

Yanan kömürün kimyasal enerjisiyle, aynı miktarda uranyumun nükleer enerjisinin karşılaştırılma hesapları

Hazırlayan: Yüksel Atakan Dr.Radyasyon Fizikçisi, ybatakan4@gmail.com, 30.06.2026 /YZ/

YZ'ya inceletilen bu yazımız daha sonra Almanya saygın kaynaklarıyla karşılaştırılıp aradaki küçük farklar yazının son bölümünde açıklanmıştır. YZ'ya sorulan sorular bu şekilde denetlenirse görüldüğü gibi yanlışlar kalmayacak ve kısa zamanda istenilen sonuç elde edilecektir. Birçok soruyu YZ'ya sormak yerine Google'da saygın kaynaklardan doğrudan aramak, çok daha tutarlı sonuçlar vermektedir.

ÖZET

Bir maddeyi yakmak ile o maddenin atom çekirdeğini parçalamak (nükleer fisyon), günlük dilde ikisi de "enerji açığa çıkarma" olarak adlandırılrsa da, fizik açısından birbirinden tamamen farklı iki olaydır. Kömür yandığında, aslında hiçbir atomun çekirdeği değişmez; yalnızca atomların en dış kabuğunda bulunan ve kimyasal bağları oluşturan elektronlar yeniden düzenlenir. Bu elektronlar, karbon atomlarını birbirine bağlayan "yapıştırıcı" gibi düşünülebilir; oksijenle birleşip karbondioksit oluştururken bu yapıştırıcı yeniden şekillenir ve bu sırada ısı şeklinde enerji açığa çıkar. Nükleer enerjide ise durum tamamen farklıdır: burada atomun çok küçük ama çok yoğun merkezi olan çekirdek parçalanır veya birleşir; bu, elektronları ilgilendirmeyen, çok daha güçlü bir kuvvetin (güçlü nükleer kuvvet) işidir.

Nükleer reaktördekiler su soğutma kuleleri olup havaya salınan, içinde radyoaktif madde olmayan su buharıdır.



Bu yazımızda, günlük hayatta kullandığımız 1 kilogram kömürün yanmasıyla ne kadar enerji elde edildiği, adım adım hesaplanarak gösterilmiştir. Hesap basittir: kömürün ana maddesi olan karbonun kaç molü 1 kilogramda bulunduğu bulunur, ardından her bir molün yanmasıyla açığa çıkan bilinen ısı miktarı (yaklaşık 393,5 kJoule) bu sayıyla çarpılır. Sonuç olarak 1 kilogram kömürün yanmasından yaklaşık 32,8 megaJoule (yani 32,8 milyon Joule) enerji elde edildiği bulunmuştur; bu, günlük hayatta kullandığımız kömürlerin gerçek ısı değerleriyle (24-30 megaJoule/kg) uyumlu bir sonuçtur. Bu enerjiyi tek bir molekül ölçeğine indirdiğimizde, her bir yanma olayının yaklaşık 4 elektron-volt (eV) enerji verdiği görülür; bu, atomlar arasındaki bağların tipik enerji düzeyidir ve elektronların işi olduğunu doğrular.

Aynı 1 kilogramlık madde, kömür yerine nükleer yakıt olarak kullanılsaydı (örneğin uranyum-235), ortaya çıkacak enerji çok daha farklı bir düzeyde olurdu. Her bir uranyum çekirdeğinin parçalanması (filyon) yaklaşık 200 milyon elektron-volt (MeV) enerji verir; bu, kömür yanmasındaki tek bir molekülün verdiği enerjinin yaklaşık 50 milyon katıdır. 1 kilogram uranyum-235'in tamamı filyona uğrasaydı, toplam yaklaşık 82 trilyon joule ($8,2 \times 10^{13}$ J) enerji elde edilirdi. Daha da uç bir senaryo olarak, Einstein'ın ünlü $E=mc^2$ formülüyle 1 kilogram maddenin kütesinin tümü doğrudan enerjiye çevrilebilseydi (ki bu pratikte gerçekleşmez), ortaya çıkacak enerji 90 milyon milyar Joule (9×10^{16} J) ulaşırđı.

