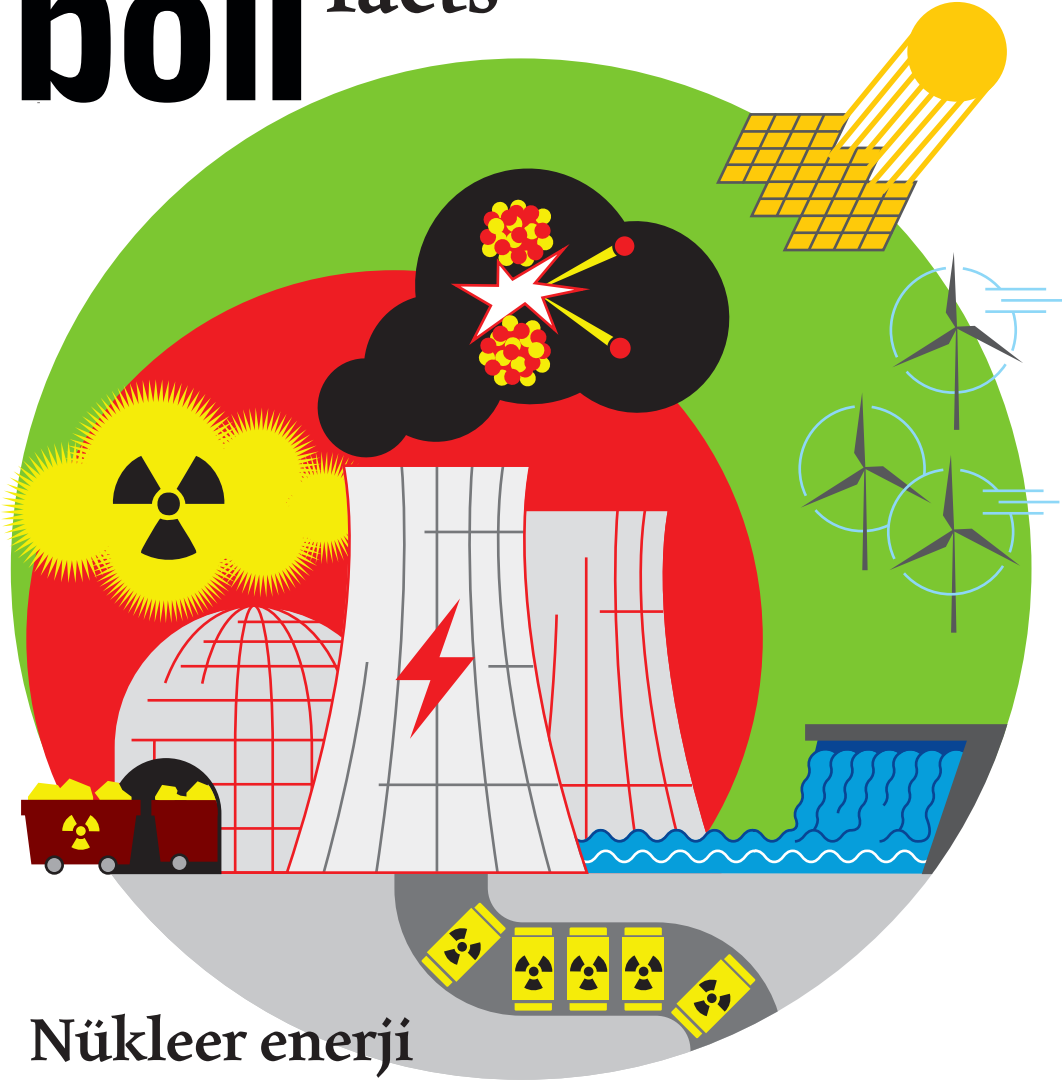


böll facts



Nükleer enerji

Tartışmalı bir teknolojinin
işleyişi ve riskleri

Nükleer enerji hakkında 14 gerçek

- 1 Nükleer santraller nasıl çalışıyor?**
- 2 Nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı nedir?**
- 3 Nükleer enerji güvenilir mi ve arz güvenliği açısından önemli mi?**
- 4 Nükleer enerji kullanımı bağımlılık doğuruyor mu?**
- 5 Nükleer santral kurmanın maliyeti nedir?**
- 6 Nükleer santralde üretilen elektrik ucuz mu?**
- 7 Nükleer santraller güvenli mi?**
- 8 Nükleer enerji nükleer silahların yayılmasına katkıda bulunuyor mu?**
- 9 Nükleer enerji ne kadar atık üretiyor?**
- 10 Yüksek düzeyli radyoaktif atığın nihai depolanması ne gibi zorluklar içeriyor?**
- 11 Yeni reaktör tasarımları nükleer enerjide gerçekten yeni bir sayfa açar mı?**
- 12 Nükleer enerji sürdürülebilir mi?**
- 13 Nükleer enerji yaygınlaşmadan iklim hedeflerine ulaşmak mümkün mü?**
- 14 Nükleer enerji net sıfır emisyonlu bir enerji sistemine geçiše katkı sağlayabilir mi?**

Önsöz Nükleer enerji, ilk kullanıldığı günden bu yana kutuplaştırıcı bir mesele olageldi. Nükleer bölünme yoluyla çok miktarda enerji üretilebildiği için başta umut vaat etmiş olsa da büyük riskler taşıdığı ve ağır çevresel yıkımlara yol açtığı anlaşıldı. Almanya'nın nükleer santrallerden vazgeçme kararı bile bu konudaki tartışmaları sona erdirmiş değil. Zira yaşanan enerji krizi ve iklimi koruma açısından etkili strateji arayışı, nükleer enerji konusunu yeniden siyasi tartışmaların merkezine yerleştirmiş görünüyor.

Bu yayında bir araya getirip sunduğumuz gerçekler, nükleer enerji olmadan da iklimi koruyabileceğimizi gösteriyor. Yenilenebilir enerji kaynakları daha güvenli ve daha sürdürülebilir olmakla kalmıyor, daha da ekonomik bir çözüm sunuyor.

Nükleer enerjiye başvurmadan enerji elde etme arzusu bugüne dek çevre hareketini şekillendirmiş olup, Yeşiller'in tarihiyle de iç içe geçmiş durumda. Ancak nükleer karşıtı hareket sadece nükleerin risklerini ve çevresel etkilerini eleştirmekten ibaret değil; lobi faaliyetlerinin gücü, demokratik katılım ve enerjinin daha adil bir şekilde dağıtımını gibi çok daha temel meseleleri de gündeme taşıyor. Fosil yakıtla ve nükleer enerjiyle çalışan büyük santrallerden merkezi olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, enerji üretimini toplumsal bir projeye dönüştürüyor.

Nükleer enerjiden vazgeçmek nükleer karşıtı hareket açısından büyük bir başarıydı, fakat nükleer enerjinin tarihi bununla sona ermiş değil. Almanya'nın şimdi yaklaşık 650 bin metreküp radyoaktif atığı güvenli şekilde depolaması ve kapatılan nükleer santralleri hassasiyetle sökmesi gerekiyor. Nükleer enerjinin hepimizi ilgilendiren güncel bir mesele olmayı sürdürmesinin bir başka nedeni de bu.

Sivil toplumun adil, erişilebilir ve sürdürülebilir enerji arzına yönelik mücadelesini yürütmesi için uzmanların bilgisine ihtiyacı var. Biz de **böll.facts** dizisiyle, nükleer enerjinin nasıl çalıştığına ve ne gibi riskler barındırdığına dair daha kapsamlı bir kavramsal çerçeve sunmayı ve nükleerden vazgeçmenin ekonomik ve ekolojik açıdan olumlu etkilerini ortaya koymayı amaçlıyoruz.

