı U-235 (kg)	Kaynak
1.000 MWe (ref.)	68.100	~6.000	~1.500 (U-233)	Gehin & Powers, ORNL 2013
15 MWe (ölçeklendi)	~1.020 kg Th-232	~90 kg/yıl	~23 kg (başlangıç)	Bu çalışma — doğrusal ölçekleme (yaklaşık)
15 MWe (AVR referansı)	~1.360 kg Th	N/A (pebble bed)	HEU (tarihsel)	WNA, Jülich AVR 1967–1988 (15 MWe, Th-HEU)

3. Reaktör ve Devre Değişiklikleri

3.1 Temel Fiziksel Dönüşüm

Mevcut Deep Fission DZU-PWR tasarımı­ndan MSR-Th tasarımı­na geçiş, küçük bir modifi­kasyon değil; tasarımı­n temelinden yeniden kurulmasını gerektiren kökten bir dönüşümdür:

Katı yakıt → Sıvı tuz yakıt: Mevcut tasarımı­daki UO_2 pellet/metal kılıf sistemi tamamen ortadan kalkar. Yerine FLiBe ($LiF-BeF_2$) + ThF_4 karışımı­ndan oluşan sıvı tuz yakıtı kullanılır. Bu tuz hem yakıt hem soğutucu işlevi görür.

Su soğutma → Tuz soğutma: Mevcut PWR'ın su soğutma ve 160 atm hidrostatik basınç avantajı artık geçerliliğini yitirir. MSR atmosferik basınçta (~1 atm) çalışır; bu bir güvenlik avantajıdır, ancak kuyu içi basınç kaldıracağı artık işlev görmez.

Diskret yakıt değişimi → Sürekli besleme: PWR'da 18–24 ayda bir yapılan yakıt değişiminin yerini tuz içine sürekli ThF_4 eklenmesi alır. Bu operasyonel kolaylık sağlar.

Termik verim artışı: PWR ~32–33% verimle çalışırken, MSR 566–704°C çalışma sıcaklığında ~45–50% termal verim sağlar. Aynı elektrik için daha az fisyon enerjisi yeterlidir.

3.2 Soğutma Devresi Değişiklikleri

- 1. Devre: Su soğutucusu yerine FLiBe tuz soğutucusu — tamamen farklı kimyasal ortam, pompa ve boru malzemeleri
- 2. Devre: Yüksek sıcaklık nedeniyle süper-kritik CO_2 Brayton döngüsü veya gelişmiş buhar döngüsü kullanılabilir (elektrik verimi artar)
- 3. Devre: Çevre soğutma değişmez — nehir/yer altı suyu hâlâ gereklidir
- Basınç: Kuyunun 160 atm hidrostatik basıncı artık gerekli değildir; MSR atmosferik basınçta çalışır
- Önemli sonuç: Kuyunun temel mühendislik gerekçesi (hidrostatik basınç) ortadan kalkar — kuyu tasarımı yeniden değerlendirilmeli

Şekil A. Mevcut Deep Fission PWR-DZU ve Toryum MSR — Sistem Karşılaştırması

ŞEKİL A. PWR (Mevcut) ve Toryum Ergimis Tuz Reaktörü (MSR-Th) — Sistem Karşılaştırması

