

Nükleer Reaktörlerin Kalbi Uranyum: Dünya'da Ne Durumda?

Hazırlayan: Yüksel Atakan, Dr.Radyasyon Fizikçisi ybatakan4@gmail.com , 31.05.2026

Not: Bu yazıdaki veriler ve açıklamalar ilgili saygın kaynaklardan YZ yardımıyla ve tartışarak hazırlanmıştır. Yazıda Türkiye ile ilgili analizler de vardır. Herhangibir düzeltme isteği, kaynak ve gerekçe gösterildiğinde, yapılacaktır.

Bu yazımız, bu şekilde konuya yabancı olanları da bilgilendirmek için ayrıntılı bilgiler içermekte olup, sonradan kısa şekli de yayınlanacaktır.

ÖZET

Uranyum, dünya genelindeki tüm nükleer reaktörlerin kalbi ya da vazgeçilmez ham maddesidir. IAEA/OECD-NEA Red Book 2024'e göre küresel tanımlanmış çıkarılabilir kaynaklar 7,93 milyon ton uranyum (tU) olup mevcut tüketim hızıyla 100 yılın üzerinde yeterliliktedir. 2024 yılında dünya üretimi 60.213 tU'ya ulaşarak reaktör talebinin (~68.000 tU) yaklaşık % 90'ını karşılamıştır.

Kazakistan (% 39), Kanada (% 24) ve Namibya (% 12) üretimin % 75'ini sağlamaktadır. Spot fiyat 2016'daki ~18 \$/lb tarihî taban fiyatından, 2024 başında 106 \$/lb zirvesine çıkmış, yıl sonunda 73,50 \$/lb'da kapanmıştır. Uranyum, nükleer santral elektrik üretim maliyetinin yalnızca % 5–10'unu oluşturması nedeniyle fiyat dalgalanmalarına direnç göstermektedir.

KAVRAMLAR

7,93 milyon ton = doğal uranyum metali (tU) cinsinden ifade edilmiş, ekonomik olarak çıkarılabilir uranyum içeriğidir.

Yani ne toprak/cevher kütlesi, ne de U_3O_8 'dir — **saf uranyum elementi** olarak standardize edilmiş bir rakamdır.

Üç kavramı karıştırmamak gerekir:

- 1. Cevher kütlesi (ore tonnage):** Maden sahasındaki tüm kaya/toprak karışımının ağırlığı. Kazakistan'ın % 0,04 tenörlü yataklarından bu kadar uranyum çıkarmak için yaklaşık **20 milyar ton** cevher işlemek gerekir — 7,93 milyon tonun binlerce katı.
- 2. tU (ton uranyum metali):** IAEA'nın kullandığı standart birim. Uranyumun element olarak kütlesi. 7,93 milyon ton bu cinstendir.
- 3. U_3O_8 (sarı kek):** Madenden çıkan ilk işlenmiş ürün. 1 tU = yaklaşık 1,179 ton U_3O_8 olduğundan 7,93 milyon tU $\approx$ **9,35 milyon ton U_3O_8** 'e karşılık gelir.

O zaman "ekonomik olarak çıkarılabilir" ne demek?

IAEA bu 7,93 milyon tonu belirli maliyet eşiklerinde (\$40–\$260/kgU arası kademeler) çıkarılabilir olarak hesaplamaktadır. Teknik olarak yerde daha fazla uranyum var; ancak düşük tenörlü, erişilmesi güç ya da mevcut fiyatlarda kârsız yataklar bu rakama dahil edilmiyor.

Özetle: 7,93 milyon ton, dağın içindeki cevherin tamamı değil — cevherin içindeki saf uranyum elementinin, ekonomik çıkarılabilirlik filtresiyle süzölmüş toplamıdır (Örnekleriyle ayrıntılar Ek'te).

Uranyum yatakları



1. Küresel Uranyum Rezervleri, Cevher Miktarları ve Tenörler

IAEA/OECD-NEA'nın 30. baskısı olan Red Book 2024 ("Uranium 2024: Resources, Production and Demand"), 1 Ocak 2023 itibarıyla dünya genelinde tanımlanmış çıkarılabilir uranyum kaynaklarının 7.934.500 tU'ya ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu rakam, 40–260 \$/kgU fiyat aralığında ekonomik olarak işletilebilir tüm makul ölçüde güvenceli (RAR) ve tahminsel kaynakları kapsamaktadır. Yıllık ~68.000 tU tüketim düzeyinde bu kaynaklar 2050 yılının çok ötesine ulaşmaktadır.

1.1 Tenör (Cevher Yüzdesi) Kavramı

Tenör nedir? Cevherdeki uranyum içeriğini gösteren kütle yüzdesi değeridir; genellikle % U ya da % U_3O_8 cinsinden ifade edilir. Bir ton % 0,10 tenörlü cevherden 1 kg uranyum elde edilirken, % 15 tenörlü Kanada cevherinin 1 tonu 150 kg uranyum verir. Bu farklılık madencilik ekonomisini, çevre riskini ve enerji verimliliğini doğrudan belirler.

1.2 İlk 10 Rezerv Ülkesi — Cevher Miktarları ve Tenörler (IAEA Red Book 2024)

Aşağıdaki tablo, IAEA Red Book 2024 ve WNA Nuclear Fuel Report 2023 verilerini kapsamaktadır. Cevher miktarları, farklı yataklardaki tenör/hacim değişkenliği nedeniyle tahmin aralıkları olarak verilmiştir.

