

Nükleer Yakıtların Enerjileri Neden Fosil Yakıtlardan Milyonlarca Kat Fazladır?

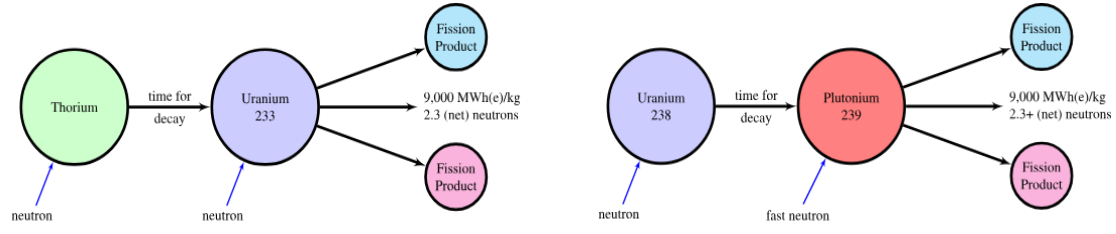
Toryum ve Uranyum Enerji Hesapları..

Fosil Yakıtlarla Karşılaştırmalar

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com., 29.06.2026 /YZ/

Özet

Bu çalışmada atom çekirdeği bölünmeyen doğadaki Toryum'un (Th-232) reaktörde, bir nötron yakalayarak bölünebilir uranyum 233'e (U-233) dönüşmesi ve bundan ayrı olarak uranyum 235'in (U-235) bölünmesinden ortaya çıkan enerjinin temel nükleer fizik ilkeleri üzerinden enerji yoğunluğu 1 kilogram bölünebilir (fisil/fertil) malzemenin tümüyle bölünmesinden elde edilebilecek ısı enerjisi, eşdeğeri kömür, petrol ve doğal gaz miktarlarına dönüştürülerek hesaplanmaktadır. Ardından 100 ve 1000 MW elektrik gücündeki bir reaktörün bir yıl süreyle işletilmesi için gereken kuramsal ve gerçekçi nükleer yakıt miktarları hesaplanmakta, başlangıç miktar gereksinimleri tartışılmaktadır. Çalışmanın son bölümünde, %0,1 tenörlü 10.000 tonluk bir cevher kütesinden elde edilebilecek toryum ve uranyumun aynı reaktörü kaç yıl besleyebileceği örneklenmekte ve hesapların dayandığı basitleştirici varsayımlar açıkça gösterilmektedir. Hesaplamalar, nükleer yakıtların fosil yakıtlara göre milyonlarca kat daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olduğunu; ancak gerçek reaktör performansının kapasite faktörü, yakıt çevrimi kayıpları ve zenginleştirme gereksinimleri gibi etkenlerle kuramsal üst sınırı önemli ölçüde altında kaldığını göstermektedir.



Not: Yukarıdaki şekillerde verilen “9.000 MWh(e)/kg” değeri, santralin elektriksel verimi (tipik olarak %35–45) hesaba katılarak elde edilen net elektrik enerjisi karşılığıdır. Bu çalışmanın metin kısmındaki 22–23 GWh/kg değerleri ise yakıtın fisyonundan açığa çıkan toplam ısı enerjisi (elektriğe çevrilmeden önceki enerji) ifade etmektedir; aradaki fark bu ısı-elektrik enerji ayrımından kaynaklanmaktadır.

1. Giriş

Nükleer yakıtların kütlece enerji yoğunluğu, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan milyonlarca kat daha yüksektir; bunun nedeni nükleer bölünmede (fisyonda) açığa çıkan enerjinin, kimyasal yanma tepkimelerinde rol oynayan elektron bağlarından kaynaklanan enerjiden çok daha büyük olan çekirdek bağlanma enerjisi farkından kaynaklanmasıdır [1,2]. Bu çalışmada 1 kg toryumun ve 1 kg uranyumun enerji karşılığı sıfırdan hesaplanmakta, ayrıca 100 MW ve -karşılaştırma amacıyla-

1000 MW elektrik gücündeki bir reaktörün bir yıl çalıştırılması için gerekli yakıt miktarı belirlenmekte ve sonuçlar fosil yakıtlarla karşılaştırılmaktadır.

1.1 Nükleer Bölünmenin (Fisyonun) Temeli

Bir U-235 ya da U-233 atom çekirdeğinin nötron yakalayarak bölünmesi (fisyonu) sırasında, parçalanma ürünlerinin kinetik enerjisi, anlık ve geciken nötronlar, gama fotonları ve beta bozunmalarının toplamından oluşan ortalama 200 MeV'lik bir enerji açığa çıkar [1,3,4]. Toryum-232 kendisi doğrudan fisil değildir (bölünmez); bir nötron yakalayarak önce Th-233'e, ardından beta bozunmaları yoluyla Pa-233 üzerinden fisil U-233'e dönüşür ve bu izotop daha sonra bölünür [1,5].