MEVCUT PWR (DZU — Uranyum)	TORYUM ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRÜ (MSR-Th)
Yakıt formu: Katı UO_2 pellet, metal kılıf	Yakıt formu: $ThF_4 + LiF + BeF_2$ tuz karışımı (sıvı)
Zenginleştirme: < %5 U-235 (DZU)	Bağlatıcı yakıt: U-233 veya U-235 (başlangıç için)
Yakıt miktarı: ~2.628 kg UO_2 (4 deste)	Toryum miktarı: ~1.020 kg Th-232 (15 MWe için)*
Değişim periyodu: ~18-24 ay	Yıllık Th tüketimi: ~90 kg/yıl (15 MWe @ %85 kap.fak.)
Termal verim: ~32-33%	Termal verim: ~45-50% (yüksek sıcaklık)
Çalışma sıcaklığı: ~315 °C	Çalışma sıcaklığı: ~566-704 °C (çekirdek)
Çalışma basıncı: ~160 atm (hidrostatik)	Çalışma basıncı: ~1 atm (atmosferik!)
Moderatör: Su (H_2O)	Moderatör: Grafit veya yok (hızlı spektrum)
Soğutucu: Su (basınçlı)	Soğutucu: Flüorür tuzu (FLiBe)
Atık yan ömrü: Pu-239: 24.100 yıl	Atık yan ömrü: ~500 yıl (Pu-239 yok)
Tuz sistemi: YOK	Tuz sistemi: Kapsamlı: pompa, ısı eş., kimya
Online yakıt: HAYIR — periyodik değişim	Online yakıt: EVET — sürekli besleme mümkün
NRC lisansı: Yeni — Part 53 kapsamında	NRC lisansı: Yok — tamamen yeni süreç gerekli
Teknoloji olgunluğu: Kanıtlanmış (ticari)	Teknoloji olgunluğu: Prototip (Çin TMSR-LF1, 2023)

* 15 MWe MSR-Th için toryum miktarı: 1000 MWe MSR verilerinden (ORNL, Gehin & Powers 2013) orantılanarak hesaplanmıştır — Bilek doğrusal değil, yaklaşık değerdir.

4. Ek Alet, Aygıt ve Ekipman Gereksinimleri

4.1 Tuz Sistemi Ekipmanı

MSR-Th tasarımının en önemli mühendislik zorluğu, yüksek sıcaklıkta (566–704°C) ve radyoaktif flüorür tuz ortamında çalışan özel ekipman gereksinimidir:

Tuz Pompaları (Mag-drive, sealless): Geleneksel mekanik salmastralar flüorür tuz ortamında bozunur. Manyetik tahrikli, salmastrasız özel pompalar gereklidir. Copenhagen Atomics bu konuda ticari geliştirme yapmaktadır.

Tuz Isı Eşanjörleri: Standart çelik veya paslanmaz çelik yerine Hastelloy-N veya molibden içeren özel alaşımlar kullanılır. Korumucu kaplama ve sürekli korozyon izleme zorunludur.

Tuz Genleşme Tankı: Termal genleşme ve gaz oluşumunu yönetmek için tampon tank sistemi gereklidir.

4.2 Kimyasal İşleme ve Arıtma Ünitesi

Online Fisyon Ürünü (FP) Ayırıcı: Ksenon ve Kripton gibi gaz fisyon ürünleri gaz sparger ile sürekli uzaklaştırılır. Noble metaller (Mo, Ru, Tc) tuzdan ayrılmalıdır. Bu işlem geleneksel PWR'ın yakıt değişim prosedürüyle kıyaslanamaz düzeyde karmaşıktır.

Protaktinyum (Pa-233) Ayırıcı: U-233 üretimine kritik: Th-232 nötron soğurarak Pa-233 üretir; Pa-233'ün ikinci nötron soğurmadan önce sistemi terk etmesi ve U-233'e dönüşmesi sağlanmalıdır. Bu, özel kimyasal ayırma ünitesi gerektirir.

Redoks Kontrol Sistemi: Flüorür tuzundaki UF_3/UF_4 oranı sürekli izlenmeli ve kontrol edilmelidir. Bu, standart PWR'da bulunmayan karmaşık bir kimya kontrol altyapısı demektir.

ICP-MS Analiz Laboratuvarı: Tuz kimyasının sürekli analizi için çevrimiçi indüktif eşleşmeli plazma-kütle spektrometri (ICP-MS) sistemi zorunludur.