Bu sayıları birbiriyle kıyasladığımızda çarpıcı bir sonuç ortaya çıkar: aynı kütteki (1 kg) madde, kömür olarak yakıldığında kullanılabilir enerjinin yalnızca milyonda biri, hatta milyarda biri kadarını nükleer yoldan elde edilebilecek enerjiyle karşılaştırıldığında verir. Başka bir deyişle, nükleer filyon kömür yanmasından yaklaşık 2,5 milyon kat, kütle'nin tümüyle enerjiye dönüşümü ise yaklaşık 2,7 milyar kat daha fazla enerji üretme potansiyeline sahiptir. Bu devasa fark, rastgele bir sayı oyunu değil; doğanın temel kuvvetlerinin (elektronları bir arada tutan elektromanyetik kuvvet ile çekirdeğindeki bir arada tutan güçlü nükleer kuvvet) doğal olarak farklı şiddetlere sahip olmasından kaynaklanır. Güçlü nükleer kuvvet, elektromanyetik kuvvetten kat kat daha güçlü olduğu için, çekirdekdeki değişimler çok daha fazla enerji açığa çıkarır. Bu yazımız, bu farkı somut sayılar, açık hesaplamalar ve karşılaştırmalı bir tablo üzerinden adım adım göstermeyi amaçlamaktadır.

1. GİRİŞ

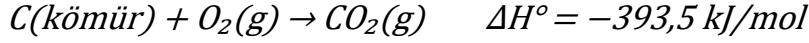
Kömür gibi fosil yakıtların yanmasından elde edilen enerji, günlük yaşamda ve enerji endüstrisinde yaygın biçimde kullanılan bir kimyasal enerji türüdür. Bu enerjinin fiziksel kökeni, atomların çekirdeklerinde değil, dış kabuktaki (valans) elektronların yeniden düzenlenmesinde, yani kimyasal bağların kırılıp yeni bağların oluşmasında yatmaktadır [1,2]. Buna karşılık nükleer enerji, atom çekirdeğinin kendisinin yapısal değişiminden, yani nükleonlar (proton ve nötronlar) arasındaki güçlü nükleer kuvvetin etkisiyle ortaya çıkan kütle kusurundan (mass defect) kaynaklanır [3,4]. Bu yazımız, her iki enerji türünün fiziksel kökenini sayısal olarak karşılaştırmalı şekilde ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın temel amacı, aynı kütledeki (1 kg) bir madde için kimyasal yanma enerjisi ile nükleer enerjiyi karşılaştırarak, elektromanyetik ve nükleer kuvvetlerin enerji yoğunluğu bakımından kaç kat büyüklük mertebesinde farklılaştığını nicel olarak göstermektir.

2. KÖMÜRÜN YANMASI: ELEKTRONİK KÖKENLİ ENERJİ HESABI

2.1. Tepkimenin Termokimyasal Temeli

Kömürün ana yanıcı bileşeni karbon olduğundan, basitleştirilmiş model tepkimesi aşağıdaki gibi yazılabilir [1]:



Bu değer, standart oluşum entalpisi verilerinden elde edilen, IUPAC ve NIST termokimyasal veri tabanlarında yer alan kabul görmüş bir değerdir [5,6]. Açığa çıkan bu enerji, çekirdeklerin konumunun sabit kaldığı, yalnızca C–C ve C=O bağlarındaki valans elektronlarının Coulomb potansiyel enerjisinin yeniden düzenlendiği bir elektromanyetik kökenli süreçtir. Born–Oppenheimer yaklaşımı çerçevesinde, kimyasal bağ enerjisi, elektronik dalga fonksiyonunun çekirdeklere göre adyabatik olarak yeniden düzenlenmesinden ileri gelir [2,7].