Anna Brehm

Heinrich Böll Stiftung Ekoloji Danışmanı

1. Gerçek Nükleer santraller nasıl çalışıyor?

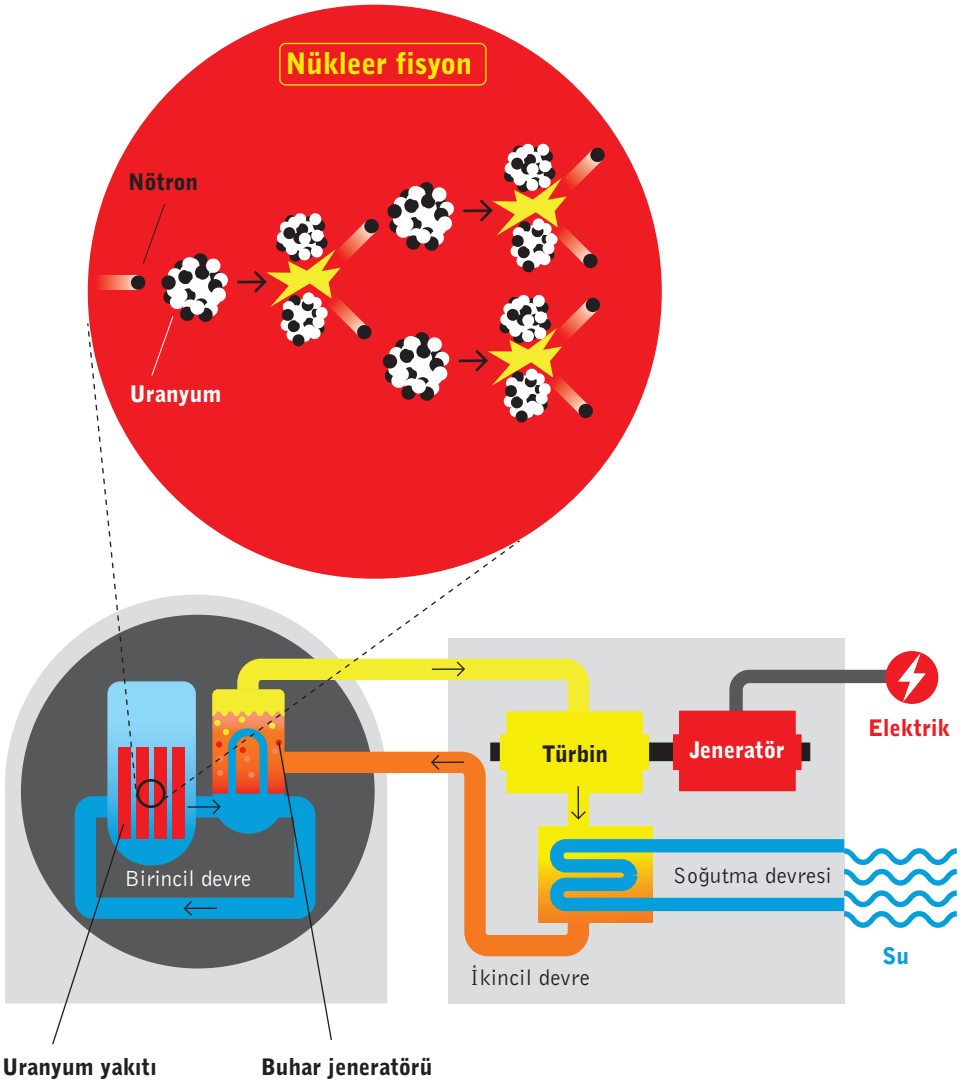
Nükleer santraller atom çekirdeklerinin kontrollü şekilde bölünmesi yoluyla enerji üretir, ancak bu işlem sırasında büyük miktarda tehlikeli radyoaktif madde de ortaya çıkar.

Dünyamız kimyasal elementlerden oluşur. Elementlerin en küçük yapı taşı atomlardır. Bu atomların çekirdekleri, elektriksel olarak pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan oluşur. Uranyum gibi çok sayıda proton ve nötron barındıran bir atom çekirdeği fazladan bir nötron daha yakaladığında parçalanabilir. Bu bölünme (filyon) sonucunda iki ya da ikiden fazla daha hafif çekirdek, yani filyon ürünü oluşurken, iki-üç nötron ve büyük bir miktar enerji de açığa çıkar. Serbest kalan bu nötronlar başka filyonları tetikleyebilir, böylece bir zincirleme reaksiyon meydana gelir.

Nükleer silahlarda bu zincirleme reaksiyon kontrolsüz biçimde gerçekleşir. Bu yüzden çok kısa sürede aşırı miktarda enerji patlama şeklinde açığa çıkar. Nükleer santrallerde (NS) ise zincirleme reaksiyon olağan durumlarda kontrol altında tutulur; böylece sürekli ve sabit miktarda enerji elde edilir.

Filyonun açığa çıkardığı enerjinin büyük bölümü ısıdır. Bu ısı, santralde uranyumdan elde edilen yakıtı çok ısıtır. Bu nedenle yakıtın soğutulması gerekir ve bunun için genellikle su kullanılır. Suyun bir kısmı ya doğrudan soğutma sırasında buharlaşır (kaynar su reaktörü) ya da ısıyı bir buhar jeneratörü aracılığıyla ikinci bir soğutma devresine aktarır (basınçlı su reaktörü). Ortaya çıkan buhar bir türbine yönlendirilir, türbin de jeneratörü çalıştırarak elektrik üretir. Günümüzde nükleer santraller tüm dünyada neredeyse sadece elektrik üretimi için kullanılıyor. Ortaya çıkan ısı nadiren doğrudan endüstri veya konutların ısıtılması amacıyla değerlendiriliyor.

Nükleer santralle elektrik üretebilmek için nükleer santralin yanı sıra uranyum madenine, uranyumun işlenip zenginleştirileceği, yakıtın üretileceği tesislere ve ortaya çıkan radyoaktif atıkların depolanabileceği güvenli yerlere ihtiyaç var.



2. Gerçek

Nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı ne?

Dünyada elektriğin sadece yüzde 9'u nükleer santrallerle üretiliyor ve bu oran önümüzdeki yıllarda daha da düşecek.

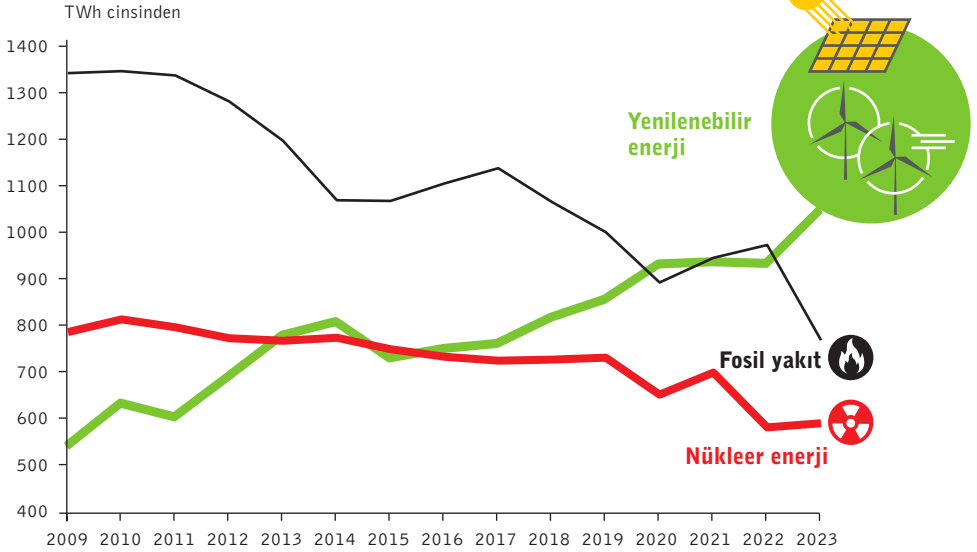
2023 yılında küresel elektrik üretiminin yalnızca yüzde 9'u nükleer enerjiyle üretildi. Bu oran 1996'da yüzde 17 ile zirveyi gördüğünden beri her sene peyderpey düşüyor.¹ Yenilenebilir enerji kaynakları ise 2023'te küresel elektrik üretiminin yaklaşık üçte birini sağladı ve bu oran devamlı artıyor.² Bugün sadece 32 ülkede nükleer santral (NS) işletiliyor.³ 2023'te yeni NS'lere yaklaşık 23 milyar dolar yatırım yapılırken, yenilenebilir enerji yatırımları bu rakamı 27 kat aşarak 625 milyar dolara ulaştı.⁴

