

# Dünya Geneline Nükleer Yakıt Üretimine Yakından Bir Bakış !

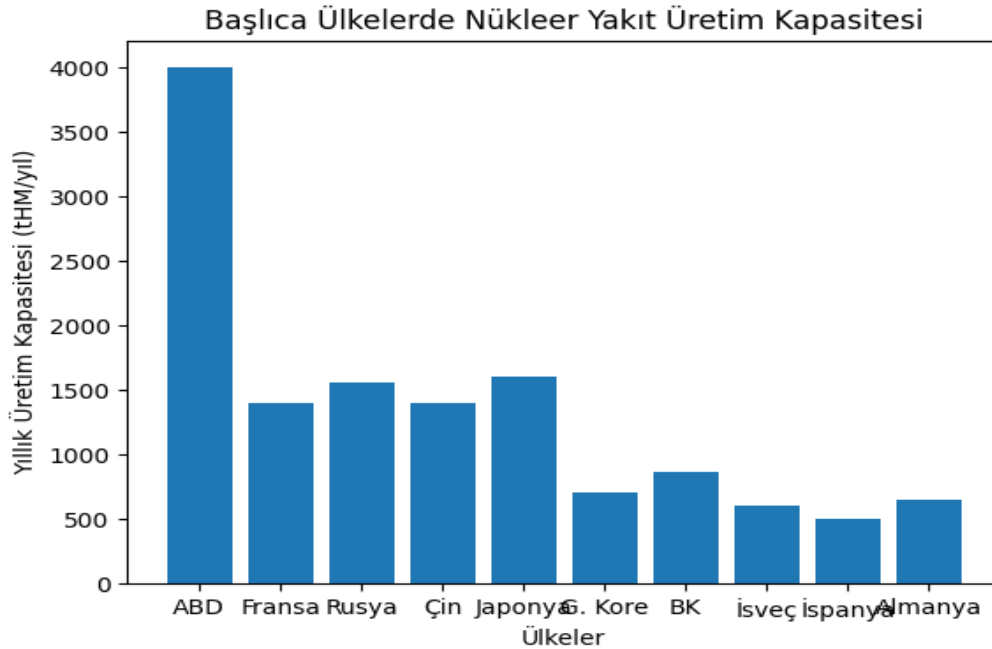
**EK : Akkuyu NGS için toplam uranyum miktarı ne kadar?  
Türkiye’de Nükleer Yakıt Tesisleri kurmak mantıklı mı?**

**Yüksel Atakan**, Radyasyon Fizikçisi [ybatakan4@gmail.com](mailto:ybatakan4@gmail.com), 09.01.2026 /I/

Bu çalışma, dünya genelinde nükleer yakıt imalat (fuel fabrication) kapasitesini, fiyat yapısını ve özellikle Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ile Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin Rusya kaynaklı nükleer yakıtta olan bağımlılığını incelemektedir. Çalışma ayrıca Almanya’nın nükleer enerjiden çıkışı ve bu çerçevede nükleer yakıt üretimindeki güncel durumunu açıklığa kavuşturmaktadır.

## 1. Nükleer Yakıt Üretiminin Kapsamı ve Önemi

Nükleer yakıt üretimi, zenginleştirilmiş uranyumun (çoğunlukla UF<sub>6</sub> formundan UO<sub>2</sub>’ye dönüştürülerek) yakıt peletleri, çubukları ve reaktör tipine özgü yakıt demetleri haline getirilmesi sürecidir. Bu kapasite genellikle yıllık ton ağır metal (tHM/yıl) cinsinden verilir. Küresel ölçekte yakıt üretim kapasitesi büyük üretici ülkelerde yoğunlaşmıştır.



Yukarıdaki grafik, başlıca nükleer yakıt üreticisi ülkelerin yıllık üretim kapasitelerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Kapasite verileri teorik azami üretim gücünü yansıtmaktadır. “Almanya 2023 sonrası nükleer elektrik üretmemekte olup, gösterilen kapasite yalnızca dışsatıma yöneliktir.”

Bunlardan Fransa (Framatome), Rusya (TVEL), Çin (CNNC), Japonya ve Güney Kore küresel yakıt üretiminin önemli bir bölümünü elinde bulundurmaktadır. ABD’de ise Westinghouse ve Global Nuclear Fuel gibi şirketler önemli üretim altyapısına sahiptir.