1.2 1 kg Yakıtın Enerjisi - Genel Çerçeve

1 kg U-235 ya da 1 kg U-233'ün tümüyle fisyonla uğraması, yaklaşık 8×10^{13} J, yani 22–23 GWh büyüklüğünde bir ısı enerjisi (fisyon enerjisi) karşılık gelir [1,3,4,6]. Bu değer, aşağıdaki bölümlerde adım adım türetilmektedir.

1.3 Fosil Yakıt Karşılaştırması (Özet)

Aşağıda ayrıntılı olarak gösterileceği gibi, 1 kg nükleer yakıt (tam fisyon varsayımıyla) yaklaşık 3300–3500 ton kömür, 1900–2000 ton petrol veya 1600–1700 ton doğal gazla karşılaştırılabilir enerji içeriğine sahiptir; bu rakamlar kömür için ortalama ısı değeri ≈ 24 MJ/kg, petrol için ≈ 42 MJ/kg ve doğal gaz için ≈ 50 MJ/kg referans alınarak hesaplanmıştır [7,8].

1.4 100 MW Santral Hesabı (Özet)

100 MW elektrik gücünde sürekli (kuramsal olarak %100 kapasite faktörüyle) çalışan bir santral, yılda 876 GWh elektrik üretir. Ergimiş tuz reaktörü teknolojisi için tipik olarak öngörülen ısı verim değeri %45 alındığında, bu yaklaşık 1947 GWh termik enerji üretimidir [9,10]. Gerçek işletmede dünya genelindeki ticari reaktörlerin ortalama kapasite faktörü %80–88 aralığındadır [11,12]; bu nedenle gerçekçi yıllık elektrik üretimi 876 GWh'den daha düşük olacak ve buna karşılık gelen yakıt tüketimi de bu oranda küçülecektir. Bu çalışma boyunca, orijinal hesaplara sadık kalınarak önce %100 kapasite faktörlü kuramsal üst sınır verilmekte, ardından gerçekçi kapasite faktörü düzeltilmesi ayrı bir bölümde (Bölüm 6) ele alınmaktadır.

1.5 Yakıt Gereksinimi (Özet)

Kuramsal olarak yıllık yaklaşık 85–90 kg fisyonla uğrayan nükleer yakıt, 100 MW'lık bir santralin %45 verimle çalıştırılması için yeterlidir. Ancak pratikte yakıt çevrimindeki nötron ve yeniden işleme kayıpları nedeniyle gerçek yıllık tüketim, yüklenen yakıt kütlesi bakımından bu değer oldukça üzerindedir (Bölüm 4 ve 5).

1.6 Ergimiş Tuz Reaktörleri ve Klasik Reaktörler

Ergimiş tuz reaktörleri (Molten Salt Reactor, MSR), yakıtın sıvı florür veya klorür tuzları içinde çözünmüş hâlde bulunduğu, çevrim içi (online) yeniden işleme ve fisyon ürünü ayrıştırma imkânı sunan bir reaktör sınıfıdır; bu özellik daha yüksek yakıt kullanım oranına (burnup) ulaşılmasını mümkün kılar

[10,13]. Buna karşın basınçlı su reaktörleri (PWR) günümüzde dünya çapında en yaygın kullanılan ticari reaktör teknolojisidir ve katı, hafifçe zenginleştirilmiş uranyum oksit yakıt çubukları kullanır [11].

1.7 Türkiye Açısından Toryum

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve OECD Nükleer Enerji Ajansı (NEA) verilerine göre dünya toryum kaynakları sıralamasında Hindistan ilk sırada, Türkiye ise yaklaşık 374–790 bin ton aralığında değişen tahminlerle ikinci sırada yer almaktadır; bu farklılık, kullanılan kaynağa ve 'kaynak' ile 'rezerv' tanımlarına bağlıdır [14,15]. Türkiye Enerji ve Doğal Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre Eskişehir-Sivrihisar bölgesinde %0,02 tenörlü 380.141 ton toryum kaynağı bulunmakta, ayrıca Eti Maden tarafından Eskişehir-Beylikova'da keşfedilen ve esas olarak nadir toprak elementi içeriğiyle bilinen 694 milyon tonluk cevher kütesinin ortalama 788 ppm ThO₂ tenörüne sahip olduğu belirtilmektedir [16]. Enerji Bakanlığı, bu sahadan yılda yaklaşık 250 ton toryum üretilebileceğini açıklamıştır [17,18]. Bununla birlikte, bu kaynakların ekonomik olarak nükleer yakıt çevrimine kazandırılabilmesi için ticari ölçekte toryum reaktörü teknolojisinin olgunlaşması ve buna uygun yakıt işleme/dönüştürme altyapısının kurulması gerekmektedir; bugüne kadar dünyada ticari ölçekte işletilen bir toryum reaktörü bulunmamaktadır, ancak İngiltere, Almanya ve ABD'de geçmişte prototip çalışmaları yürütülmüş; Hindistan, Çin, Rusya ve diğer ülkelerde toryum yakıt çevrimi araştırmaları sürmektedir [16]. Çin'de işleyen ticari olmayan 2 MW ısı gücünde bir toryum ergimiş tuz deneme reaktörü bulunuyor. Çin benzer reaktörlerden 100 MW gücünde olanları planlamaktadır.