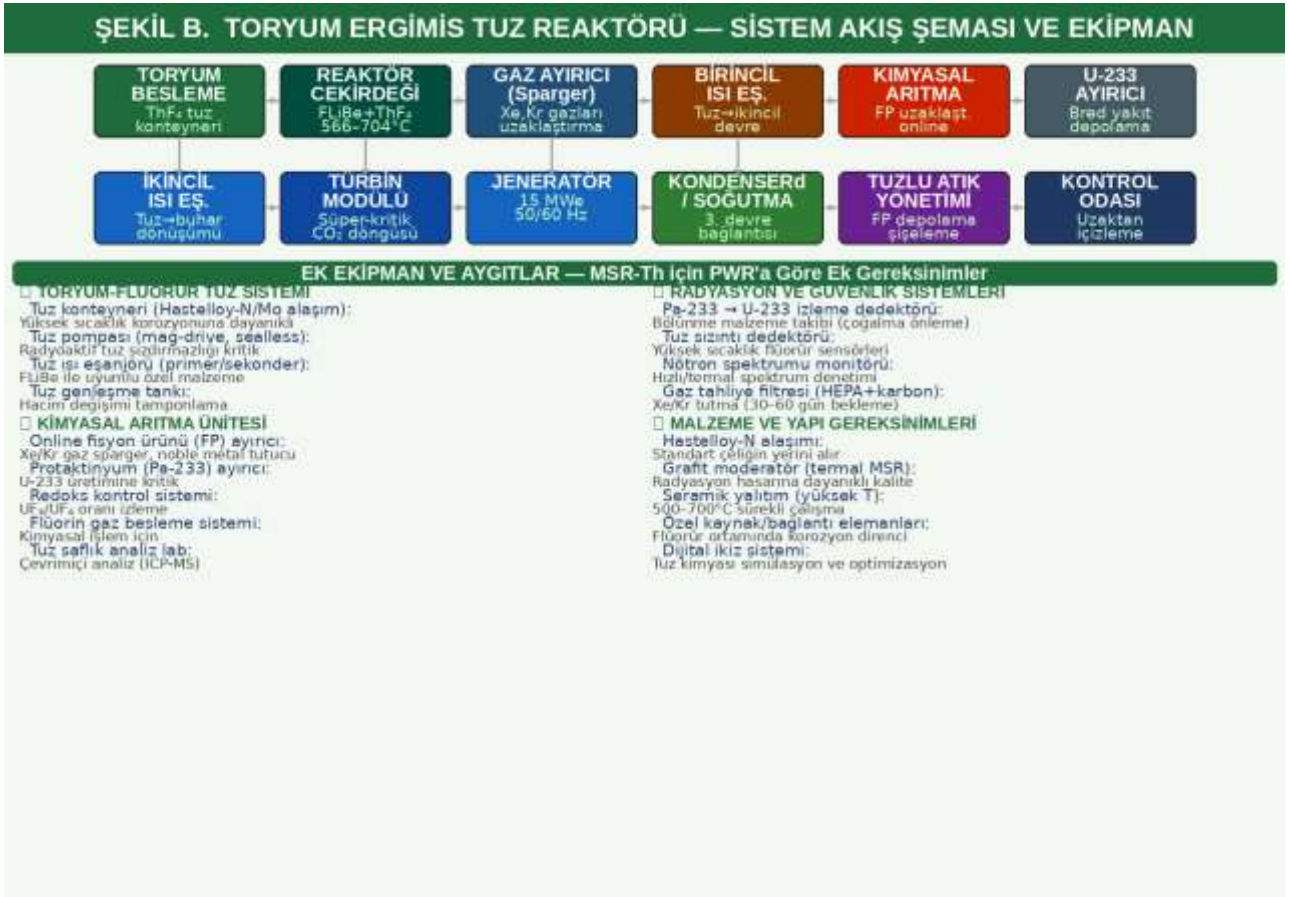
4.3 Malzeme Değişiklikleri

- Hastelloy-N Alaşımı: Nikel bazlı süper alaşım — tüm tuz temas yüzeylerinde standart çeliğin yerini alır. Maliyet yaklaşık 5–10× daha yüksektir.
- Grafit Moderatör (termal MSR için): Özel nükleer sınıf grafit — radyasyon hasarına dayanıklı, periyodik değişim gerektirir (~5–7 yıl)
- Seramik Yalıtım: 500–700°C sürekli çalışma sıcaklığına uygun özel seramik yalıtım
- Özel Bağlantı Elemanları: Flüorür ortamında korozyon direnci için özel cıvata, flanş, conta malzemeleri