AB üyesi 27 devletten sadece 12 tanesi nükleer santral işletiyor. AB'de nükleer enerji üretimi 2004 yılında zirveyi gördükten sonra, elektrik üretimi içindeki payı üçte birden fazla düşerek yüzde 24'e indi.⁵ Yenilenebilir enerji AB'de nükleeri çoktan geçti; günümüzde kıta elektriğinin yüzde 44'ünü sağlıyor ve bu oran artmaya devam ediyor.

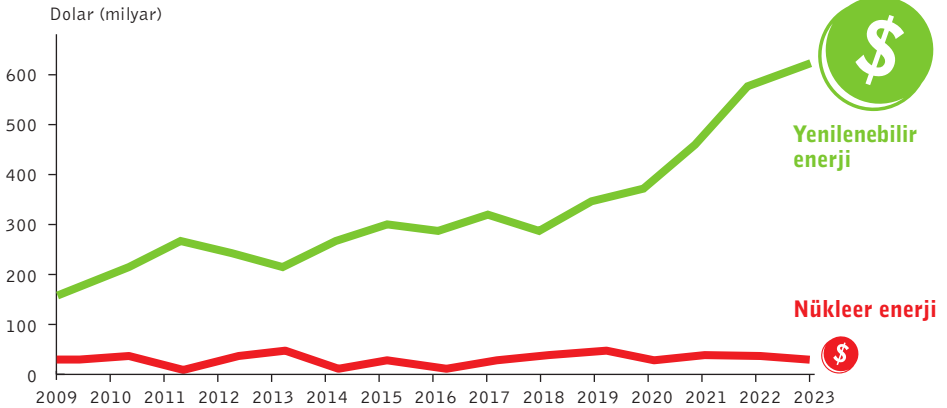
Almanya son üç nükleer santralini 2023'te kapattı, bunun sonucunda yaklaşık 30 TWh elektrik açığı oluştu.⁶ Ancak ertesi yıl yenilenebilir enerjiyle sağlanan ek 32 TWh elektrik, NS'lerin kaybindan fazlasını karşıladı. Almanya'nın nükleerden çıkışını izleyen yılda, kömürden elektrik üretimi de yüzde 36 azaldı.⁷ Korkulan olmadı: Elektrik ithalatına bağımlı olunmadı. Almanya net elektrik tüketiminin yalnızca yüzde 2'sini dışardan, büyük oranda Danimarka, Norveç ve İsveç'ten karşıladı;⁸ zira bu ülkelerdeki yenilenebilir enerjiden elde edilen elektrik, Almanya'da kömür ve gaz kullanarak elektrik üretmekten daha ucuz.⁹

İtalya ve Litvanya da nükleerden vazgeçti, Belçika ve İspanya ise bu yönde planlama yapıyor. İsveç ve Hollanda'da sağcı hükümetler nükleer enerjiyi terk etme planlarını durdurdu ve yeni NS'lerin inşası düşünüyor. Polonya nükleer enerji alanına girmek istiyor. Ancak net eğilim yenilenebilir enerji yönünde ve nükleer enerjinin önemi azalıyor.

AB'de elektrik üretimi



Yeni yenilenebilir ve nükleer enerjiye küresel yatırımlar



3. Gerçek

Nükleer enerji güvenilir mi ve arz güvenliği açısından önemli mi?

Nükleer santraller sık sık devre dışı kalmaları ve iklim krizinin yol açtığı ek kesinti riskleri yüzünden arz güvenliğini zayıflatıyor.

Nükleer santraller de yaşıyor: Dünyadaki nükleer reaktörlerin ortalama yaşı 32, bazıları ise 50'nin üstünde.¹⁰ Yaşlandıkça güvenilirlikleri ve dolayısıyla arz güvenliği azalıyor. Fransa bunun en çarpıcı örneği. 2022'de ülkedeki 56 nükleer reaktörün her biri ortalama 152 gün devre dışı kaldı; yani yılın yüzde 40'tan fazlasında çalışmamış oldu.¹¹ Hatta en yeni ve büyük 12 reaktör beklenmedik çatlaklar sebebiyle kapatıldı. 20 reaktör bakım çalışmaları nedeniyle durduruldu. Yazın da soğutma suyu kıtlığı sebebiyle ek kısıntılara gidildi.

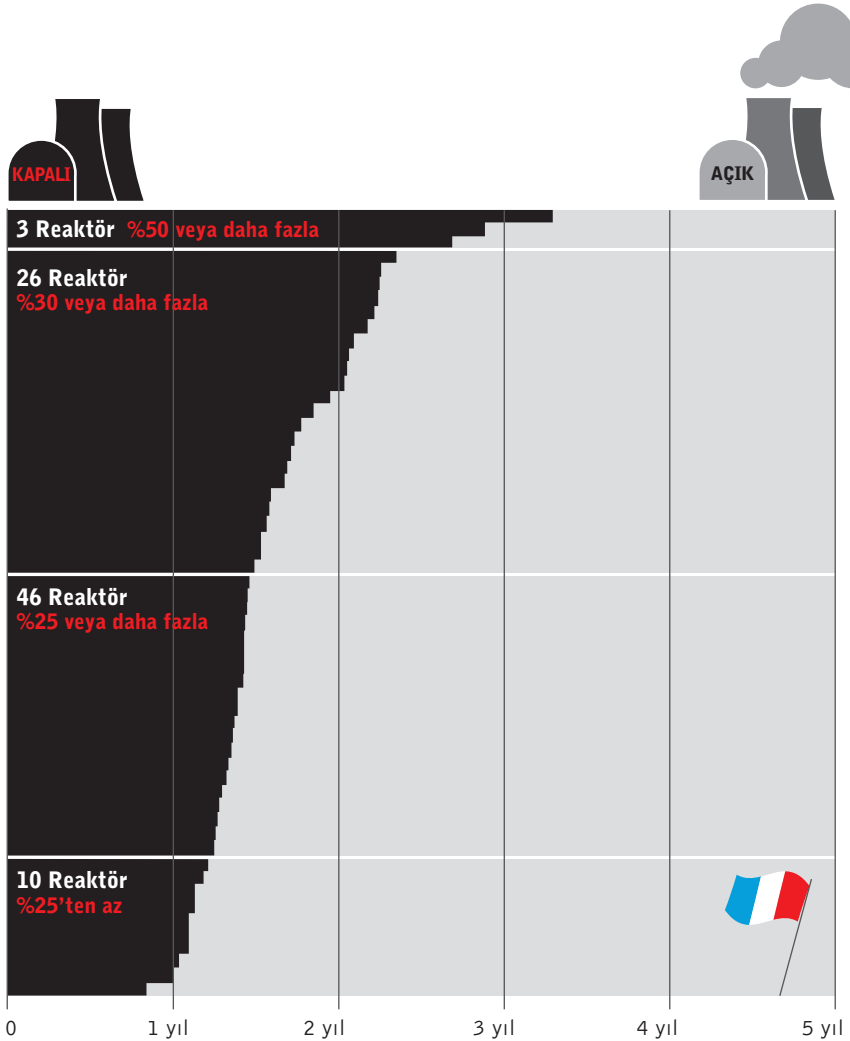
Reaktör arızaları yüzünden nükleer elektrik üretimi önceki yıla göre dörtte bir oranında azaldı.^{12,13} Açığın ithalatla kapatılması gerekti ve bu da Avrupa'da elektrik fiyatlarını hayli yükseltti. Almanya 2022'de Fransa'ya 15 TWh elektrik ihraç etti. Bunun sonucunda Almanya'nın elektrik üretiminde kömürün payı yüzde 10 arttı. Fransa'da elektrik üretimindeki bu istikrarsızlık yeni bir şey değil: 2020'de reaktörler ortalama 115, 2023'te ise 127 gün devre dışı kalmıştı.¹⁴