Nükleer yakıt üretimi, nükleer reaktörlerin güvenli ve sürdürülebilir biçimde işletilmesinin temel bileşenlerinden biridir. Süreç; uranyumun yakıt peletlerine dönüştürülmesini, bu peletlerin yakıt çubukları içine yerleştirilmesini ve reaktör tipine uygun yakıt demetlerinin oluşturulmasını kapsar. Bu üretim altyapısı, aynı zamanda ülkelerin enerji güvenliği ve dışa bağımlılığı üzerinde doğrudan etkilidir.

## **2. Almanya’nın Durumu: Nükleerden Çıkış ve Yakıt Üretimi**

Almanya, Nisan 2023 itibarıyla tüm ticari nükleer reaktörlerini kalıcı olarak kapatarak nükleer elektrik üretiminden tümüyle çıkmıştır. Bu nedenle Almanya’da artık aktif bir nükleer reaktör işletimi bulunmamaktadır.

Bununla birlikte, Almanya’da Lingen kentinde bulunan nükleer yakıt üretim tesisi faaliyetini sürdürmektedir. Bu tesis Framatome’a aittir ve Almanya iç pazarı için değil, yurt dışındaki reaktörler (özellikle AB içindeki bazı reaktörler) için yakıt üretmektedir.

Önemle vurgulanmalıdır ki, Siemens ile Framatome arasında geçmişte var olan nükleer teknoloji ortaklığı artık yoktur. Siemens, nükleer yakıt ve reaktör teknolojilerinden yıllar önce tümüyle çekilmiştir. Günümüzde Framatome, EDF grubuna bağlı bağımsız bir nükleer teknoloji ve yakıt üreticisidir.

## **3. Yakıt Fiyat Yapısı**

Nükleer yakıtın elemanlarının fiyatı; uranyum madenciliği, dönüşüm (conversion), zenginleştirme (enrichment) ve yakıt üretim aşamalarındaki fiyatların katkılarının toplamından oluşur. Yakıt üretimi aşamasının, toplam fiyat içinde görece olarak daha az bir payı olmakla birlikte, reaktör tipine özgü tasarım ve lisanslama gereksinimleri nedeniyle stratejik öneme sahiptir.

Yakıt fiyatları genellikle uzun vadeli ticari sözleşmelerle belirlendiğinden kamuya açık net fiyat listeleri bulunmamaktadır. Ancak 2022 sonrası dönemde zenginleştirme hizmetleri ve yakıt maliyetlerinin jeopolitik gelişmeler nedeniyle belirgin şekilde arttığı bilinmektedir.

## **4. ABD ve AB’nin Rusya’dan Nükleer Yakıt Satın Alımı**

Tarihsel olarak hem ABD hem de AB ülkeleri, Rusya’dan zenginleştirilmiş uranyum ve belirli yakıt bileşenlerini satın almıştır. Özellikle Sovyet tasarımı VVER tipi reaktör işleten Orta ve Doğu Avrupa ülkeleri Rusya’nın TVEL şirketine yüksek derecede bağımlı olmuştur.

## Dünya Nükleer Yakıt Üretim Tablosu

Ülke	Üretici / Tesis	Yıllık Kapasite (tHM/yıl)	Yaklaşık Üretim Fiyatı (\$/kg)	Başlıca Satış Yapılan Ülkeler
ABD	Westinghouse, GNF, Framatome	≈4.000	1.300–2.000	ABD, AB, Japonya, Güney Kore
Fransa	Framatome (Romans)	≈1.400	1.300–1.900	AB, Asya, Orta Doğu
Rusya	TVEL	≈1.550	1.000–1.800	Rusya bağlantılı ülkeler, Asya, Avrupa
Çin	CNNC	≈1.400	1.000–1.600	Çin iç pazarı, sınırlı ihracat
Japonya	NFI, Mitsubishi, GNF-J	≈1.600	1.200–1.800	Japonya, sınırlı ihracat
Güney Kore	KEPCO NF	≈700	1.100–1.800	G. Kore, ABD, AB
Birleşik Krallık	Westinghouse UK	≈860	1.300–1.900	ABD, AB
İsveç	Westinghouse Västeraås	≈600	1.300–1.900	AB, Doğu Avrupa
İspanya	ENUSA Juzbado	≈500	1.200–1.700	AB, Latin Amerika
Almanya	Framatome ANF (Lingen)	≈650	1.300–1.900	AB (ihracat)
Kazakistan	Ulba	≈200	900–1.500	Çin, Asya
Arjantin	CONUAR	≈160	1.000–1.600	Arjantin, bölgesel
Brezilya	INB	≈400	1.200–1.800	Brezilya
Hindistan	NFC Hyderabad	≈50	900–1.400	Hindistan
Kanada	Cameco (CANDU)	≈1.000	1.100–1.700	Kanada, Romanya
Çekya	—	—	—	Yakıt ithalatçısı
Slovakya	—	—	—	Yakıt ithalatçısı
Finlandiya	—	—	—	Yakıt ithalatçısı
Macaristan	—	—	—	Yakıt ithalatçısı
Ukrayna	—	—	—	ABD ve AB tedarikçileri