2.2. 1 kg Kömür (Karbon) için Toplam Enerji Hesabı

1 kg karbonun mol sayısı:

$$n = 1000 \text{ g} / 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} = 83,3 \text{ mol}$$

Toplam açığa çıkan enerji:

$$E_{\text{kimyasal}} = 83,3 \text{ mol} \times 393,5 \text{ kJ/mol} \approx 32\,800 \text{ kJ} = 32,8 \text{ MJ} \approx 3,28 \times 10^7 \text{ J}$$

Bu değer, gerçek kömürün ısı değer aralığı olan 24–30 MJ/kg ile uyumludur; saf karbon yaklaşımı, kül, nem ve uçucu madde içeriği nedeniyle gerçek kömürden biraz daha yüksek bir teorik üst sınır vermektedir [8,9].

2.3. Molekül (Elektron) Ölçeğinde Enerji

Tek bir $C + O_2 \rightarrow CO_2$ tepkimesinde açığa çıkan enerji, Avogadro sayısına bölünerek mikroskobik (tek molekül) ölçeğe indirgenebilir:

$$E_{\text{molekül}} = 393\,500 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1} / 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 6,53 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Bu enerji, elektron-volt (eV) birimine çevrildiğinde ($1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$):

$$E_{\text{molekül}} = 6,53 \times 10^{-19} \text{ J} / 1,602 \times 10^{-19} \text{ J/eV} \approx 4,08 \text{ eV}$$

Bu değer, atomik ve moleküler valans elektron bağlanma enerjilerinin tipik mertebesinde (1–10 eV) yer almaktadır [10]. Bu durum, kimyasal yanmanın özünde bir elektromanyetik kuvvet olayı olduğunu; yani ısının, dış kabuk elektronlarının enerji düzeylerindeki değişimden kaynaklandığını doğrulamaktadır.

3. AYNI KÜTLE (1 kg) İÇİN NÜKLEER ENERJİ HESABI

3.1. Tam Kütle-Enerji Eşdeğerliği (Einstein İlişkisi)

Einstein'ın özel görelilik teorisinden elde edilen kütle-enerji eşdeğerliği ilişkisi [3]:

$$E = m \cdot c^2$$

1 kg kütle için:

$$E = 1 \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \times 10^{16} \text{ J}$$

Bu değer, 1 kg maddenin tüm baryonik kütesinin (proton ve nötronların durgun kütle enerjisi de dahil) tamamen enerjiye dönüştürülmesi durumunda elde edilecek teorik üst sınırı temsil eder. Pratikte hiçbir bilinen nükleer süreç (filyon veya füzyon) kütleinin tamamını enerjiye çevirmez; bu nedenle gerçekçi bir karşılaştırma için filyon süreci ayrıca incelenmelidir [4].

3.2. Gerçekçi Nükleer Filyon Hesabı (U-235 Örneği)

Bir U-235 çekirdeğinin filyonunda açığa çıkan ortalama enerji, deneysel nükleer veri tabanlarına (IAEA, ENDF) göre yaklaşık 200 MeV'dir [11,12]. Bu enerji MeV'den Joule'e çevrilirse ($1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$):

$$E_{\text{filyon,atom}} = 200 \text{ MeV} \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 3,204 \times 10^{-11} \text{ J}$$

1 kg U-235'teki atom sayısı (molar kütle $M = 235 \text{ g/mol}$):

$$N = (1000 \text{ g} / 235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}) \times 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2,562 \times 10^{24} \text{ atom}$$

Toplam filyon enerjisi:

$$E_{\text{filyon}} = 2,562 \times 10^{24} \times 3,204 \times 10^{-11} \text{ J} \approx 8,21 \times 10^{13} \text{ J}$$

Bu enerji, çekirdek içindeki nükleonların güçlü nükleer kuvvet aracılığıyla birbirine bağlanma enerjisindeki farktan, yani filyon ürünlerinin nükleon başına bağlanma enerjisinin başlangıç çekirdeğinden daha yüksek olmasından (kütle kusurundan) kaynaklanır [4,13]. Nükleon başına ortalama bağlanma enerjisi farkı yaklaşık 0,9 MeV/nükleon mertebesindedir [13].