Sıra	Ülke	Kaynaklar (tU, \$130/kg)	Dünya Payı	Tahmini Cevher Miktarı (Mt)	Tipik Tenör (% U ya da U_3O_8)	Başlıca Yataklar / Madencilik Notu
1	Avustralya	1.684.100	% 28	~3.000–5.000 Mt	% 0,02–0,06 (Ort. % 0,059 U — OD)	Olympic Dam (Cu yan ürünü, % 0,059 U); Beverly, Four Mile (ISL, % 0,15–0,25); Ranger (açık ocak, % 0,20)
2	Kazakistan	813.900	% 14	~1.800–2.500 Mt	% 0,01–0,08 (Ort. % 0,04 — ISL)	Chu-Sarıs ve Sırderya havzaları; Inkai (% 0,04), Budenovskoye (% 0,06); tamamı ISL yöntemi
3	Kanada	620.000	% 10	~5–12 Mt	% 6–20 (Dünya en yüksekleri)	McArthur River (% 17 ort.), Cigar Lake (% 15,87 ort.); yüksek tenör nedeniyle cevher miktarı az ama uranyum içeriği çok
4	Rusya	476.600	% 8	~400–600 Mt	% 0,05–0,15 (karma yataklar)	Transbaykal (kumtaşı), Batı Sibirya; Streltsovsk (% 0,15), Khiagda ISL (% 0,05–0,08)
5	Namibya	470.100	% 8	~500–800 Mt	% 0,02–0,05 (düşük tenör)	Rössing (% 0,03), Husab (% 0,035), Langer Heinrich (% 0,047); hepsi açık ocak
6	Nijer	336.000	% 6	~150–250 Mt	% 0,24–0,35 (görece yüksek)	Arlit bölgesi: SOMAIR (% 0,30–0,35), COMINAK (% 0,25); açık ocak
7	Güney Afrika	320.900	% 5	~500–800 Mt	% 0,01–0,03 (altın yan ürünü)	Witwatersrand altın madenleri; uranyum altın işleme atığından geri kazanılır
8	Brezilya	276.800	% 5	~100–200 Mt	% 0,08–0,16 (Lagoa Real)	Lagoa Real / Caetité (% 0,10–0,16); Itataia (% 0,08, fosfat ile birlikte)
9	Çin	248.900	% 4	~200–400 Mt	% 0,03–0,10 (karma)	Xinjiang (ISL), Gansu, Jiangxi (granit); ortalama % 0,05
10	Moğolistan	141.500	% 2	~80–150 Mt	% 0,05–0,12 (Dornod)	Dornod (% 0,10–0,12, yer altı), Mardai; Rusya ortak girişi

Tablo 1 — İlk 10 ülkenin uranyum kaynakları, tahmini cevher miktarları ve tipik tenörleri. Kaynak: IAEA/OECD-NEA Red Book 2024; WNA 2024; INN 2025; USGS 2024.

1.3 Tenör Sınıflandırması

Dünya uranyum yatakları tenör bakımından son derece geniş bir yelpazede yer alır. Aşağıdaki tablo bu sınıflandırmayı örneklerle göstermektedir.

Tenör Kategorisi	% U ₃ O ₈ Aralığı	Örnekler	Madencilik Yöntemi
Çok yüksek tenör	% > 2	Athabasca en zengin zonları (Kanada)	Yer altı — özel dondurma
Yüksek tenör	% 0,5 – 2	McArthur River (% 17 ort.), Cigar Lake (% 15,87)	Yer altı — jet sondaj
Orta tenör	% 0,1 – 0,5	Nijer Arlit (% 0,30), Brezilya Lagoa Real (% 0,13)	Açık ocak / Yer altı
Düşük tenör	% 0,02 – 0,1	Namibya (% 0,03–0,05), Kazakistan ISL (% 0,04)	Açık ocak / ISL
Çok düşük tenör	% < 0,02	Güney Afrika altın atıkları, Avustralya fosfat yan ürünleri	Yan ürün geri kazanımı

Tablo 2 — Uranyum cevheri tenör sınıflandırması ve örnekler. Kaynak: WNA, IAEA, USGS.

Anahtar Bulgu: Kanada Athabasca Havzası'ndaki McArthur River (% 17) ve Cigar Lake (% 15,87) madenleri, dünya ortalamasının (~% 0,1–0,2) yaklaşık 100 katı tenöre sahiptir. Bu mucizevi yoğunluk; az cevherle çok uranyum üretmek, düşük atık hacmi ve küçük madencilik ayak izi anlamına gelir. Buna karşın, Kazakistan ISL yatakları (% 0,04) çok daha düşük tenörlü olmakla birlikte yerinde sızdırma yönteminin düşük maliyeti sayesinde ekonomik rekabətini korumaktadır.

2. Başlıca Uranyum Madenlerinin Ayrıntılı Tenör ve Cevher Verileri

Aşağıdaki tablo, dünyanın en önemli uranyum madenlerini tenör, cevher miktarı, ocak tipi ve 2024 üretimi bazında karşılaştırmaktadır. Bu veriler; ham madde temin güvenliği ve yatırım planlamaları açısından kritik önem taşımaktadır.

Maden	Ülke	Tenör (% U ₃ O ₈)	Cevher Miktarı (Mt)	Ocak Tipi	2024 Üretimi (tU)	Açıklama
McArthur River	Kanada	% 15–20 (ort. % 17)	~2,6 Mt	Yer altı	7.808	Dünyanın en yüksek tenörlü büyük madeni
Cigar Lake	Kanada	% 14–20 (ort. % 15,87)	~0,55 Mt	Yer altı (jet)	6.501	En yüksek tenörlü aktif maden; uzaktan kumandalı sondaj
Husab	Namibya	% 0,030–0,050	~500+ Mt	Açık ocak	4.437	Büyük hacim, düşük tenör; % 90 CGN (Çin) mülkü
Olympic Dam	Avustralya	% 0,059 U (Cu yan ürünü)	~10.000 Mt	Yer altı	~2.693	Dünyanın en büyük tekil yatak; Cu birincil ürün
Budenovskoye 2	Kazakistan	% 0,04–0,08	~350 Mt (ISL)	ISL	3.299	Uranium One / Kazatomprom ortak girişimi
Inkai	Kazakistan	% 0,02–0,05	~305 Mt	ISL	2.992	Cameco / Kazatomprom (%60/40)