Fransa ayrıca iklim krizinin NS'lerin güvenilirliğini nasıl etkilediğine de şahit oluyor. Kuraklık ve sıcak hava dalgaları soğutma suyunu azalttığından üretim düşüyor veya kesintiler yaşıyor. Nehir kıyılarındaki santral sahaları alışılmadık düzeydeki taşkın tehdidiyle daha sık yüzleşiyor. Enkaz ve moloz parçaları reaktörlere hasar veriyor. Deniz kıyısındaki santraller ise şiddetli fırtına, aşırı su seviyeleri ve gelgit dalgalarına daha fazla maruz kalıyor. Ayrıca yükselen deniz seviyesi de risk yaratıyor.

Japonya'daki Fukuşima gibi kazalar da enerji arzı riskini ortaya koyuyor. Kazadan evvel Japonya'daki NS'ler ülkedeki elektriğin yüzde 30'unu üretiyordu, ancak 2015 itibarıyla bu rakam neredeyse sıfıra indi. Kazanın üzerinden 10 yıldan fazla bir süre geçmiş olmasına rağmen, Japonya'da nükleer enerji üretimi hâlâ çok düşük.¹⁵

Fransa'daki nükleer santrallerin devre dışı kalma oranı

yıllık yüzdeler zaman, 2019-2023



4. Gerçek

Nükleer enerji kullanımı bağımlılık doğuruyor mu?

Nükleer enerji kullanımı Avrupa ülkelerini Rusya'ya ciddi şekilde bağımlı hale getiriyor.

Rusya nükleer enerji alanında Avrupa devletlerini stratejik olarak kendine bağımlı hale getirdi. Bu bağımlılık o kadar yoğun ki AB'nin Rusya'ya karşı birçok yaptırım paketi bulunmasına rağmen nükleer enerji hâlâ bunların dışında tutuluyor.

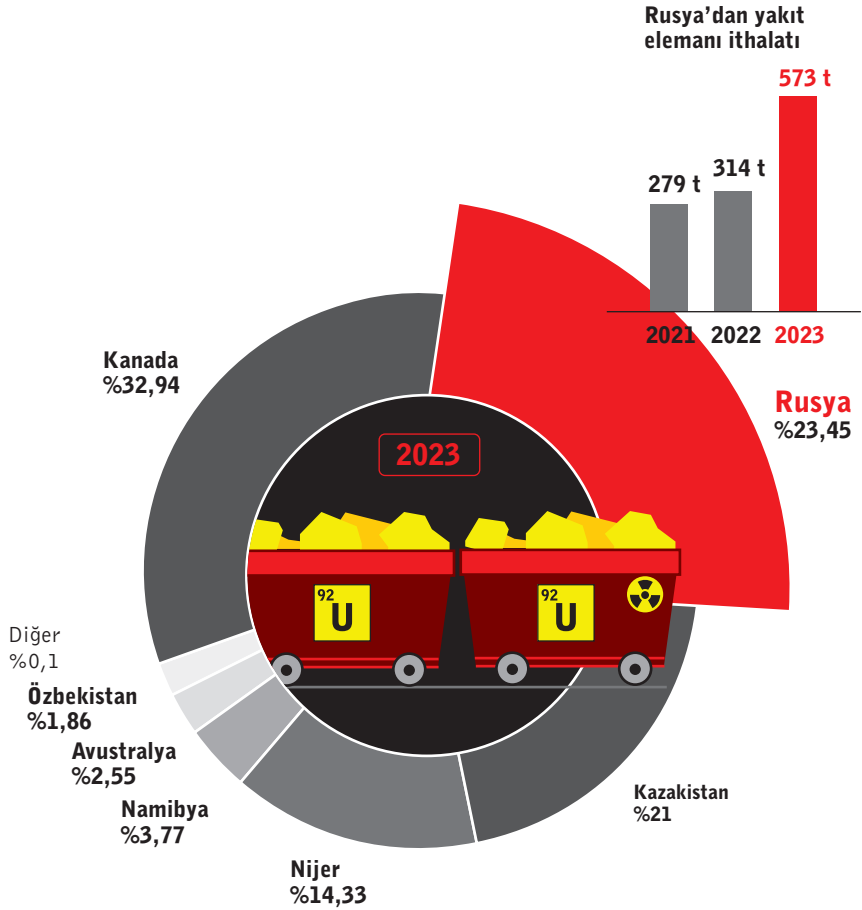
Bağımlılık uranyum madenciliğiyle başlıyor. AB, 2023 yılında uranyumunun yüzde 23'ünü Rusya'dan ithal etti. Benzer bir miktar Kazakistan'dan ithal edilse de¹⁶ oradaki uranyum üretiminin de yüzde 22'si zaten Rus şirketlerine ait.¹⁷ Uranyumun kullanılabilmesi için önce zenginleştirilmesi gerekiyor. 2023'te Avrupalı tedarikçiler için zenginleştirme işleminin yaklaşık yüzde 38'ini Rus devlet şirketi Rosatom gerçekleştirdi. Ayrıca ABD'ye giden zenginleştirilmiş uranyumun dörtte birini de Rusya sağladı.

Avrupa'nın bağımlılığı en belirgin biçimde yakıt elemanı üretiminde görülüyor. Bulgaristan, Finlandiya, Romanya, Slovakya, Çekya ve Macaristan'daki Rus tasarımı 19 nükleer reaktör için

yakıt elemanını Rusya tedarik ediyor. Bu reaktörlerin çoğu tamamen Rus yakıtına bağımlı.¹⁸ Batı ülkelerinde alternatif üretim kapasitesi kurulması için en az altı yıla ihtiyaç var.¹⁹ Rosatom bazı Doğu Avrupa ülkelerine bakım ve yedek parça tedariki de sağlıyor.

Batı Avrupa'daki NS'ler bile tam bağımsız değil. Fransız nükleer şirketi Areva, Batı Avrupa'daki NS'lere yakıt elemanı sağlamak için Rus şirketi TVEL ile işbirliği yapıyor.²⁰ Aralık 2021'de Fransız şirket Framatome, Rosatom ile stratejik bir işbirliği anlaşması imzaladı.²¹

Rosatom'un dünyanın başka yerlerinde (örn. Bangladeş, Çin, Hindistan, İran, Mısır, Slovakya ve Türkiye)²², çok sayıda yeni NS inşa eden tek şirket olması, Rusya'nın nüfuz ve pazarlık gücünü daha da artırıyor.



5. Gerçek

Nükleer santral kurmanın maliyeti nedir?