1.8 Genel Sonuç (Özet)

Enerji yoğunluğu açısından toryum (Th-232 → U-233 yoluyla) ve uranyum (U-235) birbirine yakındır; her iki yakıt da kütle başına benzer büyüklükte ($\approx 22\text{--}23$ GWh/kg) bir kuramsal ısı enerji potansiyeline sahiptir. Temel fark, yakıt çevriminin doğasında (toryumun fisil olmayışı ve dışarıdan başlatıcı fisil malzemeye gereksinim duyması), atık özelliklerinde (toryum çevriminde daha az plütonyum ve uzun ömürlü transuranik oluşumu) ve reaktör teknolojilerinin ticari olgunluk düzeyinde ortaya çıkmaktadır [1,10,16].

2. Ayrıntılı Hesaplar: Nükleer Fisyon Enerjisi

Bu bölümde, Bölüm 1'de özetlenen sonuçların türetildiği hesap adımları ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

2.1 Fisyon Başına Açığa Çıkan Enerji

Bir U-233 veya U-235 çekirdeğinin fisyonunda açığa çıkan toplam kullanılabilir enerji, fragmanların kinetik enerjisi ile anlık/geciken nötron, gama ve beta bozunma enerjilerinin toplamından oluşur ve ortalama olarak 200 MeV alınır [1,3,4]:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} = 3,204 \times 10^{-11} \text{ J}$$

$$E_f \approx 3,2 \times 10^{-11} \text{ J} / \text{fisyon}$$

Bu enerji tek bir çekirdek ölçeğinde son derece küçüktür; bu nedenle kullanılabilir ısı ve elektriksel güç düzeylerine erişmek için saniyede çok büyük sayıda (10^{18} – 10^{20} mertebesinde) çekirdeğin bölünmesi gerekir.

2.2 1 kg Toryumdan Elde Edilebilecek Enerji (Kuramsal Üst Sınır)

Toryum-232 doğrudan bölünmez (fisil değildir); reaktörde bir nötron yakalayarak U-233'e dönüşür ve ancak bu hâliyle bölünebilir. Aşağıdaki hesap, 1 kg Th-232'nin tümüyle U-233'e dönüştüğü ve ardından tamamen fisyonu uğradığı kuramsal/idealize bir üst sınırı temsil eder; gerçek bir reaktörde dönüşüm ve fisyon oranı bundan düşüktür.

1000 g toryum-232'deki atom sayısı, atom-gram başına olan miktarı, Avogadro sayısı ile çarparak bulunur:

$$N = (1000 / 232) \times 6,022 \times 10^{23}$$

$$N = 4,310 \times 6,022 \times 10^{23} = 2,60 \times 10^{24} \text{ atom}$$

Toplam enerji:

$$E = N \times E_f = (2,60 \times 10^{24}) \times (3,2 \times 10^{-11} \text{ J}) = 8,32 \times 10^{13} \text{ J}$$

kWh cinsinden ($1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$):

$$E = (8,32 \times 10^{13}) / (3,6 \times 10^6) = 2,31 \times 10^7 \text{ kWh} = 23,1 \text{ GWh}$$

Sonuç: 1 kg toryum, tam dönüşüm ve tam fisyon varsayımıyla ≈ 23 GWh ısı enerjisi karşılık gelmektedir.

2.3 Kömür, Petrol ve Doğal Gaz Eşdeğerleri (Toryum)

Taşkömürünün tipik ısı değeri 24 MJ/kg alınarak [7,8]:

$$M = (8,32 \times 10^{13}) / (24 \times 10^6) = 3,47 \times 10^6 \text{ kg} \approx 3470 \text{ ton}$$

Petrolün tipik ısı değeri 42 MJ/kg alınarak:

$$M = (8,32 \times 10^{13}) / (42 \times 10^6) = 1,98 \times 10^6 \text{ kg} \approx 1980 \text{ ton}$$

Doğal gazın tipik ısı değeri 50 MJ/kg alınarak:

$$M = (8,32 \times 10^{13}) / (50 \times 10^6) = 1,66 \times 10^6 \text{ kg} \approx 1660 \text{ ton}$$

Sonuç: 1 kg toryum, kuramsal üst sınır varsayımıyla yaklaşık 3500 ton kömür, 2000 ton petrol veya 1700 ton doğal gaz enerjisine eşdeğerdir.