Maden	Ülke	Tenör (% U ₃ O ₈)	Cevher Miktarı (Mt)	Ocak Tipi	2024 Üretimi (tU)	Açıklama
Rössing	Namibya	% 0,025–0,035	~280 Mt	Açık ocak	~1.800	Dünyanın en eski büyük açık ocak uranyum madeni (1976)
Langer Heinrich	Namibya	% 0,040–0,055	~75 Mt	Açık ocak	~1.200	Paladin Energy; 2023 yeniden açıldı
Somair / Arlit	Nijer	% 0,25–0,35	~42 Mt	Açık ocak	~962	Orano %63,4; askeri darbe sonrası üretim azaldı (2023)
Streltsovsk	Rusya	% 0,10–0,15	~50 Mt	Yer altı	~1.200	ARMZ; Transbaykal bölgesi
Khiagda	Rusya	% 0,05–0,08	~60 Mt (ISL)	ISL	~500	Buryatya; ISL yöntemi
Caetité / Lagoa Real	Brezilya	% 0,10–0,16	~80 Mt	Açık ocak	~175	INB devlet şirketi
Dornod	Moğolistan	% 0,10–0,12	~25 Mt	Yer altı	Üretim öncesi	MPDC / Rusya ortak; geliştirme aşaması

Tablo 3 — Dünyanın en büyük uranyum madenlerinin tenör, cevher miktarı ve 2024 üretim verileri. Kaynak: WNA 2024; INN 2025; IAEA Red Book 2024; Şirket raporları.

2.1 Madencilik Yöntemleri ve Tenör İlişkisi

Yerinde Sızdırma (ISL/ISR): Asidik veya bazik çözelti geçirgen kayaç katmanına basılır; uranyumu çözer ve yüzeye pompalanarak geri alınır. Düşük tenörlü (% 0,01–0,08) Kazakistan ve Özbekistan yataklarında uygulanır. 2024 dünya üretiminin > % 52'si bu yöntemle sağlanmıştır.

Yer altı Madenciliği: McArthur River ve Cigar Lake gibi derin, çok yüksek tenörlü (% 15–20) yataklarda kullanılır. Cigar Lake'de yüksek radyasyon ve yeraltı su basıncı nedeniyle uzaktan kumandalı jet sondaj makineleri devreye alınmıştır. 2024 payı: ~ % 44.

Açık Ocak Madenciliği: Namibya (Rössing, Husab, Langer Heinrich), Nijer (Arilit) ve Avustralya (Ranger) gibi yüzeye yakın, büyük hacimli ancak düşük tenörlü (% 0,03–0,35) yataklarda uygulanır. Yüksek dekapaj, düşük cevher içeriği; yüksek hacim gerekmektedir.

Yan Ürün Geri Kazanımı: Uranyum, bakır (Olympic Dam, % 0,059 U) ya da altın (Güney Afrika Witwatersrand) üretiminin yan ürünü olarak elde edilir. Maliyet, birincil ürüne yüklendiğinden uranyum çok düşük maliyetle elde edilir. Dünya üretiminin ~ % 4'ü.

3. Ülkelere Göre Dünya Uranyum Üretimi (2024)

2024 yılında dünya maden üretimi 60.213 tU olup COVID dönemine göre belirgin biçimde toparlanmıştır. Bu üretim, yaklaşık % 90 oranında reatör talebini karşılamaktadır. Dünya genelinde 62 ülke uranyum arama/üretim faaliyeti yürütmektedir (IAEA 2024).

Sıra	Ülke	2024 Üretimi (tU)	Dünya Payı	Başlıca Şirket	Yöntem
1	Kazakistan	23.270	% 39	Kazatomprom	ISL
2	Kanada	14.309	% 24	Cameco, Orano Canada	Yer altı
3	Namibya	7.333	% 12	Swakop Uranium (CGN), Paladin	Açık ocak
4	Avustralya	4.598	% 8	BHP, Heathgate	Açık ocak / ISL
5	Özbekistan	4.000	% 7	Navoi Mining (NMMC)	ISL
6	Rusya	2.738	% 5	ARMZ (Rosatom)	ISL / Yer altı
7	Çin	1.600	% 3	CNNC, CGN	ISL

Sıra	Ülke	2024 Üretimi (tU)	Dünya Payı	Başlıca Şirket	Yöntem
8	Nijer	962	% 2	Orano (eski Areva)	Açık ocak
9	Hindistan	500	< % 1	UCIL	Yer altı
10	ABD	260	< % 1	Energy Fuels, Ur-Energy	ISL / Açık ocak

Tablo 4 — 2024 Yılı Dünya Uranyum Üretimi (İlk 10 Ülke). Kaynak: WNA, World Uranium Mining Production, Ocak 2026; IAEA Red Book 2024.

3.1 Başlıca Üretici Ülkelerin Profili

Kazakistan (% 39 — 23.270 tU)

Kazakistan, 2009'dan bu yana kesintisiz olarak dünyanın en büyük uranyum üreticisidir. Devlet şirketi Kazatomprom ülke üretiminin büyük bölümünü kontrol etmektedir. Chu-Sarısu (kuzey) ve Sırderya (güney) havzalarında konumlanan yataklar % 0,01–0,08 tenör aralığında olup tamamı ISL yöntemiyle işletilmektedir. Kazak uranyumunun büyük bölümü Çin ve Hindistan'a ihraç edilmekte; Batılı alıcılar tedarik çeşitliliğini artırmaktadır.

Kanada (% 24 — 14.309 tU)

Kanada üretimi tamamen Saskatchewan eyaletindeki Athabasca Havzası'na dayanmaktadır; bu havza dünyanın en yüksek tenörlü uranyum yataklarını barındırmaktadır. McArthur River / Key Lake (ort. % 17) ve Cigar Lake (ort. % 15,87) madenleri Cameco–Orano ortaklığıyla işletilmektedir. Üretim, karmaşık dondurma teknikleri ve uzaktan kumandalı jet sondaj makineleri gerektirmektedir.

Namibya (% 12 — 7.333 tU)

Afrika'nın lider uranyum üreticisi Namibya'da Husab (CGN çoğunluk hissedar), Rössing ve Langer Heinrich madenleri düşük tenörlü (% 0,025–0,055) yatakları açık ocak yöntemiyle işletmektedir. Düşük içeriklerine karşın büyük cevher hacmi sayesinde ekonomik üretim sağlanmaktadır.

Özbekistan (% 7 — 4.000 tU)

Özbekistan, Navoi Mining and Metallurgical Company (NMMC) aracılığıyla ISL yöntemiyle üretim yapmaktadır. Denizden uzak (landlocked) konumuna karşın Rusya ve Çin bağlantılı altyapı sayesinde uranyum uluslararası pazara ulaştırılmaktadır.