Yeni nükleer santral inşa etmek o kadar pahalı ve riskli ki Avrupa'daki özel enerji şirketleri bu yatırımları finanse edemiyor.

Birçok ülkede yeni NS inşası en maliyetli inşaat projeleri arasında yer alıyor. Günümüzde tek reaktörlü yeni bir projenin maliyeti 12-30 milyar dolar arasında değişiyor. Batı ülkelerindeki tüm yeni NS projeleri bu yüzyılda hem planlanan inşaat süresini ve hem de öngörülen maliyetleri katbekat aştı.

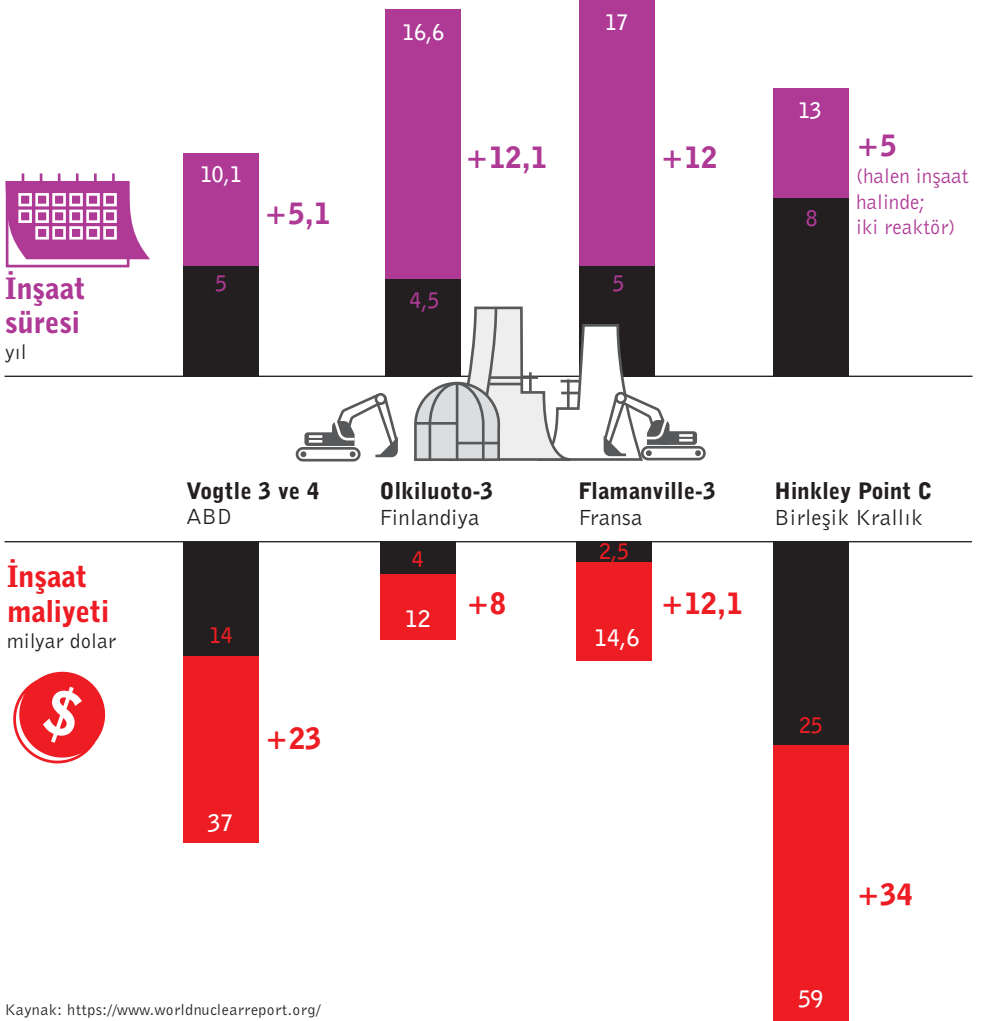
ABD'de yapımına 2013'te başlanan iki yeni reaktör ancak son iki yılda devreye girebildi. İlk başta 14 milyar dolar olarak öngörülen inşaat maliyeti yüzde 260 artarak neredeyse 37 milyar dolara çıktı.²³ Avrupa'nın en büyük reaktörü olan Finlandiya projesinin (Olkiluoto-3) 4 milyar dolar olarak planlanan maliyeti ise 12 milyar doları aştı ve bu nükleer reaktör 17 yıl süren inşaatın ardından ancak 2023'te devreye girebildi.^{24,25} Fransa'da Flamanville-3 nükleer reaktörü için 2001'de 2,5 milyar dolar olarak öngörülen yapım maliyeti bugün en az 14,6 milyar dolara yükselmiş bulunuyor.²⁶ Deneme işletimleri ise planlandığı gibi beş değil 17 yıl sonra, 2024'te başlatıldı.²⁷ Birleşik Krallık'taki iki reaktörlü yeni

Hinkley Point C'nin maliyeti de 2015'te öngörülen 25 milyar dolardan 59 milyar dolara (2024'te tahmini) kadar yükseldi.²⁸ Devreye girmesi ise 2025-27 olarak planlanırken, 2029-31'e ertelenmiş bulunuyor.²⁹

Bu dev rakamlar Alman enerji şirketlerinin yatırım kapasitesiyle kıyaslandığında Almanya'da yeni NS inşasının ne kadar gerçek dışı olduğu açıkça görülüyor. Örneğin Almanya'nın en büyük enerji şirketlerinden EnBW, 2024 ile 2030 arasında çeşitli enerji projelerine 40 milyar avro yatırım yapmayı planlıyor.³⁰ Bir veya iki NS inşaatı bu bütçenin tamamını tüketeceğine göre hem şirket hem de ona kredi sağlayan kurumlar açısından aşırı riskli bir durum oluşacaktır. Kısacası, devlete ait enerji şirketleri, tekel benzeri yapılar veya büyük kamu destekleri olmadan yeni NS kurmak fiilen mümkün görünmüyor.

Yeni nükleer reaktör projelerinde inşaat süresi ve maliyeti

planlanan (siyah) ve gerçekleşen



6. Gerçek

Nükleer santralde üretilen elektrik ucuz mu?

Nükleer santralde üretilen elektrik, elektrik üretiminin en pahalı biçimlerinden biri ve zamanla ucuzlamak yerine daha da pahalı hale geldi.

Nükleer santralde elektrik üretimi eskiden olduğu gibi, bugün de pahalı.³¹ Elektrik üretim maliyeti, bir santralin yapım ve finansman, işletme ve yakıt dahil tüm giderlerinin üretilen elektrik miktarına bölünmesiyle hesaplanır. 2024'te yeni NS'lerde üretilen elektriğin maliyeti megavat saat (MWh) başına yaklaşık 192 dolar iken, rüzgar enerjisinde bu rakam 50, güneş enerjisinde ise 61 dolardı.³² Yani nükleer santralde üretilen elektrik yenilenebilir enerji kaynaklı elektriğin yaklaşık üç katına mal oluyor. İlave depolama teknolojilerinin maliyeti hesaba katıldığında dahi, örneğin fotovoltaik panellerle elde edilen elektrik nükleer enerjiye kıyasla hâlâ çok hesaplı kalıyor.³³ Rüzgar ve güneş kaynaklı elektriğin maliyeti son 15 yılda sırasıyla yüzde 63 ve 83 oranında düşerken, yeni NS'lerden elde edilen elektriğin maliyeti neredeyse yarı yarıya arttı.³⁴