4.4 Güvenlik ve İzleme Sistemleri

- Pa-233 → U-233 izleme dedektörü: Çoğalma önleme (non-proliferation) açısından zorunlu — NRC bu konuda özel gereklilikler belirlemiştir
- Tuz sızıntı dedektörü: Yüksek sıcaklık flüorür sensörleri — standart su sızıntı dedektörlerinden farklı teknoloji
- Nötron spektrumu monitörü: Termal/hızlı nötron dağılımı gerçek zamanlı izleme
- Dijital ikiz (digital twin) sistemi: Tuz kimyasının sürekli simülasyonu ve optimizasyonu için yapay zeka destekli yazılım altyapısı
- Dondurma fişi (freeze plug): Pasif güvenlik mekanizması — güç kesilirse soğutma kesilerek tuz donduğu zaman reaktör durur

Şekil B. Toryum MSR Sistem Akış Şeması ve Ek Ekipman Gereksinimleri



5. Lisanslama Süreci ve Çoğalma Önleme

5.1 NRC Lisanslama

Deep Fission'ın mevcut DZU-PWR tasarımı için NRC Part 53 kapsamında ön-başvuru süreci devam etmektedir. MSR-Th'ye geçiş bu süreci tamamen geçersiz kılar ve yeni bir lisanslama sürecini başlatır. Dünya genelinde hiçbir MSR-Th ticari olarak lisanslanmamıştır; NRC'nin MSR için özel rehber belgeler (NUREG-1555 rev.) hazırladığı bilinmekle birlikte süreç 10–15 yıl sürebilir.

5.2 Çoğalma Önleme (Non-Proliferation)

U-233'ün proliferasyon riski bulunmaktadır. Yeterince saf U-233 nükleer silah üretiminde kullanılabilir. Bu nedenle Pa-233 ayırma sistemi ve U-233 envanteri NRC/IAEA denetim kapsamındadır. "Safsız" U-233 (U-232 ile kontamine) silah yapımını güçleştirdiğinden tasarımlar bu yönde geliştirilmektedir.

6. Maliyet Analizi — LCOE Artar mı, Azalır mı?

6.1 Maliyet Düşürücü Faktörler

- Yüksek termal verim (~45–50% vs PWR ~32–33%): Aynı elektrik için ~%35 daha az termal güç yeterli → yakıt tüketimi azalır, soğutma altyapısı küçülür
- Toryum fiyatı: ~30–40 \$/kg (çok daha ucuz) — zenginleştirme maliyeti yok, REE madenciliğinin yan ürünü olarak temini mümkün
- Online yakıt besleme: Reaktör durdurmaya gerek kalmadan yakıt ilavesi → kapasite faktörü artabilir (%90+)
- Düşük atık hacimleri: Daha az uzun ömürlü radyoaktif atık → depolama maliyeti düşer
- Atmosferik basınç: PWR'ın 160 atm basınç sistemi gereksiz → basınçlandırıcı, yüksek basınç ekipmanı maliyeti ortadan kalkar
- Moir (2002, güncellenmiş): 1.000 MWe MSR'nin LCOE'si eş büyüklükte PWR ve kömür santralinden %7–9 daha ucuz (\$36,5/MWh vs \$39,3/MWh PWR)