Rusya (% 5 — 2.738 tU)

Rusya, ARMZ (Rosatom iştiraki) aracılığıyla Streltsovsk (% 0,10–0,15 tenör, yer altı) ve Khiagda (% 0,05–0,08, ISL) gibi yataklardan üretim yapmaktadır. Uranium One kolu ise uluslararası varlıkları (başta Kazakistan) yönetmektedir. Rusya aynı zamanda küresel zenginleştirme kapasitesinin ~ % 40'ını kontrol etmektedir.

Nijer (% 2 — 962 tU)

Nijer, 2023 askeri darbesinden bu yana üretimini düşürmüştür. Arlit bölgesindeki SOMAIR (% 0,30–0,35 tenör) ve COMINAK (% 0,25) madenleri Orano tarafından işletilmektedir. Yüksek tenörü, düşük tenörlü Ükelere göre daha az cevherle üretim yapılmasına olanak tanımaktadır.

4. Uranyum Fiyatları: Spot Piyasa ve Uzun Vadeli Sözleşmeler

4.1 Tarihsel Fiyat gelişimi

Uranyum, standart ticaret formu olan U_3O_8 (triuranyumoktoksit — 'sarı kek' ya da 'sarı pasta') bazında ABD doları/pound (lb) cinsinden fiyatlandırılmaktadır. Fiziksel işlemlerin büyük bölümünü oluşturan uzun vadeli sözleşmeler, santral işleticileri ile tedarikçiler arasında müzakere edilen fiyatlar üzerine kurulur; spot piyasa referans fiyat niteliği taşır.

Yıl	Spot Fiyat (\$/lb U ₃ O ₈)	\$/kgU karşılığı	Piyasa Durumu
2016	~18	~39	Fukushima sonrası tarihî dip
2018	~27	~59	Hafif toparlanma
2020	~30	~66	COVID etkileri, arz kısıntıları
2022	~48	~106	Ukrayna krizi, nükleer yeniden canlanma
2023	~58	~128	Güçlü talep artışı
2024 Ocak	~106	~234	Çok yıllık zirve
2024 Aralık	73,50	~162	Konsolidasyon, yıl sonu kapanışı
2025 Ort.	~72–75	~159–165	EIA uzun vadeli sözleşme: 50,97 \$/lb
2026 (Proj.)	80–100+	~176–220	WNA / BofA öngörüsü

Tablo 5 — Uranyum spot fiyatlarının tarihsel seyri. Kaynak: UxC, TradeTech, EIA Uranium Marketing Annual Report 2025, INN 2025.

4.2 Güncel Piyasa Tablosu (2025/2026)

Spot fiyat 2024 sonunda 73,50 ×/lb ile kapanmıştır (UxC). 2025 boyunca 63,17–83,33 ×/lb aralığında dalgalanmış; yıl ortalaması ~ 72–75 ×/lb olmuştur. EIA verilerine göre ABD santralleri, 2024 uzun vadeli sözleşmelerini ortalama 50,97 ×/lb'dan imzalamıştır (EIA, Eylül 2025).

Fiyat Yükselişinin Başlıca Nedenleri

- Güçlü talep artışı: Dünyada inşaatı süren 60'tan fazla reaktör ve planlanan 110 yeni santral (WNA 2025)
- Arz sıkışıklığı: Kazatomprom 2024 üretim tahminini indirdi; Nijer (askeri darbe 2023) piyasa payını yitirdi
- Jeopolitik: Rusya yaptırımları ve Batı'nın tedarik çeşitlendirme zorunluluğu (ABD ADVANCE Act 2024)
- Finansal yatırımcılar: Sprott Physical Uranium Trust (SPUT), 2025'te 7,8 milyon lb satın alarak toplam varlığını 74 milyon lb'a çıkardı
- Yapay Zekâ veri merkezleri: Microsoft, Google, Amazon 2024'te nükleer enerji sözleşmeleri imzaladı

5. 1.000 MWe Reaktör İçin Yıllık Uranyum ve Cevher İhtiyacı (% 90 Kapasite Faktörü)

5.1 Fiziksel Temeller

Hafif su reaktörleri (HFR) — dünyada en yaygın reaktör tipi — düşük zenginleştirilmiş uranyum dioksit (LEU-UO₂, % 3,5–5 U-235) yakıtı kullanır. Doğal uranyum yalnızca % 0,711 U-235 içerir; geri kalanı fisyon bakımından verimsiz U-238 izotopudur. Bir U-235 atomunun bölünmesiyle ortalama 200,7 MeV enerji açığa çıkar (IAEA standardı). 3.000 MWt ısı gücündeki bir reaktörde günlük yaklaşık 3,14 kg U-235 fisyon geçirmektedir.

5.2 Ayrıntılı İhtiyaç Hesabı — Tenöre Göre Cevher Miktarı Dahil

Aşağıdaki tabloda farklı tenörlerdeki ülke cevherlerinden aynı miktarda uranyum elde etmek için ne kadar cevher gerekeceği hesaplanmıştır. Bu karşılaştırma, madencilik ölçeğini ve çevresel yükleri somutlaştırmaktadır.

Parametre	Değer	Birim / Açıklama
Reaktör net gücü	1.000	MWe (elektriksel)

Parametre	Değer	Birim / Açıklama
Kapasite faktörü	% 90	Modern HFR için tipik (IAEA 2024)
Termal verimlilik	% 33	HFR standardı
Termal güç	~3.030	MWt
U-235 fisyon tüketimi	3,14	kg/gün (3.000 MWt'ta; WNA / nuclear-power.com)
Yıllık çalışma günü	328,5	gün/yıl (% 90 KF)
Yıllık U-235 tüketimi (fisyon)	~1.031	kg U-235/yıl
Zenginleştirme derecesi	% 4,5	Taze UO_2 yakıtında U-235 oranı (tipik HFR)
Zenginleştirilmiş uranyum (yakıt)	~27–29	ton UO_2 /yıl (taze yakıt demetleri)
Doğal uranyum ihtiyacı	~160–175	tU/yıl (IAEA Red Book 2024: 163 tU/GWe/yıl)
U_3O_8 cinsinden doğal uranyum	~188–206	ton U_3O_8 /yıl
Gerekli cevher miktarı (% 0,04 tenör — Kazakistan)	~470.000–515.000	ton cevher/yıl
Gerekli cevher miktarı (% 0,10 tenör — Nijer/Rusya)	~188.000–206.000	ton cevher/yıl
Gerekli cevher miktarı (% 15 tenör — Kanada)	~1.250–1.370	ton cevher/yıl
Tahmini uranyum maliyeti (@75 \$/lb)	~26–29	Mio. ABD doları/yıl
Uranyumun elektrik üretim maliyetindeki payı	% 5–10	Tipik HFR için (WNA, IAEA)