2.4 1 kg Uranyumdan (U-235) Elde Edilebilecek Enerji

U-235 için benzer hesap doğrudan uygulanır, çünkü U-235 kendisi bölünür (fisildir) ve dönüşüm adımına gerek yoktur:

$$N = (1000 / 235) \times 6,022 \times 10^{23} = 4,255 \times 6,022 \times 10^{23} = 2,56 \times 10^{24} \text{ atom}$$

$$E = (2,56 \times 10^{24}) \times (3,2 \times 10^{-11} \text{ J}) = 8,19 \times 10^{13} \text{ J}$$

$$E = (8,19 \times 10^{13}) / (3,6 \times 10^6) = 2,28 \times 10^7 \text{ kWh} = 22,8 \text{ GWh}$$

Sonuç: 1 kg U-235'in tam fisyonu $\approx 22,8$ GWh ısı enerji açığa çıkarır; bu değer bağımsız kaynaklarla da doğrulanmaktadır [1,4,6].

2.5 Özet Karşılaştırma Tablosu

Parametre	Toryum (Th-232 $\rightarrow$ U-233)	Uranyum (U-235)
1 kg yakıttan ısı enerji (kuramsal üst sınır)	$\approx 23,1$ GWh	$\approx 22,8$ GWh
Kömür karşılığı (24 MJ/kg)	≈ 3470 ton	≈ 3420 ton
Petrol karşılığı (42 MJ/kg)	≈ 1980 ton	≈ 1950 ton
Doğal gaz karşılığı (50 MJ/kg)	≈ 1660 ton	≈ 1640 ton

Not: Bu tablodaki değerler, Th-232'nin tamamının U-233'e dönüştüğü ve elde edilen tüm fisil malzemenin tamamen fisyonu uğradığı idealize bir senaryoyu yansıtır; gerçek reaktörlerde dönüşüm ve yakma oranı (burnup) bundan önemli ölçüde düşüktür (bkz. Bölüm 4 ve 6).

3. 100 MW Elektrik Gücündeki Bir Reaktörün Yıllık Yakıt Gereksinimi

3.1 Yıllık Elektrik Üretimi (Kuramsal Üst Sınır, Kapasite Faktörü = %100)

$$P = 100 \text{ MW, bir yıldaki saat sayısı} = 8760 \text{ saat}$$

$$E = 100 \text{ MW} \times 8760 \text{ h} = 876.000 \text{ MWh} = 876 \text{ GWh}$$

Bu değer, santralin kesintisiz ve sürekli tam güçte çalıştığı kuramsal bir üst sınırdır; gerçekçi değerlendirme Bölüm 6'da ele alınmaktadır.

3.2 Gerekli Termik (Isıl) Enerji

Ergimiş tuz reaktörleri için tipik öngörülen ısı verim $\eta \approx \%45$ alındığında [10]:

$$E_t = 876 / 0,45 = 1947 \text{ GWh(th)}$$

$$E_t = 1947 \times 3,6 \times 10^{12} \text{ J} = 7,01 \times 10^{15} \text{ J}$$

3.3 Gerekli Toryum Miktarı

1 kg toryumun kuramsal enerjisi $8,32 \times 10^{13}$ J olduğundan:

$$M = (7,01 \times 10^{15}) / (8,32 \times 10^{13}) = 84,3 \text{ kg} \approx 88 \text{ kg (yuvarlatılmış kuramsal değer)}$$

Pratikte nötron kaçakları, dönüşüm verimsizlikleri ve yakıt çevrimi kayıpları dikkate alındığında, gerçekte tüketilen (reaktöre yüklenen) yıllık toryum miktarının yaklaşık 100–250 kg aralığında olması beklenir.

Sonuç: 100 MW elektrik üreten bir toryum-MSR reaktörü için yıllık yaklaşık 100–250 kg toryum gerekir.

3.4 Gerekli Uranyum Miktarı

1 kg U-235'in enerjisi $8,19 \times 10^{13}$ J olduğundan:

$$M = (7,01 \times 10^{15}) / (8,19 \times 10^{13}) = 85,6 \text{ kg} \approx 86 \text{ kg (yuvarlatılmış kuramsal değer)}$$

Pratik kayıplar dikkate alındığında gerçekçi tüketimin yaklaşık 100–200 kg/yıl olması beklenir.

Sonuç: 100 MW elektrik üreten bir uranyum reaktöründe yılda yaklaşık 100–200 kg U-235 eşdeğeri fisyonu uğrar.

