

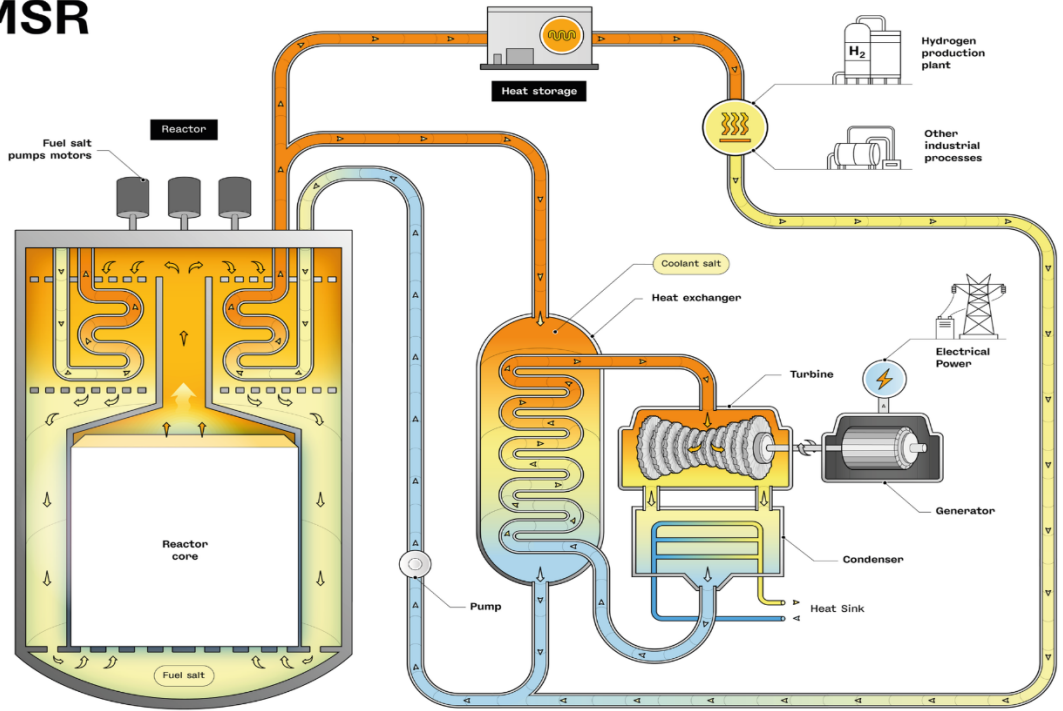
1.ÖZET

Toryum (Th-232), atom numarası 90 olan hafif radyoaktif bir aktinidler elementidir. IAEA verilerine göre Dünya’da uranyumdan 3–4 kat daha boldur; ergime noktası 1.750°C, yoğunluğu 11,7 g/cm³tür. Reaktörlerde doğrudan bölünmezler (fisil değildir); Th-232, nötron soğurarak (absorbe ederek) Pa-233 aracılığıyla bölünebilir U-233’e dönüşür ('verimli' yakıt). Dünya genelinde tanımlanmış toryum kaynakları 6,2–6,4 milyon ton (kestirimler: 14,6 milyon tona dek uzanmaktadır). Bu makalemiz; küresel rezerv dağılımını, fiyatları, tarihsel-güncel reaktör deneyimlerini, nükleer gemileri ve Rusya’nın kapsamlı nükleer filosunu IAEA, WNA, OECD-NEA ve USGS kaynaklarına dayanarak sunmaktadır.

Temel avantajları: Toryum bazlı reaktörler, uranyuma göre daha az uzun ömürlü aktinid (*)üretir; çoğaltma (proliferation) riski düşüktür ve bölünme ürünleri daha hızlı bozunur. IAEA, toryum reaktörlerinin güvenlik ve atık profilinin geleneksel uranyum reaktörlerine göre önemli avantajlar sunduğunu doğrulamaktadır. (*) **Aktinidler:** Kimyasal elementlerin periyodik cetvelinde atom numaraları 89 Aktinyum ile 103 Lawrenciyum elementlerini de içeren 15 atom çekirdekleridir (Bkz ek).

Toryum ergimiş tuz reaktörü

MSR



Molten Salt Reactor

2. DÜNYA TORYUM REZERVLERİ ve TÜRKİYE’nin YERİ

2.1 Küresel Büyüklük

IAEA/OECD-NEA 'Kırmızı Kitap' verisine göre tanımlanmış kaynaklar 6,2–6,4 milyon ton; spekülasyon dahil 14,6 milyon tona dek ulaşabilmektedir. Yıllık küresel üretim ~5.000–6.000 ton olup büyük çoğunluğu nadir toprak elementi (REE) madenciliğinin yan ürünüdür. Başlıca kaynak minerali monazittir.