Tablo 6 — % 90 kapasite faktörüyle çalışan 1.000 MWe HFR için uranyum ve cevher ihtiyacı hesabı. Kaynak: WNA, Nuclear Fuel Cycle Overview; IAEA Red Book 2024; nuclear-power.com.

Tenör Karşılaştırması: Aynı 1.000 MWe reaktörü beslemek için: Kanada (% 15 tenör) → yalnızca ~1.250–1.370 ton cevher · Nijer / Rusya (% 0,10 tenör) → ~188.000–206.000 ton cevher · Kazakistan ISL (% 0,04 tenör) → ~470.000–515.000 ton cevher işlenmesi gerekmektedir. Kazakistan'da işlenen bu devasa cevher miktarı, ISL yöntemi sayesinde yüzey tahribatı yaratılmadan yeraltında çözülerek alındığından ekolojik etkisi sınırlı kalmaktadır.

5.3 Yakıt Zincirinin 6 Temel Aşaması

Adım 1 – Maden Üretimi: ~175 tU doğal uranyum madenlerden çıkarılır ($\approx$ 206 ton U_3O_8). Tenöre göre 1.250–515.000 ton cevher işlenir.

Adım 2 – Dönüşüm: U_3O_8 , zenginleştirme sürecinin giriş maddesi olan uranyum hekzaflorürü (UF_6) dönüştürülür. Dönüşüm hizmetleri Fransa (Orano), Rusya (Rosatom), Kanada (Cameco) ve ABD'de sunulmaktadır.

Adım 3 – Zenginleştirme: Gaz santrifüj teknolojisiyle U-235 oranı % 0,711'den % 4,5'e çıkarılır. Reaktör başına yılda ~100.000–120.000 SWU (Ayrıştırma İş Birimi) gerekmektedir. Küresel zenginleştirme kapasitesinin % 40'ı Rosatom'un elindedir.

Adım 4 – Yakıt Yapımı: Zenginleştirilmiş UF_6 , UO_2 peleti haline getirilir; Zircaloy kılıf borulara yerleştirilir ve yakıt demetleri (fuel assembly) oluşturulur.

Adım 5 – Reaktörde Kullanım: Tipik 1.000 MWe HFR, 157 yakıt demetinden oluşan ~100 ton zenginleştirilmiş uranyum içerir. Her yıl çekirdeğin yaklaşık dörtte biri (~40 demet) taze yakıtla değiştirilir. Yakıt demetleri tipik olarak 4 yıl reaktörde kalır.

Adım 6 – Kararma Havuzu ve Atık Yönetimi: Kullanılmış yakıt demetleri (spent fuel) hâlâ % 96 oranında değerli malzeme içermekte olup önce soğutma havuzunda (~5–10 yıl) tutulmaktadır. Fransa, yakıtın % 96'sını yeniden işlemekte ve bu sayede uranyum ihtiyacını % 10–15 azaltmaktadır.

Ekonomik Perspektif: Uranyum, bir nükleer santralin elektrik üretim maliyetinin yalnızca % 5–10'unu oluşturur. Uranyum fiyatının iki katına çıkması elektrik maliyetini yalnızca % 5–10 artırır. Bu oran, gaz santrallerindeki % 60–80 yakıt maliyet payıyla kıyaslandığında nükleer enerjinin hammadde fiyat dalgalanmalarına olan direncini açıkça ortaya koymaktadır.

6. Büyük Uranyum Şirketerinin Pazar Payı (2024)

Dünya uranyum maden üretiminin % 90'ından fazlası ilk 10 şirket tarafından sağlanmaktadır. Bu yoğunlaşma, tedarik güvenliği açısından stratejik bir hassasiyet oluşturmaktadır.

Şirket	Merkez	2024 Üretimi (tU)	Dünya Payı	Başlıca Ülkeler
Kazatomprom	Kazakistan	12.463	% 21	Kazakistan
Cameco	Kanada	10.193	% 17	Kanada, Kazakistan (Inkai)
Orano	Fransa	6.815	% 11	Kazakistan, Kanada, Nijer
Uranium One (Rosatom)	Rusya	5.829	% 10	Kazakistan, Güney Afrika, Tanzanya
CGN (China General Nuclear)	Çin	5.761	% 10	Namibya (Husab), Kazakistan
Navoi Mining (NMMC)	Özbekistan	4.000	% 7	Özbekistan
CNNC	Çin	3.286	% 6	Çin, Namibya
ARMZ (Rosatom)	Rusya	2.738	% 5	Rusya
BHP	Avustralya	2.693	% 5	Avustralya (Olympic Dam)
General Atomics / Quasar	ABD / Avustralya	1.808	% 3	Avustralya (Four Mile)

Tablo 7 — 2024 Yılı İtîpbarıyla Uranyum Üretimine Göre İlk 10 Şirket. Kaynak: WNA, World Uranium Mining Production, Ocak 2026.

Not: Uranium One, Rosatom'un uluslararası uranyum maden varlıklarını yöneten koludur; üretimi Kazakistan ülke toplamına da yansır. Rosatom bağlı şirketler (Uranium One + ARMZ) toplamı, dünya üretiminin % 15'ini oluşturmaktadır.