3.5 1000 MW'lık Bir Reaktör İçin Ek Karşılaştırma

Aynı yöntem doğrusal olarak ölçeklenerek 1000 MW elektrik gücündeki bir reaktöre uygulanabilir; yıllık elektrik üretimi ve buna bağlı yakıt gereksinimi, 100 MW'lık duruma göre yaklaşık 10 katına çıkar:

Parametre	100 MW	1000 MW
Yıllık elektrik üretimi (KF=%100)	876 GWh	8760 GWh
Gerekli ısı enerjisi (η =%45)	1947 GWh(th)	19.470 GWh(th)
Kuramsal yıllık toryum gereksinimi	≈88 kg	≈880 kg
Kuramsal yıllık uranyum (U-235) gereksinimi	≈86 kg	≈860 kg
Gerçekçi yıllık toryum gereksinimi	100–250 kg	1000–2500 kg
Gerçekçi yıllık uranyum (U-235) gereksinimi	100–200 kg	1000–2000 kg

Bu doğrusal ölçekleme, reaktör tipi, yakıt zenginleştirme düzeyi ve verim değerlerinin güç ölçeğiyle birlikte sabit kaldığı varsayımına dayanır; gerçek tasarımlarda bu parametreler güçle birlikte değişebilir.

4. Başlangıç Yakıt Gereksinimi

4.1 Toryum Ergimiş Tuz Reaktörü (MSR)

Toryum tek başına bir zincirleme reaksiyon başlatamaz, çünkü Th-232 fisil değildir; reaktörün ilk kez kritikliğe ulaşması için dışarıdan fisil malzeme ile 'tohumlanması' (seeding) gerekir [5,10,13]. Tipik tasarım çalışmalarında başlangıçta yaklaşık:

- 300–800 kg U-235, veya
- 300–500 kg Pu-239

gerekebileceği öngörülmektedir. Reaktör çalışmaya başladıktan sonra, toryumdan nötron yakalama yoluyla yeni U-233 üretilir ve zamanla yakıt çeviriminin önemli bir kısmı toryum kaynaklı hâle gelebilir (breeding).

4.2 Klasik Uranyum Reaktörü (PWR)

100 MW elektrik gücündeki tipik bir basınçlı su reaktörü için ilk yakıt yüklemeğinde birkaç ton düşük zenginleştirilmiş uranyum gerekir; yaklaşık 5–10 ton, %3–5 oranında zenginleştirilmiş uranyum çekirdeğe yüklenebilir [11].

4.3 Sonuçların Özeti

Parametre	Toryum (Th-232 → U-233)	Uranyum (U-235)
1 kg yakıttan ısı enerji	23 GWh	22,8 GWh
Kömür karşılığı	≈3500 ton	≈3400 ton
Petrol karşılığı	≈2000 ton	≈1950 ton
Doğal gaz karşılığı	≈1700 ton	≈1650 ton
100 MW santralin yıllık üretimi (KF=%100)	876 GWh	876 GWh
Teorik yıllık yakıt ihtiyacı	≈88 kg	≈86 kg
Gerçekçi yıllık tüketim	100–250 kg	100–200 kg
Başlangıç fisil yakıt ihtiyacı	300–800 kg U-235 (veya 300–500 kg Pu-239)	5–10 ton %3–5 zenginleştirilmiş uranyum

4.4 Genel Değerlendirme

Enerji yoğunluğu bakımından toryum ve uranyum neredeyse eşdeğerdir; her iki yakıt da kilogram başına yaklaşık 23 GWh ısı enerji potansiyeline sahiptir. Buna karşın aynı enerjiyi fosil yakıtlardan elde etmek için binlerce ton kömür veya petrol gerekir. Toryumun temel avantajı yer kabuğunda daha bol bulunması ve uygun reaktör tasarımlarında (özellikle MSR) yakıtın daha yüksek oranda kullanılabilmesidir; buna karşın uranyum, günümüzde ticari olarak olgunlaşmış ve dünya çapında yaygın şekilde kullanılan nükleer yakıttır [1,10,11].

5. Cevher Bazlı Hesap: %0,1 Tenörlü 10.000 Ton Cevher Örneği

Bu bölümde, gerçek madencilik koşullarına daha yakın bir senaryo örneklenmektedir: 10.000 ton cevher ve %0,1 (binde bir) tenör varsayılmaktadır. Bu tenör değeri yalnızca örnekleme amaçlıdır; gerçek toryum ve uranyum cevherlerinin tenörü yatak tipine göre önemli ölçüde değişebilir (örn. Türkiye'deki Beylikova yatağında ortalama ThO₂ tenörü ≈788 ppm, yani ≈%0,08'dir) [16].