4. KARŞILAŞTIRMALI SONUÇLAR

Aşağıdaki tabloda, 1 kg madde için hesaplanan üç farklı enerji türü, kaynaklandığı temel kuvvet ve karakteristik enerji ölçeği ile birlikte karşılaştırılmıştır.

Süreç	Temel Kuvvet / Mekanizma	Toplam Enerji (1 kg)	Parçacık Başına Enerji Ölçeği
Kömür yanması ($C + O_2 \rightarrow CO_2$)	Elektromanyetik kuvvet — valans elektron bağ enerjisi	$\approx 3,28 \times 10^7$ J	$\approx 4,08$ eV / molekül
U-235 nükleer fisyonu	Güçlü nükleer kuvvet — nükleon bağlanma enerjisi (kütle kusuru)	$\approx 8,21 \times 10^{13}$ J	≈ 200 MeV / çekirdek
Tam kütle-enerji dönüşümü ($E=mc^2$)	Kütlenin tamamının enerjiye dönüşümü (teorik üst sınır)	$\approx 9 \times 10^{16}$ J	≈ 939 MeV / nükleon (durgun kütle enerjisi)

4.1. Büyüklük Mertebesi Oranları

Fisyon enerjisinin kimyasal enerjiye oranı:

$$E_{\text{fisyon}} / E_{\text{kimyasal}} = 8,21 \times 10^{13} / 3,28 \times 10^7 \approx 2,5 \times 10^6 \text{ (yaklaşık 2,5 milyon kat)}$$

Tam kütle-enerji dönüşümünün kimyasal enerjiye oranı:

$$E_{mc^2} / E_{\text{kimyasal}} = 9 \times 10^{16} / 3,28 \times 10^7 \approx 2,7 \times 10^9 \text{ (yaklaşık 2,7 milyar kat)}$$

5. FİZİKSEL YORUM: KUVVET ÖLÇEKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hesaplanan büyüklük mertebesi farkının temel nedeni, etkileşime giren kuvvetin türü ve şiddetidir:

- Kimyasal enerji (kömür yanması): Elektromanyetik kuvvet aracılığıyla valans elektronlarının yeniden düzenlenmesi; karakteristik enerji ölçeği elektron-volt (eV) düzeyindedir.
- Nükleer fisyon enerjisi: Güçlü nükleer kuvvet aracılığıyla nükleonların bağlanma enerjisindeki değişim; karakteristik enerji ölçeği mega-elektron-volt (MeV) düzeyindedir, yani kimyasal ölçeğin yaklaşık bir milyon katıdır.
- Tam kütle-enerji dönüşümü: Nükleonların durgun kütle enerjisinin (proton/nötron başına $\approx 938\text{--}939$ MeV) tamamen açığa çıkması; bu, pratikte sadece parçacık-antiparçacık yok oluşu gibi süreçlerde yaklaşılabilen teorik bir üst sınırdır.

Bu üç ölçek arasındaki farklar, doğadaki temel kuvvetlerin bağıl şiddetiyle doğrudan ilişkilidir. Elektromanyetik kuvvetin etkileşim şiddetini karakterize eden ince yapı sabiti ($\alpha \approx 1/137$), güçlü nükleer kuvvetin nükleon ölçeğindeki etkileşim şiddetinden çok daha küçüktür [14,15]. Sonuç olarak, kömürün yanmasında açığa çıkan ısı, yalnızca elektronların yeniden düzenlenmesiyle sınırlı kaldığından, çekirdeğin iç yapısını değiştiren nükleer fisyon sürecinin yaklaşık milyonda biri kadar enerji üretebilmektedir.