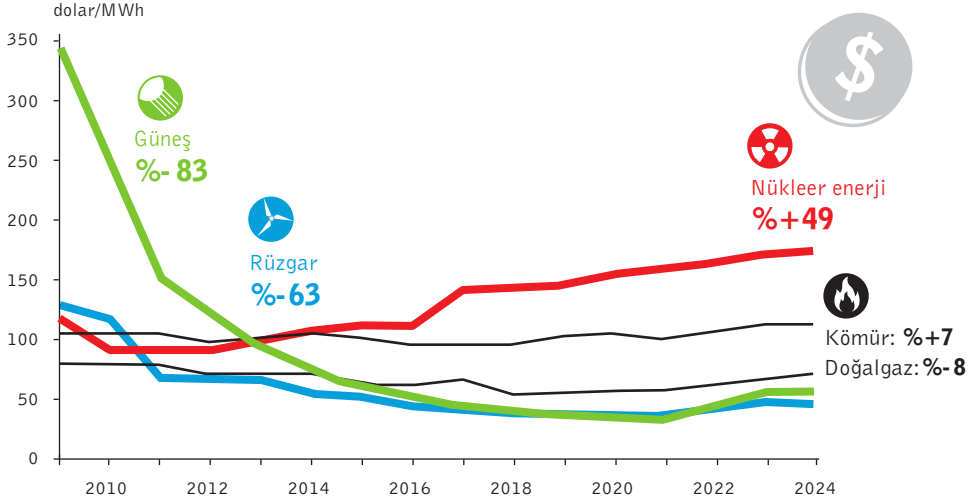
Sadece yeni NS inşa etmek değil mevcut santrallerin işletme ömrünü uzatmak da maliyetli; zira ek güvenlik yatırımları gerektiriyor. Belçika, Av-

rupa'daki enerji krizi sebebiyle 2022'de iki reaktörün işletme ömrünü 10 yıl uzattı. Bu bağlamda devlet, santrallere yüzde 50 ortak olmak ve ileride payına düşecek zararları üstlenmek zorunda kaldı. MWh başına garanti edilen elektrik alım fiyatı 81 avro olarak belirlenmesine rağmen, 2024'te Belçika toptan elektrik piyasasında ortalama fiyat MWh başına 68 avro idi. Aradaki farkı ise devlet, yani vergi mükellefleri karşılamak zorunda kalıyor.^{35,36}

Ayrıca NS'in sökülmesi ve nihai nükleer atık depolaması için gereken maliyetler, faturası ileride çıkacağı için çoğu zaman göz ardı ediliyor. 2014'te Almanya'da nükleer atık bertarafının maliyeti yaklaşık 49 milyon avro olarak öngörülmüştü.³⁷

NS'ler ciddi kaza riski de taşıyor. Böyle bir durumda ortaya çıkabilecek potansiyel maliyetler o kadar yüksek ki bunların fiilen sigortalanması mümkün olmuyor.

Teknolojiye göre ortalama elektrik maliyetlerinin seyri



2023 elektrik üretim maliyetleri (avro sent/kWh)



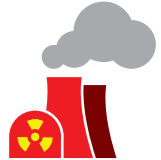
Taş kömürü
17,3–29,3



Esnek işletimli
doğalgaz santralleri
15,4–32,6



Linyit
15,1–25,7



Nükleer santraller
13,6–49



Çatı tipi küçük ölçekli
güneş enerjisi sistem
6,3–14,4



Denizüstü RES
5,5–10,3



Kara RES
4,3–9,2



Arazi tipi güneş
enerjisi sistemi
4,1–6,9

7. Gerçek Nükleer santraller güvenli mi?

**Nükleer enerji ciddi güvenlik riskleri içeriyor:
Bir kaza durumunda büyük miktarda radyoaktif
madde açığa çıkıp insan ve çevre için tehdit
oluşturuyor.**

Nükleer fisyon sırasında yüksek miktarda parçalanma ürünü oluşur. Ayrıca uranyumun bir kısmı, yine radyoaktif olan plütonyum gibi daha ağır elementlere dönüşür. Dolayısıyla NS'lerde ciddi miktarda radyoaktif madde bulunur. Bunlar açığa çıkarsa insanlar ve çevre için tehlike oluşturur.

Aynı zamanda reaktörde büyük ısı oluşur. Reaktör kapatıldığında bile radyoaktif bozunma kaynaklı ısı üretimi sürer. Dolayısıyla reaktörün sürekli soğutulması gerekir. Bunun için güvenlik sistemleri var ancak bu sistemlerin çalışabilmesi için kesintisiz elektrik ve su tedariki şart.³⁸

Bu güvenlik sistemlerine rağmen NS'lerde felaket boyutunda kazalar yaşanabiliyor.³⁹ Zincirleme reaksiyon kontrolden çıkarsa çok kısa sürede aşırı ısı üretilir. 1986'da Çernobil NS kazasında yaşanan tam olarak buydu.⁴⁰ Deprem ve sel gibi dış

etkiler güvenlik sistemlerini devre dışı bırakabilir. 2011'de Fukuşüma NS'nde yaşanan olay da buydu.⁴¹ Yangın, insan hatası, terör eylemi veya askeri saldırı gibi başka olaylar da kazaları tetikleyebilir. Ukrayna'da savaş bölgesinin ortasında yer alan Zaporijya NS'i özellikle tehlike altında.⁴² Dünyadaki hiçbir NS, kendisini hedef alacak bir askeri saldırıya karşı dayanıklı değil.

Felaket boyutundaki kazaların ardından geniş alanların iskana veya tarıma kapatılması gerekiyor. Çernobil ve Fukuşüma kazalarının ardından yüz binlerce insan evlerini terk etmek zorunda kaldı. Ekonomik maliyet ise birkaç yüz milyar avrodan başlayıp bir trilyona kadar ulaşabilir.⁴³ Bu maliyetler sigorta tarafından karşılanmaya çağrı için kamusal kaynaklardan karşılanmak zorunda.

Nükleer tesis kazaları

(yalnızca INES Ölçeği düzeyi 5, 6 ve 7 olan kazalar)

29 Eylül 1957 Mayak, SSCB

Yeniden işleme tesisindeki bir tankta patlama, geniş çaplı toprak kirliliği

7-12 Ekim 1957 Windscale, BK

Nükleer silahlar için plütonyum üretiminde kullanılan grafit moderatörlü bir reaktörde yangın.

26 Temmuz 1959 Simi Valley, ABD

Sodyum soğutmalı reaktörde kısmi çekirdek erimesi.

1969 Lucens, İsviçre

Korozyon kaynaklı soğutma yetersizliği, kısmi çekirdek erimesi.

1977 Beloyarsk, SSCB

Bir reaktördeki yakıt düzeneklerinin yarısının eridiği kaza.

28 Mart 1979 Three Mile Island, ABD

Bir reaktörde kısmi çekirdek erimesi.

26 Nisan 1986 Çernobil, SSCB

Patlamaya benzer çekirdek hasarı ve ardından grafit yangını.

11 Mart 2011 Fukuşima, Japonya

Tsunami nedeniyle soğutma sistemlerinin devre dışı kalmasıyla yakıt elemanlarının aşırı ısınması sonucunda birden fazla patlama.

1950



Mayak

Windscale

Simi Valley

1960



Lucens

1970



Beloyarsk

Three Mile Island

1980



Çernobil

1990

2000

2010



Fukuşima

2020

8. Gerçek

Nükleer enerji nükleer silahların yayılmasına katkıda bulunuyor mu?

Aynı malzeme ve teknoloji hem barışçıl amaçlarla hem de nükleer silah üretiminde kullanılabilmişinden, nükleer enerji ciddi riskler barındırıyor.