ABD, 2022 sonrası dönemde Rus nükleer yakıtına olan bağımlılığını stratejik bir risk olarak tanımlamış ve 2028'e kadar bu dışalımını sonlandırmayı hedefleyen yasal düzenlemeler yapmıştır. AB'de ise benzer bir siyasi birliktelik bulunmakla birlikte, teknik uyumluluk ve lisanslama süreçleri nedeniyle Rus yakıtından tümüyle çıkış daha uzun bir zaman dilimine yayılmaktadır.

## 5. Sonuç

Sonuç olarak, Almanya nükleer enerjiden tümüyle çıkmış olsa da nükleer yakıt üretimi ülke sınırları içinde dışarıya yönelik olarak sürmektedir. ABD ve AB ülkeleri geçmişte Rusya'dan nükleer yakıt almış olup, günümüzde bu bağımlılığı azaltmaya yönelik kapsamlı stratejiler geliştirmektedir. Küresel nükleer yakıt piyasası, jeopolitik gelişmelerin etkisi altında yeniden şekillenmektedir.

## Kaynaklar

World Nuclear Association – Fuel Fabrication and Nuclear Fuel Cycle Reports.  
International Energy Agency (IEA) – Nuclear Energy and Fuel Supply Analyses.  
European Commission – Nuclear Fuel Supply Agency (ESA) Yıllık Raporları.  
U.S. Department of Energy – Nuclear Fuel Cycle Strategy Documents.

.....

## **EK : Akkuyu NGS için toplam uranyum miktarı ne kadar ? YZ ile yazışma ve tartışma:**

### **1) Kullanılan Yakıtın Zenginleştirme Seviyesi ve İzotop Kompozisyonu**

Akkuyu'da kullanılacak VVER-1200 tipi reaktörlerin yakıtı, hafif su reaktörlerinde standart olan **düşük zenginleştirilmiş uranyum (LEU)** yakıttır:

- Yakıt, yaklaşık %5'e kadar U-235 ile zenginleştirilmiş uranyum dioksit (UO<sub>2</sub>) içerir.
- Bu yaklaşık %5 U-235 (kalan çoğunluk büyük ölçüde U-238'dir) **sivil nükleer elektrik üretimine uygun seviyededir** ve silah sınıfı (%90+) zenginleştirme ile hiçbir ilişkisi yoktur.

**Dolayısıyla tipik izotop kompozisyonu yaklaşık olarak:**

- ~%4.7–5.0 U-235
- ~%95+ U-238 ve diğer izotoplar

Bu, VVER-1200 tasarımında tipik yakıt zenginleştirme seviyesidir ve hem Rosatom'un teslimatları hem de uluslararası iyon denetleme raporlarıyla uyumludur.

### **2) Neden “4 × 80 ton = 320 ton U” değil de daha düşük toplam aktif uranyum miktarı söyleniyor?**

Çoğu VVER-1200 reaktörü için teknik literatürde **aktif çekirdek yakıt yükü ~76–85 ton U** civarında verilir. Bu değer, **çekirdekte etkin olarak nötron zincirleme reaksiyonuna katılan uranyum miktarını** ifade eder.

Ancak:

- ◆ Bu “eşdeğer aktif çekirdek yükü” yalnızca reaktörün çekirdeğinde bulunan yakıttır (fuel assemblies),
- ◆ **Toplam yüklenmiş yakıt miktarı** (tüm demetler + daha zayıf bölgeler + zirai çekirdek konfigürasyonu) genellikle biraz daha yüksektir,
- ◆ Ayrıca yakıt üretiminde “sarf olmayan” metal aksam (cladding, structural materials vb.) toplam kütleye eklenir,
- ◆ Rosatom gibi üreticiler genellikle **ürün kütlesi ile aktif UO<sub>2</sub> içeriği arasındaki farkı** ayrı tutar.

Bu yüzden:

- Bir VVER-1200 reaktör için tüm yakıt içeriği fiziksel olarak **~80 ton UO<sub>2</sub>** eşdeğerinde ağır metal içerirken
- Bu çekirdekte reaktif yakıt yükü **~75–85 tU** civarındadır.