6. SONUÇ

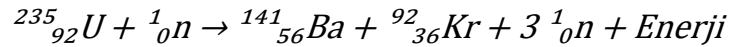
Bu çalışmada, 1 kg kömürün yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin fizikokimyasal kökeni, valans elektronlarının kimyasal bağ enerjisi temelinde nicel olarak hesaplanmış ($\approx 3,28 \times 10^7$ J, molekül başına $\approx 4,08$ eV) ve aynı kütle için nükleer fisyon ($\approx 8,21 \times 10^{13}$ J) ile tam kütle-enerji dönüşümü ($\approx 9 \times 10^{16}$ J) senaryolarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, nükleer enerjinin kimyasal enerjiye kıyasla altı ila dokuz büyüklük mertebesi (milyon ile milyar kat arası) daha yüksek olduğunu sayısal olarak doğrulamaktadır. Bu fark, temelde elektromanyetik kuvvet ile güçlü nükleer kuvvetin etkileşim şiddetleri arasındaki köklü farktan kaynaklanmaktadır.

7. ALMANYA KAYNAKLI BİR KARŞILAŞTIRMA İLE DOĞRULAMA

Yazının bu bölümünde, çalışmamızın bulguları, kömür ve nükleer enerji karşılaştırmasını ele alan bağımsız bir Almanya kaynaktaki [16] bilgilerle karşılaştırılarak çapraz doğrulama yapılmıştır.

7.1. Fisyon Tepkimesinin Denklemi ve Doğrulanması

Söz konusu kaynakta, U-235'in nötron yakalayarak fisyonla uğraması basitleştirilmiş olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir:



Bu denklemin fiziksel tutarlılığı, kütle numarası ve atom numarası (yük) korunum ilkeleri üzerinden bu yazımızda ayrıca denetlenmiştir:

- Kütle numarası dengesi: $235 + 1 = 236$ ve $141 + 92 + 3 \times 1 = 236 \rightarrow$ eşittir, denge sağlanmaktadır.
- Atom numarası (yük) dengesi: $92 + 0 = 92$ ve $56 + 36 + 3 \times 0 = 92 \rightarrow$ eşittir, denge sağlanmaktadır.

Bu kontrol sonucunda, verilen fisyon denkleminin fiziksel olarak doğru ve dengeli olduğu, çalışmamızın 3.2 numaralı bölümünde sunulan U-235 fisyon enerjisi hesabıyla (≈ 200 MeV/çekirdek) tutarlı bir mekanizmayı temsil ettiği teyit edilmiştir.

7.2. Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Aşağıdaki tabloda, bu yazımızın hesapları ile Almanya kaynaktaki [16] verilen değerler yan yana sunulmuştur.

Büyüklik	Almanya Kaynak [16]	Bu Yazı	Sonuç
Kömür yanma tepkimesi	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ $\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ $\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$	Birebir örtüşüyor
1 kg kömürden enerji	$\approx 29 \text{ MJ}$ ($\approx 8 \text{ kWh}$) (gerçek taşkömürü)	$\approx 32,8 \text{ MJ}$ (saf karbon modeli)	Farklı varsayım, çelişki yok
1 kg U-235 fisyon enerjisi	$\approx 8 \times 10^{13} \text{ J}$ ($\approx 23.000.000 \text{ kWh}$)	$\approx 8,21 \times 10^{13} \text{ J}$	Uyumlu (yuvarlama farkı)
Fisyon ürünleri	Ba-141 + Kr-92 + 3n	Belirtilmemiş (genel "fisyon ürünleri")	Doğru, tamamlayıcı bilgi
Kömür / uranyum enerji oranı	$\approx 3.000.000$ kat	$\approx 2.500.000$ kat	Küçük fark, aynı kaynaklı