2.2 Ülke Rezerv Tablosu (IAEA/NEA & WNA)

Sıra	Ülke	Kaynak (bin ton)	Başlıca Mineral	Stratejik Not
1	Hindistan	846	Monazit (kıyı kumları)	3 aşamalı nükleer program; dünya lideri
2	Brezilya	632	Monazit	CBMM devlet kurumu
3	Avustralya	595	Monazit, xenotime	İhracat potansiyeli yüksek
4	ABD	595	Monazit, thorite	Lemhi Pass (Idaho) rezervi
5	Mısır	380	Monazit	Ortak girişim arayışında
6	Türkiye	374	Monazit, thorite	MTA öncülüğünde; dünya 6.'sı; >\$1 milyar yatırım hedefi
7	Venezuela	300	Monazit	PDVSA nominal kontrolü
8	Kanada	172	Monazit	AECL Chalk River deneyimi
9	Rusya	155	Monazit, loparite	Aktif Ar-Ge; NIKIET MSR tasarımı
10	Güney Afrika	148	Monazit	REE yan ürünü
11	Çin	100	Monazit, bastnasite	Aktif TMSR geliştirme
12	BDT Ülkeleri*	~1.500	Çeşitli	Özbekistan, Kazakistan dahil
13	Norveç	87	Monazit	Thor Energy Th-MOX testleri

* BDT: Bağımsız Devletler Topluluğu. Kaynak: IAEA/NEA Kırmızı Kitap 2016;

WNA Toryum Bilgi Kütüphanesi; USGS MCS 2025

3.TÜRKİYE TORYUM

3.1 Türkiye Toryumunun Mineralojik Formu ve Yatakları

Türkiye'deki toryum, doğada serbest halde bulunmuyor. MTA ve önceki TAEK araştırmalarına göre ülkedeki toryum başlıca iki mineral formundadır:

Monazit [(Ce,La,Th,Y)PO₄]: Fosfat yapılı, serium-lantanid-toryum-itriyum karışımı mineral. Ortalama toryum içeriği %6–7 Türkiye'deki başlıca yataklarda bu mineralin içinde toryum kafes yapısına bağlı halde bulunmaktadır.

Torobastnazit [(Ce,Th)FCO₃]: Florlu karbonat yapılı nadir toprak-toryum minerali. **Eskişehir-Sivrihisar yöresinde monazitlerle birlikte bulunmaktadır.**

Türkiye'nin ana yatağı olan Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören bölgesindeki cevherin ortalama **toryum tenörü (yüzdesi) %0,21 ThO₂ olup bazı örneklerde %3'e dek yükselmektedir.** Bu kompleks cevher aynı zamanda barit, nadir toprak elementleri (NTE) ve florit de içermektedir; **bu nedenle sadece toryuma yönelik değerlendirme ekonomik açıdan henüz yeterince olgunlaşmamıştır (TAEK/MTA araştırmaları).**

3.2 Türkiye Toryum Yatakları

Bölge / Saha	İl	Rezerv (yaklaşık)	Tenör	Mineral Formu	Durum
Kızılcaören – Karkın – Okçu köyleri	Eskişehir / Sivrihisar	374.000 ton ThO ₂ (görünür)	ortalama %0,21 ThO ₂ (maks. %3)	Monazit + torobastnazit + barit	Ana yatak; ETİ MADEN kontrolü
Beylikova – Sivrihisar	Eskişehir	694 milyon ton kayaç içinde 788 ppm ThO ₂	~0,079% ThO ₂	Dissemine toryum (ETİ MADEN tespiti)	Düşük tenörlü büyük potansiyel; ekonomiklik sorgulanıyor
Kuluncak	Malatya	3,8 milyon ton 2,032 ppm (MTA 2020 keşfi)	2,032 ppm	Bilinmiyor (Ar-Ge aşaması)	Yeni keşif; ekonomiklik ve teknoloji çalışması yapılmamış
Hekimhan	Malatya	Belirsiz	—	Muhtemel monazit	Arama çalışması öneriliyor
Felâhiye	Kayseri	Belirsiz	—	Muhtemel monazit	Arama çalışması öneriliyor
Çanaklı	Burdur	Belirsiz	—	Muhtemel monazit	Arama çalışması öneriliyor
Çeşitli	Sivas, Diyarbakır	Belirsiz	—	Muhtemel monazit	Araştırma aşaması
Kıyı plaserler	Isparta ve kıyı şeritleri	>20.000 ton (Isparta)	—	Monazit plaser	100 yıllık enerji potansiyeli tahmin ediliyor

Kaynak: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Toryum Sayfası (enerji.gov.tr); MTA Uranyum-Toryum Maden Serisi; TAEK araştırmaları

Not: Türkiye'nin Toryum bakımından Dünya'da başlarda olması iyidir. Daha iyisi ise toryumu işletecek ve reaktörlerde kullanılabilecek duruma getiren tesislerin kurulmasıdır. Bunlar hangi aşamalarda olabilir:

3.3 Toryumdan Reaktör Yakıtı Üretimi: Süreç ve Teknoloji

Türkiye'deki toryumun nükleer reaktörlerde kullanılabilmesi için aşağıdaki işlem zincirinin kurulması gerekmektedir. Bunlarla ilgili ne gibi çalışmalar vardır? Planlanıyor mu bilinmiyor?