6.2 Maliyet Artırıcı Faktörler

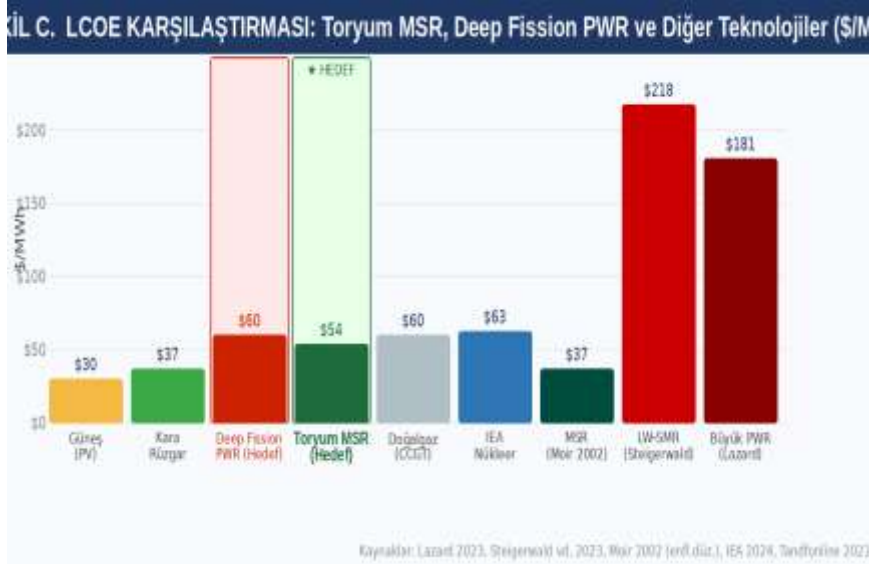
- FOAK teknoloji: MSR-Th hiçbir yerde ticari ölçekte işletilmemiştir — ilk proje maliyetleri tarihin en yüksek belirsizlikleri içinde
- Özel malzeme maliyeti: Hastelloy-N standart çelikten ~5–10× pahalı; tüm birincil devre bu malzemeden yapılmalıdır
- Kimyasal arıtma ünitesi: Pa-233 ayırıcı, FP giderme sistemi, ICP-MS analiz — ek sermaye maliyeti \$50M–\$200M+
- Uzun lisanslama süreci: 10–15 yıl NRC süreci → finansman faizi birikimi önemli LCOE artışı yaratır
- Kuyu avantajının kaybı: 160 atm hidrostatik basınç avantajı ortadan kalkar — Deep Fission'ın temel maliyet avantajı bu kuyuya dayanmaktadır; MSR ile kuyu gereksinimi değişir
- Yeni R&D maliyetleri: Tasarım, test, prototip — yüz milyonlarca dolar ek maliyet

6.3 Net LCOE Etkisi — Değerlendirme

Tablo 2. LCOE Karşılaştırması — Deep Fission PWR, Toryum MSR ve Referans Değerler (Kaynaklı)

Teknoloji	LCOE (\$/MWh)	Sermaye Maliyeti (\$/kWe)	Olgunluk	Kaynak
Deep Fission PWR-DZU (Hedef)	\$50–70	N/A (kuyu tabanlı)	Prototip aşaması	Deep Fission Inc., 2025
Toryum MSR (Hedef — NOAK)	\$44–54	\$2.000–4.000	Erken prototip	Moltex/Tandfonline 2021; Moir 2002 enfl.düz.
Toryum MSR (53,51 \$/MWh çalışma)	\$53,51	N/A	30 yıl ömür	Int. J. Sust. Energy (Undecidedmf, 2023)
Büyük PWR (mevcut, ABD)	\$141–221	\$6.000–9.000+	Ticari	Lazard LCOE v16, 2023
LW-SMR (medyan, Monte Carlo)	\$218	~\$10.000	Geliştirme	Steigerwald vd., Energy 281, 2023

Şekil C. LCOE Karşılaştırması: Toryum MSR Hedefi, Deep Fission PWR ve Diğer Teknolojiler



Elektrik santrali maliyetinden hesaplanan fiyatlar USD/MWh (kWh fiyatları için sayılar 1000 bölümlü)

Tablo 2 ve Şekil C'den görüleceği üzere, toryum MSR'nin uzun vadeli (NOAK — Nth of a Kind) LCOE hedefi teorik olarak \$44–54/MWh aralığındadır; bu Deep Fission'ın PWR hedefiyle (\$50–70/MWh) rekabetçi hatta potansiyel olarak daha düşüktür. Ancak FOAK (First of a Kind) gerçek maliyet bu değer 2–5 katı olabilir. Steigerwald vd. (2023) benzer analizlerde hiçbir SMR konseptinin gerçekçi koşullarda kârlı olmadığını göstermiştir.