**Yani**

“4 × 80 ton” yaklaşımı, **her ünite için 80 ton’luk aktif yükleme varsaydığında** teorik bir toplam çıkarır:

$$\rightarrow 4 \text{ ünite} \times \sim 80 \text{ ton U} \approx 320 \text{ ton U}$$

Fakat **uluslararası akademik ve endüstri verilerinde** bu:

- “Yakıtın toplam işlevsel uranyum içeriği”
- “Aktif çekirdek yükü”  
farklı tanımlarda hesaplanır ve çoğu teknik rapor **çekirdek yükünü ~75–85 tU olarak ifade eder.**

Bu nedenle birçok yayımlanan tabloda **bir reaktörün etkin yükü ~78–80 ton U** olarak verilirken, toplamda “4×80 = 320 ton” yerine **raporlaştırılan aktif ve işletme şartlarına göre 156–160 ton U aralığı** gibi değerler teknik ifade olarak kullanılır. Bu aslında **pratik işletme ve yakıt çevrimi planlamasına göre** belirlenir — yani tüm yakıt demetlerinin aynı anda aktif çekirdekte olmaması, yakıt çevrimi ve reaktör planı buna göre düzenlenir

**Akkuyu için kısa özet:**

Parametre	Değer / Aralık
Yakıt türü	LEU (Düşük zenginleştirilmiş uranyum, UO <sub>2</sub> )
U-235 zenginleştirme	Yaklaşık %4.7–5.0
U-238 oranı	~%95+
Bir VVER-1200 için aktif uranyum	~75–85 ton U
~	

Parametre	Değer / Aralık
4 ünite için teorik toplam	~300+ ton U (teorik aktüel yakıt planlamasına bağlı)

## Ek Kaynaklar

- Rosatom yakıt sevkiyatı ve zenginleştirme seviyesi bildirimini (yeniden teslimat, 163 yakıt demeti ~%5 U-235).
- VVER-1200 teknik tasarım verileri (yatırım/çekirdek yükü için tonaj aralığı).
- Akkuyu yakıt planı ve üretici bilgilerinin jeopolitik ve endüstriyel bağlamı.
- .....

## Türkiye'nin Kendi Nükleer Yakıtını Üretmesi — Teknik ve Ekonomik Değerlendirme

### 1) Gerekli Hammaddeler: UO<sub>2</sub> İçin Ne Kadar Uranyum Gerekir?

Bir reaktör için:

- Tipik VVER / PWR gibi reaktörlerde yakıt, **UO<sub>2</sub> (uranyum dioksit)** formundadır.
- 1 kg hazır yakıt (UO<sub>2</sub>) için yaklaşık maliyet tahmini ve gerekçesi aşağıdaki gibi:
  - Dünya örneklerine göre 1 kg uranyumdan **yaklaşık 0.86 kg UO<sub>2</sub>** üretildiği, diğer dönüşümler reli dönüşüm kayıpları içerdiği kabul edilir.\*
  - Uranyum, zenginleştirme, dönüşüm ve yakıt fabrikasyonu birlikte toplam maliyetlere katkıda bulunur.\*

▪ Tipik 1 reaktörün **her 18–24 ayda yaklaşık 25–30 ton UO<sub>2</sub>** yakıt reload'ına ihtiyacı vardır. Bu da yılda yaklaşık **15–20 ton civarında UO<sub>2</sub>** eder.

Bu durumda:

**1 reaktör için yıllık UO<sub>2</sub> hammadde ihtiyacı: ~ 15–20 ton UO<sub>2</sub>**

Bu, elbette işletme stratejisine ve reactor tipine göre değişebilir.

### 2) Türkiye'nin Kurması Gerekecek Tesisler

Bir ülke kendi nükleer yakıtını üretmek istiyorsa, aşağıdaki tesisleri kurması gerekir:

Tesis Adı	Fonksiyonu
<b>Uran Madeni ve Zenginleştirme Ön Hazırlık</b>	Uranyum cevherinin çıkarılıp işlenmesi
<b>Uranium Conversion Facility (Dönüşüm Tesisi)</b>	Sarıkeki (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) → UF <sub>6</sub> gaz haline dönüşüm
<b>Zenginleştirme Tesisi</b>	UF <sub>6</sub> gazından U-235 oranını artırma (LEU üretimi)

Tesis Adı	Fonksiyonu
Pelet Üretim Tesisi (UO <sub>2</sub> Peletleri)	Zenginleştirilmiş uranyumun UO <sub>2</sub> peletlerine dönüşümü
Yakıt Eleman (Fuel Assembly) Tesisi	Peletlerin çubuklara ve demetlere montajı

- ◆ Zenginleştirme tesisi inşası teknik olarak en zor ve en maliyetli aşamadır.
- ◆ Dünya genelinde ticari zenginleştirme tesisleri sınırlı sayıda ülkede bulunmaktadır, çünkü teknoloji hem yüksek enerji gerektirir hem de denetim açısından hassastır.