7. Tedarik Güvenliği, Stratejik Riskler ve Piyasa Görünümü

7.1 Küresel Arz-Talep Dengesi

2024 yılında dünya reatör talebi 67.000–68.000 tU düzeyindeydi. Maden üretimi (60.213 tU) talebin yaklaşık % 90'ını karşıladı; kalan kısım stoklar, yeniden işleme ve HEU seyrilmesinden sağlanmaktadır. WNA Nuclear Fuel Report, talebin 2040'a kadar referans senaryoda 150.000 tU'yu ve yüksek senaryoda 200.000 tU'yu aşabileceğini öngörmektedir.

7.2 Stratejik Riskler

- Jeopolitik Bağımlılık:** Kazakistan (% 39 pay) Rusya ve Çin ile sıkı ilişkiler içindedir. Batılı alıcılar Kanada, Avustralya, Namibya ve ABD'yi ön plana çıkararak çeşitliliği artırmaktadır.
- Maden Geliştirme Süreleri:** Keşfedilen bir yatağın üretime geçmesi tipik olarak 10–15 yıl almaktadır. 2030'ların ihtiyacını karşılayacak madenlerin şimdi lisans sürecine girmesi gerekmektedir.
- Zenginleştirme Kapasitesi:** Rosatom küresel zenginleştirme kapasitesinin ~ % 40'ını kontrol etmektedir. EURATOM ve Batılı tedarikçiler (Orano, Urenco) alternatif kapasiteyi hızla artırmaktadır.

- **Çevresel ve İdari Engeller:** Batılı ülkelerde yeni uranyum madenleri kapsamlı çevresel değerlendirme süreçleri ve toplumsal itirazlarla karşılaşmaktadır.
- **Modüler Reatörler (SMR):** Küçük Modüler Reatörler (SMR), 2030'lardan itibaren piyasaya girmesi beklenmekte; fosil yakıt kapasitesini daha hızlı ikame edebilme potansiyeli taşımaktadır.

7.3 Gelecek Projeksiyon (2030–2040)

WNA Nuclear Fuel Report 2023: 2040'ta yıllık üretime dayalı 1.000 MWe reatör sayısı 60'tan 160'a çıkabilir. Bunun için yıllık 150.000–200.000 tU üretim kapasitesi oluşturulması gerekmektedir.

IAEA 2024 projeksiyon senaryosu: Küresel nükleer kapasite 2050'ye kadar 393 GWe'den 890 GWe'ye çıkarsa bu, yıllık 1,2 Gt CO₂ azaltımına karşılık gelecektir.

Fiyat görünümü: Arz-talep dengesini göz önünde bulunduran analistler, spot fiyatın 2026–27'de 80–100+ \$/lb aralığında kalıcı hale gelmesini beklemektedir (BofA, WNA).

TÜRKİYE VE SOMALİ İÇİN EK BİLGİLER

TÜRKİYE VE SOMALİ — URANYUM REZERV ANALİZİ

Veriler:

TÜRKİYE — Uranyum Rezervleri ve Tenörleri

Genel Durum (Türkiye Enerji Bakanlığı / MTA / IAEA-NEA Red Book): MTA'nın son yıllardaki keşifleriyle Türkiye'nin uranyum (U₃O₈) kaynağı, % 0,017–0,24 tenör aralığıyla 54.978 tona ulaşmıştır. Keşiflerin yapıldığı iller: Manisa, Uşak, Yozgat, Aydın, Nevşehir ve Malatya'dır. Ayrıca Aydın-Söke'de % 0,002–0,8 tenörlü 547,6 ton rezerv tespit edilmiştir. [World Nuclear Association](#)

IAEA/OECD-NEA sınıflandırmasına göre 80–130 \$/kg maliyet tavanında Türkiye'nin tanımlanmış rezervi 9.129 ton olarak kayıtlıdır. [Geography Worlds](#)

Yatak	İl	Yatak Tipi	Tenör (% U ₃ O ₈)	Rezerv (ton U ₃ O ₈)
Köprübaşı (Salihli)	Manisa	Kumtaşı (sedimanter)	% 0,05	~7.000
Fakılı	Uşak	Kumtaşı (sedimanter)	% 0,03–0,05	~2.000
Sorgun	Yozgat	Sedimanter (Eosen)	% 0,10	~1.500
Küçükçavdar	Aydın	Sedimanter	% 0,03–0,05	~800
Demirtepe	Aydın	Damar tipi (metamorfik)	% 0,05–0,08	~500
Aydın-Söke	Aydın	Çeşitli	% 0,002–0,80	547,6
Toplam (MTA 2024)			% 0,017–0,24	~54.978
IAEA Red Book sınıfı		(\$80–130/kgU)		9.129

Yataklar büyük çoğunlukla Batı Anadolu'da yer almakta olup Manisa-Salihli-Köprübaşı yatağı, su tablasının altında korunan uraninit içeren ilk kumtaşı tipi cevher yatağı olması bakımından özel önem taşımaktadır. Yozgat-Sorgun yatağı ise % 0,10 U₃O₈ tenörüyle Türkiye'nin en zengin yatağıdır.

[Geography Worlds](#)

Önemli Not: Türkiye, IAEA Red Book 2024'te 62 ülke arasında yer almakla birlikte büyük ölçekli ticari üretim gerçekleştirmemektedir. MTA verileri keşif/kaynak niteliğinde olup ekonomik fizibilite çalışmaları henüz tamamlanmamıştır.

SOMALİ — Uranyum Rezervleri ve Tenörleri

Genel Durum (IAEA-IUREP / NEA Red Book):

Somali'nin yüzeysel uranyum yatakları, Mudugh iline bağlı Dusa Mareb–El Bur bölgesinin kurak kesimlerinde vadi dolgusu kalkreti (calcrete) tipinde olup kuzey-güney tektonik doğrultusuna paralel yaklaşık 240 km uzunluğunda bir kuşakta yer almaktadır. Bölgenin uranyum kaynakları ortalama % 0,10 U_3O_8 tenörüyle yaklaşık 5.000 ton U_3O_8 'e ulaşmaktadır. Uranyum mineralizasyonu karnotit biçiminde Mercia Serisi'nin en üst kesiminde gözlemlenmektedir. [Wikipedia](#)

IAEA ve NEA verilerine göre Somali'nin toplam uranyum rezervi yaklaşık 10.200 ton olup bunun 7.600 tonu potansiyel olarak ticari açıdan çıkarılabilir niteliktedir; ancak bu, görece yüksek maliyetlere karşılık gelmektedir. [Visual Capitalist](#)