Nükleer enerji keşfedildiğinden bu yana hem barışçıl hem de askeri amaçlarla kullanılıyor. Bir atom çekirdeğinin bölünmesi kimyasal tepkimelere kıyasla milyonlarca kat enerji açığa çıkarır. NS'lerde bu enerji elektrik üretmek için kontrol-lü şekilde, atom bombasında ise aynı enerji yıkım yaratacak şekilde patlayıcı olarak kullanılır.

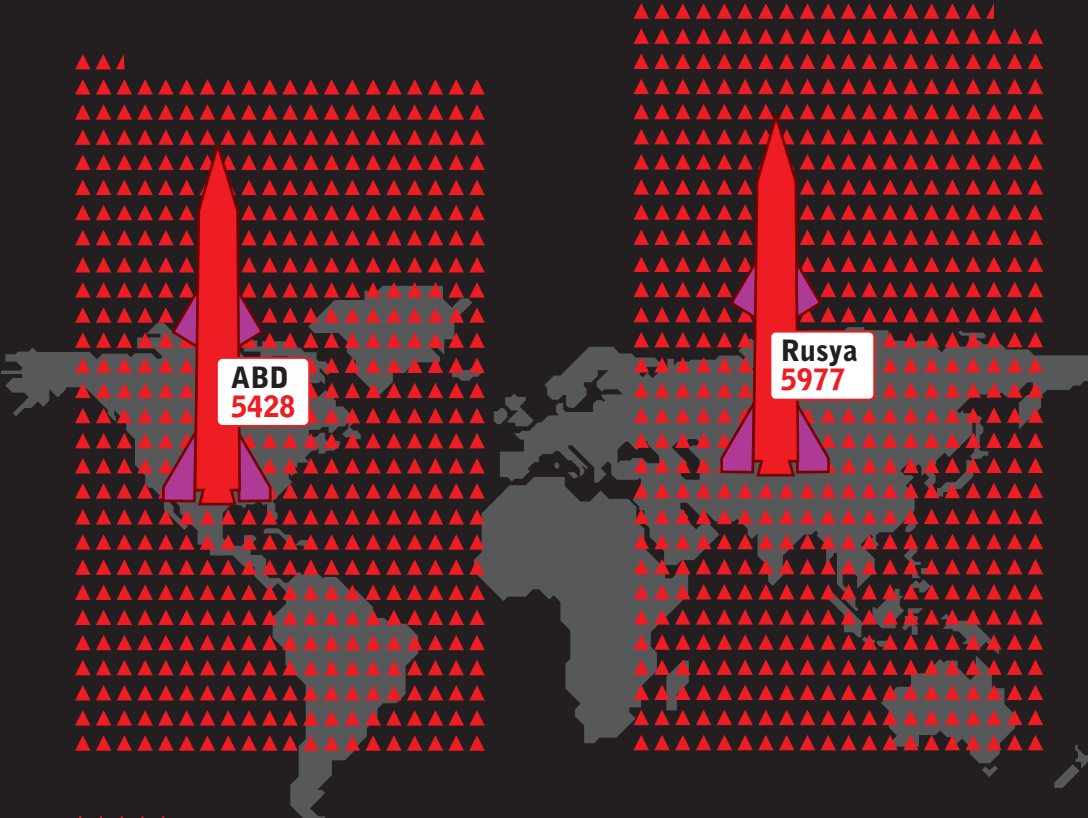
Atom bombası üretiminde ve sivil nükleer teknolojiye genellikle aynı teknoloji ve malzeme kullanılıyor. Bu durum, aynı teknolojinin hem barışçıl hem askeri amaçlarla kullanılabilmesi anlamında “çift kullanım” (dual-use) diye anılıyor. Bu kullanım özellikle uranyum ve plütonyum ile zenginleştirme ve yeniden işleme teknolojilerini içerir.

Uranyum zenginleştirme tesislerinde NS'ler için düşük zenginlikte uranyum üretilir. Ancak aynı tesis nükleer silahlar için yüksek zenginlikte uranyum da üretme kapasitesine sahiptir. Plütonyum ise NS'lerin yakıtında oluşur ve NS'ler-

den elde edilen bu plütonyum nükleer silahlarda kullanılabilir.⁴⁴ Bunun için daha sonra yüksek derecede radyoaktif hale gelen yakıttan kimyasal olarak ayrıştırılması gerekir. Buna yeniden işleme denilir.

Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması (NPT) nükleer silahların yayılmasını sınırlandırmayı amaçlıyor. NPT kapsamında beş resmî nükleer güç nükleer silahsızlanma taahhüdünde bulundu. Diğer devletler de nükleer silahlardan vazgeçerek, nükleer enerjiyi barışçıl amaçlarla kullanma hakkı elde etti. Bahsi geçen beş resmî nükleer güç dışında, günümüzde muhtemelen dört başka devlette de nükleer silah bulunuyor. Dünya genelinde atom bombası yapma girişiminde bulunan devletlerin sayısı ise 25-30 civarında. Bu ülkelerin hepsinde sivil nükleer program da mevcut ve dolayısıyla nükleer enerjinin çift kullanımlı özelliklerinden yararlanmaları mümkün.

2022



Çin
350



Fransa
290



Birleşik Krallık
225



Pakistan
165



Hindistan
160



İsrail
90



Kuzey Kore
20

Kaynak: H.M. Kristensen, M. Korda, R. Norris, Amerikan Bilim İnsanları Federasyonu (FAS), 2022

9. Gerçek

Nükleer enerji ne kadar atık üretiyor?

Nükleer enerjinin kullanımını çok büyük miktarda radyoaktif atığa sebep oluyor, bunların uzun süre güvenli biçimde yeraltında depolanması gerekiyor.

Nükleer atık içerisinde yer yer yüksek yoğunlukta bulunan radyoaktif maddeler bozunurken yüksek enerjili radyasyon yayar. Bu radyasyon, türüne ve miktarına bağlı olarak, insanlar için zararlı ve hatta ölümcül olabilir. Yani radyoaktif atık hem insan hem çevre açısından tehlike oluşturur.

Almanya'da 60 yıllık ticari nükleer kullanımının ardından yaklaşık 27 bin 500 metreküp yüksek düzeyli radyoaktif atık ve ayrıca 620 bin metreküpe varabilecek miktarda düşük/orta düzeyli atık ortaya çıkması öngörülmüyor.⁴⁵ Yüksek düzeyli atıklar toplam hacmin yaklaşık yüzde 1'ini oluştursa da toplam radyoaktivitenin yüzde 99'unu içerdiğinden son derece tehlikeli.

Dünya genelinde nükleer atıklar nihai depolama altyapısı tamamlanana dek geçici depolarda tutuluyor; Almanya'da halihazırda 33 noktada yerüstü deposu var.

Söz konusu ara depolama yöntemi uzun vadeli bir çözüm oluşturmuyor. İleride taşınabilmesi için bu depolardaki kapların sızdırmazlığının ve atıkların kimyasal ve fiziksel bütünlüğünün korunması şart. Ayrıca toplumsal istikrar ve uzun vadeli kurumsal/finansal süreklilik de garanti edilmeli.

Özellikle yüksek düzeyli atıkların Almanya'da 1 milyon yıl güvenle saklanması gerekiyor.⁴⁶ İnsanın tahayyül edebileceği zaman aralığının çok ötesinde bir süre bu. Mevcut bilgiler dahilinde uygulanabilir tek seçenek jeolojik nihai depolama, yani atıkların yerin yüzlerce metre altında depolanması. Atıkların depolandığı nihai kapların ilk teknik bariyeri, çevredeki kayaçların ise jeolojik bariyeri oluşturarak radyoaktif maddelerin uzun vadede canlıların olduğu çevreye salınmasına engel olması öngörülmüyor.