7. Sonuç — Özet Değerlendirme

TORYUM MİKTARI: 15 MWe MSR-Th için başlangıç envanteri ~1.020 kg Th-232, yıllık tüketim ~90 kg/yıldır. Bu, mevcut DZU-PWR'ın 2.628 kg UO₂ ihtiyacından kütle bakımından az; ancak sistem karmaşıklığı çok daha yüksektir.

SİSTEM DEĞİŞİKLİKLERİ: Reaktör fizigi, yakıt formu, soğutma sistemi, basınç rejimi, yakıt besleme yöntemi — tüm temel parametreler değişir. Mevcut Deep Fission DZU-PWR tasarımı iptal edilmeli ve sıfırdan yeni bir tasarım geliştirilmelidir.

EK EKİPMAN: Hastelloy-N tuz sistemi, kimyasal arıtma ünitesi (Pa-233 ayırıcı, FP giderici, ICP-MS), mag-drive tuz pompaları, dijital ikiz sistemi, flüörür tuz dedektörleri — toplam ek sermaye maliyeti \$100M–\$300M+ (15 MWe ölçeği için tahmini).

LCOE DEĞERLENDİRMESİ: Teorik uzun vadede toryum MSR daha ucuz olabilir (\$44–54/MWh). Ancak gerçekçi FOAK koşullarında lisanslama, özel malzeme ve kimyasal işleme maliyetleri nedeniyle kısa-orta vadede (2030'lar öncesi) Deep Fission PWR hedefinden (~\$50–70/MWh) DAHA PAHALI olması kuvvetle muhtemeldir. Uzun vadede (2040+) ve ticari ölçekte maliyet tersine dönebilir.

STRATEJİK KARAR: Deep Fission açısından en rasyonel yol mevcut DZU-PWR yolunu sürdürmek ve pilot tasarımı kanıtlamaktır. Toryum-MSR seçeneği "gelecek nesil" teknoloji olarak paralel R&D programı kapsamında değerlendirilebilir; ancak mevcut NRC sürecini riske etmemelidir.

8. Kaynaklar

- [1] Gehin, J.C. & Powers, J.J. (2013). Liquid Fuel Molten Salt Reactors for Thorium Utilization. Oak Ridge National Laboratory. OSTI 1185589.
- [2] World Nuclear Association (2024). Thorium. <https://world-nuclear.org/thorium>
- [3] World Nuclear Association (2024). Molten Salt Reactors. <https://world-nuclear.org/molten-salt-reactors>
- [4] Moir, R.W. (2002, güncellenmiş). Electrochemical Reprocessing. LLNL; TMSR LCOE hesapları.
- [5] Dolan, T.J. vd. (2017). Molten Salt Reactors and Thorium Energy. Elsevier/ScienceDirect.
- [6] Lazard Ltd. (2023). Levelized Cost of Energy Analysis v16.0. New York.
- [7] Steigerwald, B. vd. (2023). Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies. Energy, 281, 128204.
- [8] IEA (2024). World Energy Outlook 2024. Paris: IEA.
- [9] Surbek, A. vd. (2021). Safe, clean, proliferation resistant and cost-effective Thorium-based MSRs. Tandfonline. 10.1080/14786451.2021.1928130.
- [10] IAEA (2005). TECDOC-1450: Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges. Vienna.

- [11] Undecidedmf.com / Int. J. Sust. Energy (2023). LCOE of Thorium MSR: \$53.51/MWh.
- [12] Assessing the benefit of thorium fuel in a once-through MSR. ScienceDirect, 2024.
- [13] Çin TMSR-LF1 (2023). First thorium-fuelled reactor reaches criticality. World Nuclear News, Oct 2023.
- [14] NRC (2024). Advanced Reactor Licensing — MSR Pre-Application Reviews.
- [15] Deep Fission, Inc. (2025). Technology Overview. deepfission.com/technology

— Toryum MSR Analizi Sonu —