Kaynak Kategorisi	Miktar (t U_3O_8)	Tenör	Bölge / Tipi
Makul ölçüde güvenceli kaynak (RAR)	~5.000	% 0,10	Dusa Mareb–El Bur, Mudugh — Kalkreti
Tahmini ek kaynak (EAR)	~11.000	% 0,05–0,10	Kalkreti yatakları
Spekülatif kaynak (SR)	0–150.000	Belirsiz	IAEA-IUREP 1983 tahmini
Toplam tanımlanmış (IAEA/NEA)	~10.200	Ort. % 0,10	
Ticari olarak çıkarılabilir	~7.600		Yüksek maliyetli

Önemli Not: Somali'de uranyum araması ve madenciliği, ülkedeki iç savaş ve El-Shabaab'ın başlıca yatakları —özellikle Galmudug bölgesinde— kontrol altına almasıyla büyük ölçüde sekteye uğramıştır. IAEA Red Book 2024 Somali'yi 62 ülke listesinde aktif üretici olarak sınıflandırmamaktadır. Veriler büyük ölçüde 1983 tarihli IUREP misyon raporuna dayanmaktadır. [Visual Capitalist](#)

ANALİZ

1. Türkiye

MTA'nın son yıllardaki keşifleriyle Türkiye'nin uranyum kaynağı % 0,017–0,24 tenör aralığıyla 54.978 tona ulaşmıştır. IAEA/OECD-NEA sınıflandırmasında (\$80–130/kgU) tanımlanmış rezerv 9.129 tondur. Yataklar büyük çoğunlukla Batı Anadolu'da (Manisa, Uşak, Aydın) ve İç Anadolu'da (Yozgat, Nevşehir, Malatya) yer almaktadır. Yozgat-Sorgun yatağı (% 0,10 tenör) ülkenin en zengin yatağıdır. Türkiye büyük ölçekli ticari uranyum üretimi yapmamakta; Akkuyu NGS (4×1.200 MWe, Rosatom ortaklığı) inşaatı sürmektedir.

2. Somali

Somali'nin uranyum yatakları Mudugh iline bağlı Dusa Mareb–El Bur bölgesinde 240 km uzunluğunda bir kuşakta, vadi dolgusu kalkreti (calcrete) tipinde bulunmaktadır. Ortalama % 0,10 U_3O_8 tenörüyle toplam kaynak ~10.200 tU, ticari açıdan çıkarılabilir kısım ise ~7.600 tU olarak tahmin edilmektedir. Veriler büyük ölçüde 1983 tarihli IUREP misyon raporuna dayanmaktadır. İç savaş ve El-Shabaab'ın başlıca yatakları kontrolü altına alması nedeniyle arama ve üretim faaliyetleri fiilen durmuştur.

3. Türkiye ve Somali Karşılaştırma Tablosu

Parametre	TÜRKİYE	SOMALİ
Toplam kaynak (t U_3O_8)	~54.978 (MTA 2024)	~10.200 (IAEA/NEA)

Parametre	TÜRKİYE	SOMALİ
IAEA Red Book tanımlanmış rezerv	9.129 tU (\$80–130/kgU)	~7.600 tU (ticari çıkarılabilir)
Tenör aralığı	% 0,017–0,24	% 0,05–0,10 (ort. % 0,10)
En zengin yatak	Yozgat-Sorgun (% 0,10)	Dusa Mareb-El Bur (% 0,10)
Yatak tipi	Kumtaşı (sedimanter), damar tipi	Kalkreti (vadi dolgusu)
Başlıca bölgeler	Manisa, Uşak, Yozgat, Aydın, Nevşehir, Malatya	Mudugh ili — 240 km kuşak
Madencilik durumu	Ticari üretim yok; fizibilite aşamasında	Aktif değil; iç savaş & El-Shabaab etkisi
Veri güvenilirliği	MTA 2024 (güncel keşif)	Büyük ölçüde IUREP 1983 raporuna dayanıyor
Nükleer enerji planı	Akkuyu NGS (Rusya-Rosatom); 4×1200 MWe inşaat	Mevcut değil

Tablo 2 — Türkiye ve Somali uranyum kaynaklarının karşılaştırmalı özeti. Kaynak: MTA 2024; IAEA/NEA Red Book 2024; IAEA-IUREP 1983.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Küresel uranyum piyasası, yapısal talep artışı ve arz kısıtlarının baskısıyla stratejik bir dönüşüm içindedir. Mevcut 7,93 milyon tU kaynakla uzun vadeli yeterlilik söz konusu olsa da üretimin coğrafi yoğunlaşması — üç ülkede (Kazakistan, Kanada, Namibya) % 75 pay — önemli tedarik güvenliği riskleri doğurmaktadır.

Temel bulgular:

- Kanada Athabasca Havzası (% 15–17 tenör), dünyanın en verimli uranyum üreticisi konumundadır.
- Kazakistan ISL yöntemi, düşük tenöre (% 0,04) rağmen maliyet avantajıyla küresel liderlikteki yerini koruyor.
- Spot fiyatın 2026–27'de 80–100+ \$/lb aralığında kalıcı hale gelmesi beklenmektedir.
- WNA, 2040'ta yıllık talebin 150.000–200.000 tU'ya çıkabileceğini öngörüyor; bu, mevcut üretimin 2,5–3 katıdır.
- Türkiye: 54.978 ton MTA kaynağı mevcut; Akkuyu inşaatıyla nükleer yolculuğuna başlıyor.
- Somali: ~10.200 tU potansiyel kaynak belirlenmiş; ancak güvenlik ortamı nedeniyle geliştirme mümkün değil.