5.1 Cevherdeki Saf Metal Miktarı

$$M = 10.000 \text{ ton} \times 0,001 = 10 \text{ ton saf metal}$$

Cevher Türü	Cevher Miktarı	Tenör	Saf Metal
Toryum cevheri	10.000 ton	%0,1	10 ton Toryum
Uranyum cevheri	10.000 ton	%0,1	10 ton Uranyum

5.2 Toryum İçin Hesaplama

Bölüm 3'teki sonuçlara göre, 100 MW elektrik gücündeki bir Toryum-MSR reaktörü için yıllık tüketim ideal durumda ≈88 kg/yıl, gerçekçi durumda ≈100–250 kg/yıl olarak alınmıştır. 10 ton toryum = 10.000 kg için:

$$\text{İdeal durum: } 10.000 / 88 = 113,6 \text{ yıl}$$

$$\text{Gerçekçi durum: } 10.000 / 250 = 40 \text{ yıl}$$

Sonuç: 10 ton toryum, yaklaşık 40–114 yıl arasında 100 MW'lık bir reaktörü çalıştırabilecek enerji içerir.

5.3 Uranyum İçin Hesap

A) Tüm uranyumun kullanılabildiği durum (hızlı üretken reaktör veya ileri yakıt çevrimi)

10 ton = 10.000 kg, yıllık tüketim 100–200 kg alındığında:

$$10.000 / 100 = 100 \text{ yıl}; \quad 10.000 / 200 = 50 \text{ yıl}$$

Sonuç: 50–100 yıl.

B) Doğal uranyumun doğrudan kullanıldığı durum

Doğal uranyumdaki U-235 oranı %0,72'dir [1]. 10 ton doğal uranyum içindeki U-235 miktarı:

$$10 \times 0,0072 = 0,072 \text{ ton} = 72 \text{ kg}$$

100 MW reaktörde yıllık tüketim $\approx$ 100 kg U-235 alındığında:

$$72 / 100 = 0,72 \text{ yıl} \approx 8,6 \text{ ay}$$

Sonuç: Yaklaşık 9 ay.

Not: Bu B seçeneği, zenginleştirme işlemini ve işletme sırasında U-238'den oluşan Pu-239'un fisyonu katkısını dikkate almayan aşırı basitleştirilmiş bir hesaptır; yalnızca ölçek farkını göstermek amacıyla verilmiştir. Gerçek hafif su reaktörlerinde yakıt, doğal değil, tipik olarak %3–5 zenginleştirilmiş uranyum olarak kullanılır ve Pu-239'un fisyonu katkısı toplam enerjinin önemli bir bölümünü oluşturabilir [1,11].

5.4 Enerji İçeriği Karşılaştırması

$$10 \text{ ton Toryum: } 10.000 \times 23 \text{ GWh} = 230.000 \text{ GWh} = 230 \text{ TWh}$$

$$10 \text{ ton U-235: } 10.000 \times 22,8 \text{ GWh} = 228.000 \text{ GWh} = 228 \text{ TWh}$$

100 MW santral yılda 876 GWh ürettiğinden:

$$230.000 / 876 \approx 262 \text{ yıl (kuramsal üst sınır)}$$

Bu, kuramsal üst sınırdır. Gerçek sistemlerde nötron kayıpları, yeniden işleme kayıpları ve işletme verimleri nedeniyle bu enerjinin yalnızca bir kısmı fiilen kullanılabilir.

5.5 Özet Tablo

Başlık	Toryum (%0,1 tenör)	Uranyum (%0,1 tenör, tümü kullanılabilir)	Doğal Uranyum (%0,72 U-235)
Cevher miktarı	10.000 ton	10.000 ton	10.000 ton
Tenör	%0,1	%0,1	%0,1
Saf metal miktarı	10 ton	10 ton	10 ton
Yıllık yakıt tüketimi	100–250 kg	100–200 kg	$\approx$ 100 kg U-235
Reaktör gücü	100 MW	100 MW	100 MW
Çalışma süresi	40–114 yıl	50–100 yıl	$\approx$ 0,7 yıl ($\approx$ 9 ay)
Toplam teorik enerji	230 TWh	228 TWh	Aynı büyüklükte
Kömür eşdeğeri	$\approx$ 35 milyon ton	$\approx$ 34 milyon ton	$\approx$ 34 milyon ton

5.6 Sonuç

10.000 ton %0,1 tenörlü toryum cevherinden elde edilen yaklaşık 10 ton toryum, uygun bir ergimiş tuz reaktöründe 100 MW'lık bir santrali yaklaşık 40–114 yıl çalıştırabilecek enerji içerir. 10.000 ton %0,1 tenörlü uranyum cevheri de, eğer hızlı üretken reaktör teknolojileri kullanılırsa benzer şekilde yaklaşık 50–100 yıl enerji sağlayabilir. Ancak günümüzde yaygın kullanılan termal reaktörlerde uranyumun yalnızca küçük bir kısmı (esas olarak U-235 bileşeni) değerlendirildiğinden, doğal uranyumun zenginleştirme yapılmadan doğrudan kullanılması durumunda fiili kullanım süresi çok daha düşük olur (Bölüm 5.3B).