Aşama	İşlem	Yöntem	Çıktı
1 – Madencilik	Ham cevher çıkarımı	Açık ocak / yeraltı madenciliği	Ham monazit cevheri
2 – Cevher Hazırlama	Kırma, öğütme, eleme	Mekanik işlemler	Zenginleştirilmiş cevher
3 – Mineral Konsantrasyonu	Monazit ayırıştırma	Ağırlık (gravite) ve manyetik separasyon, flotasyon	Monazit konsantresi (%6–7 ThO ₂)
4 – Kimyasal Ayırma	Toryum-NTE ayırıştırması	Alkali füzyon (NaOH, 140°C) veya H ₂ SO ₄ ile asit liçi	Th(OH) ₄ çökeltisi + NTE çözeltisi
5 – Safıklandırma	Toryum safıklandırma	Solvent ekstraksiyonu (TBP, D2EHPA veya Aliquat-336)	Th nitrat çözeltisi (safılık %96–99)
6 – ThO ₂ Üretimi	Oksit dönüşümü	Kalsinasyon / çöktürme	Yüksek saflıklı ThO ₂ tozu (≥%99)
7 – Yakıt Fabrikasyonu	Reaktör yakıtı üretimi	ThO ₂ -UO ₂ pelet preslemesi (PWR için) veya Th-tuz hazırlama (MSR için)	Reaktöre hazır toryum yakıtı

Kaynak: Udayakumar et al. Nuclear Eng. & Technology 53(7) 2021; Salehuddin et al. Nuclear Eng. & Technology 2018; UT Knoxville Thorium Process Design 2020

3.4 Toryum İşleme Tesisi: Yer Seçimi, Boyut ve Maliyet Analizi

Uluslararası tekno-ekonomik analizler ve karşılaştırmalı tesis verileri esas alınarak Türkiye için olası bir toryum işleme tesisinin aşağıdaki parametreler çerçevesinde planlanabileceği değerlendirilmektedir:

Yapılınca büyük ölçekte (Tam kapasite) olacağı umulur. Eleman da yetişir.

Parametre	Küçük Ölçek (Pilot)	Orta Ölçek (Ticari)	Büyük Ölçek (Tam Kapasite)
Yıllık ThO ₂ kapasitesi	1–5 ton/yıl	50–200 ton/yıl	500–1.000 ton/yıl
Tahmini sermaye yatırımı (CAPEX)	13–20 milyon USD	80–150 milyon USD	300–500 milyon USD
Üretim maliyeti (ThO ₂ /kg)	335–700 USD/kg	80–150 USD/kg	50–80 USD/kg
Asgari alan	5–10 dönüm	30–50 dönüm	100–200 dönüm
İşgücü (uzman)	20–40 kişi	150–300 kişi	500–1.000 kişi
Geri ödeme süresi	4–6 yıl (optimum)	5–8 yıl	8–12 yıl
Yatırım getirisi (ROI)	~%22 (1 ton/batch)	~%15	~%5–8

Kaynak: Udayakumar et al. 2021 (alkalin füzyon TEA); Salehuddin et al. 2018 (ScienceDirect); Nijerya REE tesisi karşılaştırması (DiscoveryAlert 2025)

En uygun yer seçimi için Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören bölgesi öne çıkmaktadır; hem ana cevher yatağına yakınlık hem de ETİ MADEN'in mevcut altyapısı bu bölgeyi avantajlı kılmaktadır. NTE (nadir toprak elementi) ortak üretimi nedeniyle tesisin kompleks cevher işleme kapasitesine sahip olması, ekonomikliğini artıracak kritik unsurdur.

3.5 ThorAtom Nükleer Teknolojiler A.Ş.

ThorAtom, Türkiye'nin önde gelen mühendislik firması FİGES A.Ş. bünyesinde kurulan ve ülkenin ilk özel toryum reaktörü geliştirme girişimidir. 2023 başında bağımsız şirket statüsüne kavuşturularak tüm nükleer çalışmalar bu çatı altında yürütülmeye başlanmıştır. ThoAtom ile ilgili ayrıntılı bilgiler için bkz: <https://figes.com.tr/grup-sirketleri/thoratom>

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toryum, küresel enerji güvenliğinde stratejik bir kaynak olma potansiyelini korumaktadır. Dünya'da tanımlanmış rezervler 6,2–14,6 milyon ton arasındadır; Hindistan dünya lideri, Türkiye ise altıncı konumdadır (bazı güncel verilere göre ikinci).