EK — 7,93 Milyon Ton Uranyum: Hesaplama Yöntemi ve Kavramsal Çerçeve

Türkiye uranyum verileri (MTA 2024) üzerinden örnekler

A. Hesaplama: Üç Aşamalı Filtreleme Süreci

“7,93 milyon ton, dağın içindeki cevherin tamamı değil — cevherin içindeki saf uranyum elementinin, ekonomik çıkarılabilirlik filtresiyle süzölmüş toplamıdır.” Bu rakam üç ardışık adımın ürünüdür:

Adım 1 — Cevher Kütlesi (Ore Tonnage)

Bir maden sahasındaki tüm kaya ve toprak karışımının toplam ağırlığıdır. Yozgat-Sorgun yatağı (% 0,10 tenör) örneğinde, ekonomik rezerv olarak tanımlanan 9.129 tU uranyumu yeryerinden çıkarmak için yaklaşık **9 milyon ton kaya/toprak** işlemek gerekmektedir — bu, uranyumun kendisinin yaklaşık 1.000 katıdır.

Adım 2 — Ham Uranyum İçeriği (Tenör Çarpımı)

Cevher kütlesi, tenör yüzdesiyle çarpılarak cevherin içindeki ham uranyum miktarı hesaplanır: **Cevher kütlesi × tenör = ham tU miktarı**. Türkiye genelinde bu hesap, tüm sahalardaki toplam ham uranyum içeriğini **54.978 tU** olarak vermektedir (MTA 2024). Ancak bu, henüz ekonomik filtreden geçmemiş ham rakamdır.

Adım 3 — Ekonomik Çıkarılabilirlik Filtresi (IAEA Kademeleri)

IAEA, uranyum kaynaklarını \$40, \$80, \$130 ve \$260/kgU maliyet eşiklerine göre kademelendirir. Çok düşük tenörlü, erişilmesi güç ya da mevcut piyasa fiyatlarında karlı olmayan yataklar bu rakamlara dahil edilmez. Türkiye için bu filtre sonuç verir: 54.978 tU ham kaynaktan yalnızca **9.129 tU**, IAEA/OECD-NEA Red Book onaylamalı “tanımlanmış rezerv” olarak kayıtlıdır (\$80–130/kgU). Küresel ölçekte aynı filtre tüm ülkelere uygulandığında sonuç **7,93 milyon tU**’dur.

B. Üç Kavram — Türkiye Örnekleriyle

Kavram	Tanım	Türkiye Örneği
Cevher kütlesi (ore tonnage)	Maden sahasındaki tüm kaya ve toprak karışımının ağırlığıdır; uranyumun kendisi dahil değildir.	Yozgat-Sorgun’dan 9.129 tU çıkarmak için % 0,10 tenörle yaklaşık 9 milyon ton kaya/toprak işlenmesi gerekir — rezervin ~1.000 katı.
tU (ton uranyum metali)	IAEA’nın standart ölçüm birimi: Uranyumun element olarak saf kütlesi. 7,93 milyon ton bu birimdedir.	Türkiye Red Book rezervi: 9.129 tU (\$80–130/kgU). Metalik uranyumun ağırlığıdır; ne cevher kütlesi ne de sarı kek.
U₃O₈ (sarı kek)	Madenden çıkan ilk işlenmiş üründür. 1 tU = 1,179 ton U ₃ O ₈ . Spot piyasada \$/lb bazında işlem görür.	9.129 tU × 1,179 = yaklaşık 10.763 ton U ₃ O ₈ . Bu form, nükleer yakıt döngüsünde uranyum zenginleştirme tesisine gitmeden önce satışın yapıldığı standarttır.

Tablo EK-1 — Cevher kütlesi, tU ve U₃O₈ kavramlarının Türkiye verileriyle karşılaştırmalı açıklaması. Kaynak: MTA 2024; IAEA/OECD-NEA Red Book 2024.

Özet

7,93 milyon tU = Cevher kütlesi × tenör × ekonomik filtre. Dağın kendisi değil, dağın içindeki uranyumun — ve o uranyumun mevcut teknoloji ve fiyatlarla çıkarılabilir kısmının — toplamıdır. Türkiye özelinde: 54.978 tU ham kaynak → 9.129 tU ekonomik rezerv → ~10.763 ton U₃O₈ satışa hazır ürün. Her aşama farklı bir kavrama karşılık gelir; bunları karıştırmak uranyum ekonomisinin gerçeğini yanlış okumaya yol açar.

Kaynaklar

Bu yazımın tüm verileri aşağıdaki birincil kurumsal ve akademik kaynaklara dayanmaktadır:

- [1] IAEA / OECD-NEA. Uranium 2024: Resources, Production and Demand (Red Book, 30. Baskı). OECD Publishing, Paris, 2024.
- [2] World Nuclear Association (WNA). World Uranium Mining Production. Güncelleme: Ocak 2026. www.world-nuclear.org
- [3] World Nuclear Association (WNA). Nuclear Fuel Cycle Overview. 2024. www.world-nuclear.org
- [4] World Nuclear Association (WNA). Supply of Uranium. 2024. www.world-nuclear.org
- [5] World Nuclear Association (WNA). Nuclear Fuel Report 2023. Londra.
- [6] U.S. Energy Information Administration (EIA). Uranium Marketing Annual Report — 2024 Verileri. Eylül 2025. www.eia.gov
- [7] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2024. Paris: IEA Publications.
- [8] IAEA. Nuclear Power and Climate Change. IAEA Nuclear Energy Series, 2024.
- [9] nuclear-power.com. Fuel Consumption of Conventional Reactor — U-235 Consumption. 2021.
- [10] Investing News Network (INN). Top 10 Uranium Mines in the World. Güncelleme: Ocak 2025.
- [11] Investing News Network (INN). Uranium Reserves: Top 5 Countries. Eylül 2024.
- [12] USGS. Uranium — Deposits, production and resources, market dynamics, and supply chain risks. USGS Fact Sheet 2025-3057. Nisan 2026.
- [13] Science Insights. Where Do They Mine Uranium? Top Countries and Mines. Mart 2026.
- [14] Sprott Physical Uranium Trust (SPUT). Monthly Update, Aralık 2025.
- [15] UxC / TradeTech. Daily Uranium Spot Price Indicator. 2024/2025. www.uranium.info
- [16] Bank of America Global Research. Uranium Market Outlook 2025. Ekim 2024.
- [17] Foro Nuclear. Reservas de uranio y desarrollo nuclear mundial. Mayıs 2025.
- [18] Wikipedia / World Nuclear Association. SOMAIR, Cigar Lake, McArthur River maden verileri. 2024.