6. Önemli Ek: Kapasite Faktörü Düzeltmesi

Yukarıdaki tüm hesaplar, reaktörün yıl boyunca kesintisiz ve tam güçte çalıştığı (kapasite faktörü %100) varsayımına dayanmaktadır. Gerçekte hiçbir santral bu düzeyde sürekli çalışmaz; planlı bakım, yakıt değişimi durmaları ve plansız kesintiler nedeniyle gerçek kapasite faktörü daha düşüktür. IAEA'nın Güç Reaktörü Bilgi Sistemi (PRIS) verilerine göre dünya genelindeki ticari reaktörlerin ortalama kapasite faktörü 2023 yılında %88, 2019 yılında %85,9 olarak kayda geçmiştir [11,12]; World Nuclear Association'ın 2025 performans çalışmasına göre ise 2024 yılı küresel ortalama kapasite faktörü %83'tür ve reaktörlerin %60'ından fazlası %80'in üzerinde bir kapasite faktörüyle çalışmıştır [9].

Bu düzeltme dikkate alındığında, %85 tipik bir kapasite faktörü kullanılarak 100 MW'lık bir reaktörün gerçekçi yıllık elektrik üretimi:

$$E_{\text{gerçekçi}} = 876 \text{ GWh} \times 0,85 \approx 745 \text{ GWh}$$

olarak hesaplanır; bu da Bölüm 3'te verilen 'gerçekçi yıllık yakıt tüketimi' (100–250 kg toryum / 100–200 kg uranyum) aralıklarının üst sınırına yakın bir değere karşılık gelmekte ve çalışmada zaten öngörülen pratik kayıp payının bir kısmının kapasite faktöründen kaynaklandığını göstermektedir. Diğer bir deyişle, çalışmanın önceki bölümlerinde verilen 'ideal' ve 'gerçekçi' tüketim aralıkları arasındaki fark, sadece nötron/yeniden işleme kayıplarını değil, aynı zamanda santralin sürekli tam güçte çalışmamasını da kapsayan birleşik bir düzeltmedir.

7. Genel Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada yapılan temel fizik hesapları, toryum-232/uranyum-233 ve uranyum-235 yakıt çevrimlerinin kütle başına ısı enerjisi yoğunluğunun ($\approx 22\text{--}23 \text{ GWh/kg}$) birbirine çok yakın olduğunu ve her ikisinin de fosil yakıtlardan (kömür, petrol, doğal gaz) milyonlarca kat daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olduğunu doğrulamaktadır. 100 MW elektrik gücündeki bir reaktörün yıllık işletimi için gereken yakıt miktarı, kuramsal üst sınırdan yalnızca 85–90 kg düzeyindedir; gerçekçi işletme koşullarında (yakıt çevrimi kayıpları ve kapasite faktörü dahil) bu değer 100–250 kg aralığına yükselmektedir.

Toryum çevriminin temel dezavantajı, Th-232'nin kendisinin fisil olmayışı nedeniyle bir reaktörün ilk kez işletmeye alınabilmesi için 300–800 kg düzeyinde dışarıdan fisil malzemeye (U-235 veya Pu-239)

ihtiyaç duymasıdır; bu da toryum çevrimini, klasik uranyum çevriminden bağımsız değil, ona tamamlayıcı bir teknoloji konumuna yerleştirmektedir. Buna karşılık toryumun yer kabuğunda daha bol bulunması, Türkiye gibi önemli toryum kaynaklarına sahip ülkeler için uzun vadeli bir stratejik seçenek oluşturmaktadır; ancak bu potansiyelin değerlendirilebilmesi, ticari ölçekte kanıtlanmış bir toryum reaktör teknolojisinin (örn. MSR) geliştirilmesine bağlıdır [10,13,16].

Sonuç olarak, enerji yoğunluğu açısından toryum ve uranyum birbirine yakın performans gösterse de, aralarındaki temel fark yakıt çevriminin başlatılma biçiminde, atık özelliklerinde ve mevcut reaktör teknolojilerinin ticari olgunluk düzeyinde ortaya çıkmaktadır.