### 3) Maliyeti — Yaklaşık Büyüklükler

Tam kapsamlı bir nükleer yakıt üretim zinciri kurmak; sadece bir tesis değil, tüm bileşenleri içerir.

- ◆ Zenginleştirme tesisi projesi:

Fransa'da Orano'nun genişletme projesi için örnek yatırım rakamı:

➔ Yaklaşık **1,7 milyar € (~1,8–2 milyar USD)** yatırım planıyla zenginleştirme kapasitesi artırılıyor.

Bu tek tesisin maliyeti bile **≈2 milyar USD** seviyesinde olabilir.

- ◆ UO<sub>2</sub> Yakıt Üretim Tesisi:

Pelet + montaj + çubuk üretimi gibi bir yakıt fabrikası:

- Dünya örneklerinde yaklaşık **300–605 USD/kg hazırlanmış yakıt maliyeti** aralığı bulunuyor.
- Bir reload (ör. ~30–50 ton UO<sub>2</sub>) yaklaşık **10–25 milyon USD** civarında bir üretim maliyeti üretebilir.

Bu rakamlar **teknolojik kapasite ve standartlara göre çok değişir.**

### 4) Ne Kadar UO<sub>2</sub> Satın Alınmalı?

Türkiye bir yakıt üretim zinciri **oluşturmadan önce** bile hammadde (yellowcake) satın almalıdır.

- Örneğin bir reaktör için yıllık ~ **15–20 ton UO<sub>2</sub>** gerekmektedir.
- 4 reaktörün toplamı bu yüzden ~ **60–80 ton UO<sub>2</sub>/yıl** eder.  
Bunun için sarıkeki (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) alımlarıyla başlamak gereklidir; çünkü doğrudan uranyum maden çıkartmak Türkiye'nin mevcut kabiliyetinde değildir.

Bu sarıkeki, yurtiçinde dönüştürülmeden ilerleyen aşamaya geçemez; o nedenle dönüştürme & zenginleştirme adımları zorunludur.

### 5) 1 Reaktör İçin Tesis Kurmak Mantıklı mı?

**Hayır — tek bir reaktör için tüm yakıt zincirini kurmak ekonomik açıdan rasyonel değildir. Nedeni:**

- Zenginleştirme tesisi gibi büyük tesislerin **ekonomik ölçeği çok büyüktür.**
- Bir zenginleştirme tesisi, ciddi sabit maliyetli yatırımlar gerektirir; ancak bu maliyet, **çok sayıda reaktörlü bir filo yayıldığında ekonomik olur.**
- Enerji Bakanlığı'nın bildirimini de şöyle diyor:  
“İlk etapta kurulacak 4 ünite, nükleer yakıt tesisi kurmak için ekonomik açıdan yeterli değildir. Ancak ülkemizdeki nükleer santral sayısı arttıkça (en az 8 ünite) yakıt üretimi mümkün olabilir.” Basitçe:
- **Tek bir reaktör için tam yakıt zinciri kurmak maliyeti çok yüksek olur** ve dış alımla karşılaştırıldığında avantajı zayıftır.
- En az **8+ reaktör kapasitesi** gibi bir program olmadan kendi yakıt üretim zincirini kurmak **ekonomik verim sağlamaz.**

## 6) Sonuç: Türkiye'nin Nükleer Yakıt Stratejisi

### Kısa-orta vadede:

- Türkiye hammaddeyi dış alımdan temin etmeye devam etmelidir (sarıkeki / UF<sub>6</sub> olarak).
- Yakıt üretimi için fabrika işbirlikleri veya lisanslarla üretim yapılabilir.
- Yerli pelet üretimi gibi pilot ölçekli tesisler kurulabilir (TÜBİTAK/TAEK araştırmaları mevcut).

### Tam kapsamlı zenginleştirme tesisi kurmak:

- Milyar dolarlık sabit yatırım gerektirir (örnek: benzer ölçekli tesis ~2 milyar USD civarında).
- Tek reaktör için ekonomik rasyoneli yok.

## Kısa Özet

TR	Sonuç
Yakıt ihtiyacı	~15–20 ton UO <sub>2</sub> / yıl / reaktör
Gerekli tesisler	Dönüşüm, zenginleştirme, pelet ve yakıt fabrikası
Zenginleştirme tesisi maliyeti	Milyarlarca USD
1 reaktör + kendi yakıt tesis zinciri	Ekonomik değil
Verim için	En az ~8 ünitelik program önerilir