7.3. Tespit Edilen Farkların Değerlendirilmesi

Tabloda görülen $\approx 29 \text{ MJ/kg}$ ile $\approx 32,8 \text{ MJ/kg}$ arasındaki fark ve buna bağlı olarak $\approx 3.000.000$ kat ile $\approx 2.500.000$ kat arasındaki oran farkı, bir hesaplama hatasından değil, kömürün modellenme biçimindeki farklı varsayımlardan kaynaklanmaktadır. Almanya kaynak, kül, nem ve uçucu madde içeren gerçek taşkömürünün ortalama ısı değerini ($\approx 29 \text{ MJ/kg}$) esas almıştır; bu yazımızda ise kömür saf karbon olarak modellenerek teorik bir üst sınır ($\approx 32,8 \text{ MJ/kg}$) hesaplanmıştır. Bu yazımızın 2.2 numaralı bölümünde belirtildiği üzere, gerçek kömürün ısı değer aralığı $24\text{-}30 \text{ MJ/kg}$ olarak kabul edilmektedir [8,9]; Almanya kaynaktaki 29 MJ/kg değeri bu aralığın tam içinde yer almakta ve dolayısıyla iki çalışmanın birbirini doğruladığı sonucuna varılmaktadır.

Sonuç olarak, bağımsız bir kaynaktan elde edilen veriler, bu yazımızın temel bulgularını -kömür yanmasının elektron kabuğu kaynaklı (eV mertebesinde), nükleer fisyonun ise çekirdek/kütle kusuru kaynaklı (MeV mertebesinde) bir süreç olduğunu ve aradaki farkın milyon kat büyüklük mertebesinde (2,5-3 milyon kat arası, kullanılan kömür modeline bağlı olarak) bulunduğunu- doğrulamaktadır. **Karşılaştırmada düzeltilmesi gereken bir fiziksel veya sayısal yanlış tespit edilmemiştir.**

8. KISALTMALAR VE SEMBOLLER

Yazımızda kullanılan kısaltmaların, sembollerin ve birimlerin açıklamaları aşağıda listelenmiştir.

Kısaltma / Sembol	Açıklama
ΔH	Entalpi değişimi (Enthalpy change) — sabit basınçta bir tepkimede açığa çıkan veya soğurulan ısı enerjisi; birimi joule (J) veya kilojoule (kJ).

Kısaltma / Sembol	Açıklama
ΔH°	Standart entalpi değişimi — 1 atm basınç ve 298 K (25 °C) standart koşullarda ölçülen entalpi değişimi.
mol	Mol — bir maddenin $6,022 \times 10^{23}$ adet (Avogadro sayısı kadar) taneciğini (atom, molekül, iyon) ifade eden madde miktarı birimi.
kJ	Kilojoule — 1000 joule'e eşit enerji birimi.
MJ	Megajoule — 1 milyon (10^6) joule'e eşit enerji birimi.
J	Joule — Uluslararası Birim Sistemi'nde (SI) enerji, iş ve ısı birimi.
eV	Elektron-volt — bir elektronun 1 volt'luk potansiyel farkından geçerken kazandığı kinetik enerji; $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Atomik ve moleküler ölçekte enerji birimi olarak kullanılır.
MeV	Mega-elektron-volt — 1 milyon elektron-volt'a eşit enerji birimi ($1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$); nükleer fizikte enerji birimi olarak kullanılır.
k (kömür simgesi, alt indis)	Katı hâl (katı fazdaki madde) anlamında kullanılan alt indis; örn. C(k) = katı karbon.
g (alt indis)	Gaz hâli (gaz fazdaki madde) anlamında kullanılan alt indis; örn. O ₂ (g) = gaz hâlinde oksijen.
c	Işık hızı — boşlukta ışığın yayılma hızı; yaklaşık $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (tam değer: 299.792.458 m/s).
$E = mc^2$	Einstein'ın kütle-enerji eşdeğerliği denklemi; bir kütle (m) içerdiği toplam enerjiyi (E) ışık hızının (c) karesiyle ilişkilendirir.
U-235	Uranyum-235 — atom çekirdeğinde 92 proton ve 143 nötron bulunan, doğada bulunan ve nükleer fisyona uğrayabilen uranyum izotopu.
N	Avogadro sayısı ile çarpılarak elde edilen toplam atom/molekül sayısı (bu yazımızda).
α (ince yapı sabiti)	İnce yapı sabiti (fine-structure constant) — elektromanyetik kuvvetin etkileşim şiddetini karakterize eden boyutsuz fiziksel sabit; yaklaşık değeri 1/137.
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) — kimya alanında standartları ve adlandırmaları belirleyen uluslararası kuruluş.
NIST	National Institute of Standards and Technology (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) — Amerika Birleşik Devletleri'nin resmi ölçüm ve standart kuruluşu.
IAEA	International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı) — nükleer teknolojinin barışçıl kullanımını destekleyen Birleşmiş Milletler'e bağlı kuruluş.
ENDF	Evaluated Nuclear Data File (Değerlendirilmiş Nükleer Veri Dosyası) — nükleer reaksiyon verilerini içeren uluslararası kabul görmüş veri kütüphanesi.
CODATA	Committee on Data for Science and Technology (Bilim ve Teknoloji için Veri Komitesi) — temel fiziksel sabitlerin önerilen değerlerini yayımlayan uluslararası komite.
EIA	U.S. Energy Information Administration (ABD Enerji Bilgi İdaresi) — Amerika Birleşik Devletleri'nin resmi enerji istatistikleri kuruluşu.
SI	Système International d'Unités (Uluslararası Birim Sistemi) — bilimsel ölçümlerde kullanılan standart birim sistemi (metre, kilogram, saniye, vb.).