7.1 Hesapların Sınırlılıkları (Önemli Uyarı)

- Tüm hesaplar, fisil malzemenin %100 oranında fisyonu uğradığı idealize bir varsayıma dayanır; gerçek reaktörlerde yakma oranı (burnup) bu düzeyin oldukça altındadır.
- Toryumun U-233'e dönüşüm verimi %100 alınmıştır; gerçekte nötron ekonomisi, reaktör tasarımına bağlı olarak bu oranı düşürür.
- Kapasite faktörü, Bölüm 6 dışında %100 alınmıştır; gerçek değer %80–90 aralığındadır.
- Cevher tenörü (%0,1) gerçek yataklardaki değerlerden farklı olabilir; örneğin Türkiye'deki Beylikova yatağında ortalama ThO₂ tenörü ≈%0,08'dir.
- Doğal uranyum hesabında (Bölüm 5.3B) zenginleştirme ve Pu-239 üretimi/katkısı dikkate alınmamıştır; bu nedenle bu alt bölüm yalnızca ölçek gösterimi amaçlıdır.

Bu sınırlılıklar nedeniyle çalışmada sunulan sayısal değerler, kesin işletme tahminleri olarak değil, büyüklük mertebesi (order-of-magnitude) karşılaştırmaları olarak değerlendirilmelidir.

Kaynakça

- [1] World Nuclear Association, "Physics of Uranium and Nuclear Energy," world-nuclear.org, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/physics-of-nuclear-energy> (erişim: 2026).
- [2] World Nuclear Association, "Nuclear Fusion Power," world-nuclear.org, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power> (erişim: 2026).
- [3] Wikipedia, "Uranium-235," <https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium-235> (erişim: 2026).
- [4] L. Ripani, "Energy from Nuclear Fission," Joint EPS-SIF International School on Energy, 2021, <https://static.sif.it/SIF/resources/public/files/energy2021/Ripani.pdf>.
- [5] World Nuclear Association, "Plutonium," world-nuclear.org, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium> (erişim: 2026).
- [6] ScienceDirect Topics, "Uranium 235 - an overview," <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/uranium-235> (erişim: 2026).
- [7] U.S. Energy Information Administration, fosil yakıtların tipik ısı değerleri (kömür ≈24 MJ/kg, petrol ≈42 MJ/kg, doğal gaz ≈50 MJ/kg), eia.gov.
- [8] International Energy Agency (IEA), fosil yakıt enerji içeriği referans tabloları, [iea.org](https://www.iea.org).
- [9] World Nuclear Association, "World Nuclear Performance Report 2025 - Global Nuclear Industry Performance," <https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/global-nuclear-industry-performance> (erişim: 2026).
- [10] U.S. NRC / IAEA, Ergimiş Tuz Reaktörleri (MSR) teknolojisi ve tipik ısı verim değerleri üzerine genel teknik literatür.

- [11] International Atomic Energy Agency (IAEA), "IAEA Releases Nuclear Power Data and Operating Experience for 2023," <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-nuclear-power-data-and-operating-experience-for-2023> (erişim: 2026).
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA), "IAEA Releases 2019 Data on Nuclear Power Plants Operating Experience," <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-2019-data-on-nuclear-power-plants-operating-experience> (erişim: 2026).
- [13] Genel nükleer m hendislik literat r , ergimiş tuz reaktörü yakıt çevrimi ve  evrim-i i yeniden işleme prensipleri üzerine teknik incelemeler.
- [14] World Population Review, "Thorium Reserves by Country 2026," <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/thorium-reserves-by-country> (erişim: 2026); kaynak: IAEA, "World Thorium Occurrences, Deposits and Resources."
- [15] ExpatGuideTurkey, "OECD Nuclear Energy Announced: Turkey Ranks Second," <https://expatguideturkey.com/oecd-nuclear-energy-announced-turkey-ranks-second/> (erişim: 2026); kaynak: OECD-NEA ve IAEA verileri.
- [16] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Doğal Kaynaklar Bakanlığı, "Toryum," <https://enerji.gov.tr/info-banknatural-resourcesthorium> (erişim: 2026).
- [17] Anadolu Ajansı, "Türkiye uncovers world's second-largest rare earth element reserve," <https://www.aa.com.tr/en/energy/turkey/turkiye-uncovers-worlds-second-largest-rare-earth-element-reserve/35729> (erişim: 2026).
- [18] Energy Industry Review, "World's Second Largest Rare Earth Element Reserve," <https://energyindustryreview.com/metals-mining/worlds-second-largest-rare-earth-element-reserve/> (erişim: 2026).
- **Bu konuyla ilgili yazılarımız:**
 - <https://www.radyasyonyatakan.com/yazi/yeraltindaki-sakli-enerjiler-toryum-reaktorlerde-kullanilir-duruma-getirilmeli-yz-y-atakan-03-06-202>
 - <https://www.radyasyonyatakan.com/yazi/dunya-toryum-rezervleri-ve-reaktorleri-guncel-durum-yz-y-atakan-02-06-2026>
 - **ÇETİN ERTEK:** <https://www.radyasyonyatakan.com/yazi/neden-toryum-ergimis-tuz-reaktoru-turkiye-ye-uygun-doc-dr-cetin-ertek-20-06-2026>