Çin, 2021'de işletmeye aldığı TMSR-LF1 ve 2029 hedefli 60 MWt güç istasyonuyla en somut ilerlemeyi kaydetmiştir. Hindistan'ın PFBR'ı Nisan 2026'da kritikliğe ulaşmıştır. Rusya, dünyanın en büyük nükleer denizcilik filosunu işletirken NIKIET aracılığıyla MSR Ar-Ge'sini sürdürmektedir.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören başta olmak üzere birden fazla bölgedeki rezervlerin monazit ve torobastnazit formunda bulunduğu, NTE-toryum kompleks cevherinin işlenmesi için entegre bir tesis kurulmasının hem teknik hem ekonomik açıdan mümkün olduğu görülmektedir.

50–200 ton/yıl kapasiteli orta ölçekli bir ThO₂ üretim tesisinin 80–150 milyon USD sermaye yatırımıyla Sivrihisar bölgesine kurulması, hem ulusal enerji bağımsızlığına hem de ihracat potansiyeline katkı sağlayacak stratejik bir adım olacaktır.

Türkiye İçin Temel Politika Önerileri:

- Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören'de ETİ MADEN koordinasyonu ile pilot ThO₂ üretim tesisi kurulması (13–20 milyon USD, 1–5 ton/yıl)
- Malatya-Kuluncak yeni keşfinin ekonomiklik ve teknoloji fizibilite çalışmasının ivedilikle tamamlanması (MTA/TENMAK)
- ThorAtom'un TÜBİTAK ve TENMAK iş birlikleriyle yerli MSR prototip geliştirme sürecinin kamu desteğiyle hızlandırılması
- IAEA INPRO ve Gen IV GIF mekanizmalarına Türkiye'nin aktif katılımının sağlanması
- Toryum-NTE kompleks cevherinin entegre değerlendirilmesi: nadir toprak elementi gelirinin tesis ekonomikliğini iyileştirmesi için ortak işleme modeli
- Toryum-MSR teknolojisinin Türkiye'nin denizcilik ve savunma sanayiindeki dekarbonizasyon hedefleriyle ilişkilendirilmesi

(*) Ek: Aktinitler (aktinid dizisi), atom numarası 89–103 arasında olan 15 elementten oluşur:

1. **Aktinyum (Ac)** – 89
2. **Toryum (Th)** – 90
3. **Protaktinyum (Pa)** – 91
4. **Uranyum (U)** – 92
5. **Neptünyum (Np)** – 93
6. **Plütinyum (Pu)** – 94
7. **Amerikyum (Am)** – 95
8. **Küriyum (Cm)** – 96
9. **Berkelyum (Bk)** – 97
10. **Kaliforniyum (Cf)** – 98
11. **Einsteinyum (Es)** – 99
12. **Fermiyum (Fm)** – 100
13. **Mendelevyum (Md)** – 101
14. **Nobelyum (No)** – 102
15. **Lawrensiyum (Lr)** – 103

Bu elementlerin çoğu radyoaktiftir; doğada en yaygın bulunan aktinitler arasında Toryum ve Uranyum yer alır.

KAYNAKLAR (Seçilmiş 10 Temel Kaynak)/YZ/

1. IAEA / OECD-NEA (2016). Uranium 2016: Resources, Production and Demand ['Kırmızı Kitap']. Paris: OECD-NEA / Vienna: IAEA.
2. OECD-NEA (2015). Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle. NEA No. 7224. Paris: OECD. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7224-thorium.pdf>
3. USGS (2025). Mineral Commodity Summaries 2025: Thorium. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-thorium.pdf>
4. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2024). Toryum. <https://enerji.gov.tr/tabii-kaynaklar-toryum>
5. MTA – Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Dünyada ve Türkiye'de Uranyum ve Toryum. MTA Maden Serisi. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Uranyum-Toryum.pdf>
6. Udayakumar S. et al. (2021). Economic evaluation of thorium oxide production from monazite using alkaline fusion method. Nuclear Engineering and Technology, 53(7), 2418–2425. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.022>
7. Salehuddin M. et al. (2018). Economic analysis of thorium extraction from monazite. Nuclear Engineering and Technology, 51(1). <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.10.025>
8. <https://figes.com.tr/grup-sirketleri/thoratom>
9. World Nuclear Association (2024). Thorium. WNA Information Library. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium>
10. gCaptain (Şubat 2026). Russia Deploys All Eight Nuclear Icebreakers for First Time. <https://gcaptain.com/russia-deploys-all-eight-nuclear-icebreakers-for-first-time/>