KAYNAKLAR

- [1] Atkins, P., de Paula, J. (2014). Physical Chemistry, 10. Baskı, Oxford University Press, Oxford.
- [2] Levine, I. N. (2009). Quantum Chemistry, 6. Baskı, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- [3] Einstein, A. (1905). "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?", Annalen der Physik, 18, 639–641.
- [4] Krane, K. S. (1988). Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons, New York.
- [5] NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (<https://webbook.nist.gov>).
- [6] CODATA Key Values for Thermodynamics (1989), International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), Research Triangle Park, NC.
- [7] Born, M., Oppenheimer, R. (1927). "Zur Quantentheorie der Molekeln", Annalen der Physik, 389(20), 457–484.
- [8] World Coal Association (2023). "Coal Facts", <https://www.worldcoal.org>.
- [9] U.S. Energy Information Administration (EIA) (2023). "Coal explained: Coal and the environment", <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/>.
- [10] Huheey, J. E., Keiter, E. A., Keiter, R. L. (1993). Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity, 4. Baskı, HarperCollins, New York.
- [11] International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Data Services, ENDF/B Evaluated Nuclear Data Library, <https://www-nds.iaea.org>.
- [12] Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. (2001). Introduction to Nuclear Engineering, 3. Baskı, Prentice Hall, New Jersey.
- [13] Krane, K. S. (1988). "Binding Energy and the Semi-Empirical Mass Formula", Introductory Nuclear Physics, Bölüm 3, John Wiley & Sons.
- [14] Griffiths, D. J. (2008). Introduction to Elementary Particles, 2. Baskı, Wiley-VCH, Weinheim.
- [15] CODATA Internationally Recommended 2018 Values of the Fundamental Physical Constants, National Institute of Standards and Technology (NIST), <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>.
- [16] Universität Leipzig, "Energie-Grundlagen: Kohle und Kernenergie im Vergleich", <https://home.uni-leipzig.de/energy/energie-grundlagen/02.html>; ayrıca bkz. Energie-Lexikon, "Uran", <https://www.energie-lexikon.info/uran.html> ve LEIfIphysik, "Massendefekt und Bindungsenergie", <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernreaktionen/grundwissen/massendefekt-und-bindungsenergie>.
- Bu konudaki önceki yazımız: <https://www.radyasyonyatakan.com/yazi/nukleer-yakitlarin-enerjileri-neden-fosil-yakitlardan-milyonlarca-kat-fazladir-y-atakan-29-06-2026-2>