Almanya'daki radyoaktif atık bertaraf tesisleri



- Kullanılmış nükleer yakıtlar için geçici depolama tesisi
- Düşük/orta düzeyli radyoaktif atıklar için geçici depolama tesisi, devlet toplama merkezi
- Düşük/orta düzeyli radyoaktif atıklar için nihai depolama tesisi
- Asse madeni atıkları geri çıkarma projesi

Kaynak: <https://www.bundesumweltministerium.de/>
ve https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/_home/home_node.html

	Yüksek düzeyli radyoaktif	Diğer radyoaktif atıklar
Radyasyon etkinliği	%99	%1
Hacim	27.500 m ³	620.000m ³

10. Gerçek Yüksek düzeyli radyoaktif atığın nihai depolanması ne gibi zorluklar içeriyor?

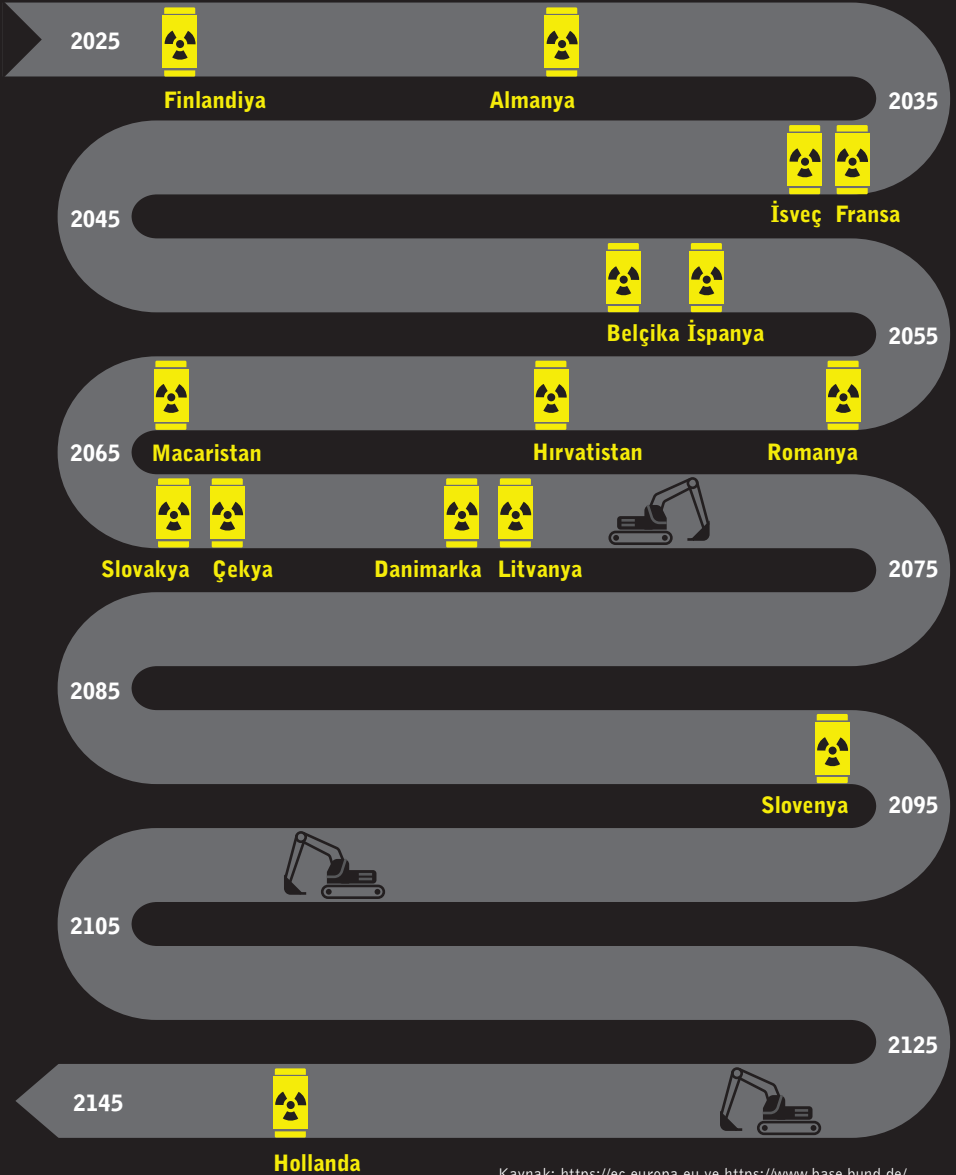
Nükleer atığın nihai depolanması ve uygun yer seçimi sadece teknik değil, toplumsal açıdan da önemli bir mesele oluşturuyor.

Nükleer enerji geçen yüzyıl ortalarından beri kullanılıyor olsa da yüksek düzeyli radyoaktif atık için henüz dünyanın hiçbir yerinde faaliyette olan bir nihai depolama tesisi bulunmuyor. Nihai depolama sahası arayışının sadece teknolojik ve jeolojik değil, toplumsal ve siyasi boyutlar da içerdiği yeterince dikkate alınmıyor.

Birçok ülkede nihai depolama sahası arayışı ya hiç başlamamış ya askıya alınmış ya da sil baştan başlatılmak zorunda kalmış durumda. Finlandiya'da birçok kez ertelendikten sonra, dünyanın ilk yüksek düzeyli radyoaktif atık nihai deposunun 2026 yılında işletmeye alınması planlanıyor. İsviçre, İsveç ve Fransa en azından nihai depolama yerlerini belirlemiş durumda. ABD'de ise belirlenen saha 2010 yılında alınan bir kararla iptal edildi. Diğer pek çok ülke ise nihai depolama sahası arayışına bile başlamış değil.

Almanya'da 2017'de Nihai Depolama Sahasının Aranması ve Seçilmesine ilişkin Yasa (StandAG)⁴⁷ çıkartılarak nihai depo seçim süreci yeniden başlatıldı. Bir milyon yıllık bir süre için “mümkün olan en yüksek güvenliğin” sağlanması amaçlanıyor. Ülke genelinde, bilime dayalı ve halkın katılımını içeren bir süreç yönetilmesi ve böylece geçmişte yapılan hatalar tekrarlanmadan toplumsal kabul görececek bir sahanın belirlenmesi hedefleniyor. Mevcut planlar saha seçiminin 2031 yılı itibarıyla tamamlanmasını öngörse de güncel tahminler sürecin birkaç on yıl daha sürebileceğine işaret ediyor.^{48,49} Yani deponun onay, inşa ve işletmeye alınma süreci 2100 sonrasına sarkacak gibi görünüyor.

Sahanın seçilme süreci, santral işletmecilerinin yaklaşık 24 milyar avro aktardığı Nükleer Atık Bertaraf Fonu (KENFO)⁵⁰ tarafından finanse ediliyor. Bu fon yetersiz kalırsa, mevcut düzenlemelere göre artan maliyetlerin devlet bütçesinden, dolayısıyla vergi mükellefleri tarafından karşılanması gerekiyor.



11. Gerçek Yeni reaktör tasarımları nükleer enerjide gerçekten yeni bir sayfa açar mı?

Alternatif reaktör tasarımlarını geliştirenler bazı avantajlar vaat etse de söz konusu sistemlerin hiçbiri bugüne dek ticari ölçekte hayata geçirilebilmiş değil.

Alternatif reaktör tasarımları uzun zamandır gündemde. Mevcut reaktörlerden farklı olarak bu tasarımlar soğutucu olarak su yerine sodyum ve kurşun gibi sıvı metaller kullanmayı hedefliyor. Ancak onlarca yıldır üzerinde çalışılmasına rağmen hiçbiri teknik açıdan yeterli olgunluğa ulaşmış veya ticari bir başarı kazanmış değil.

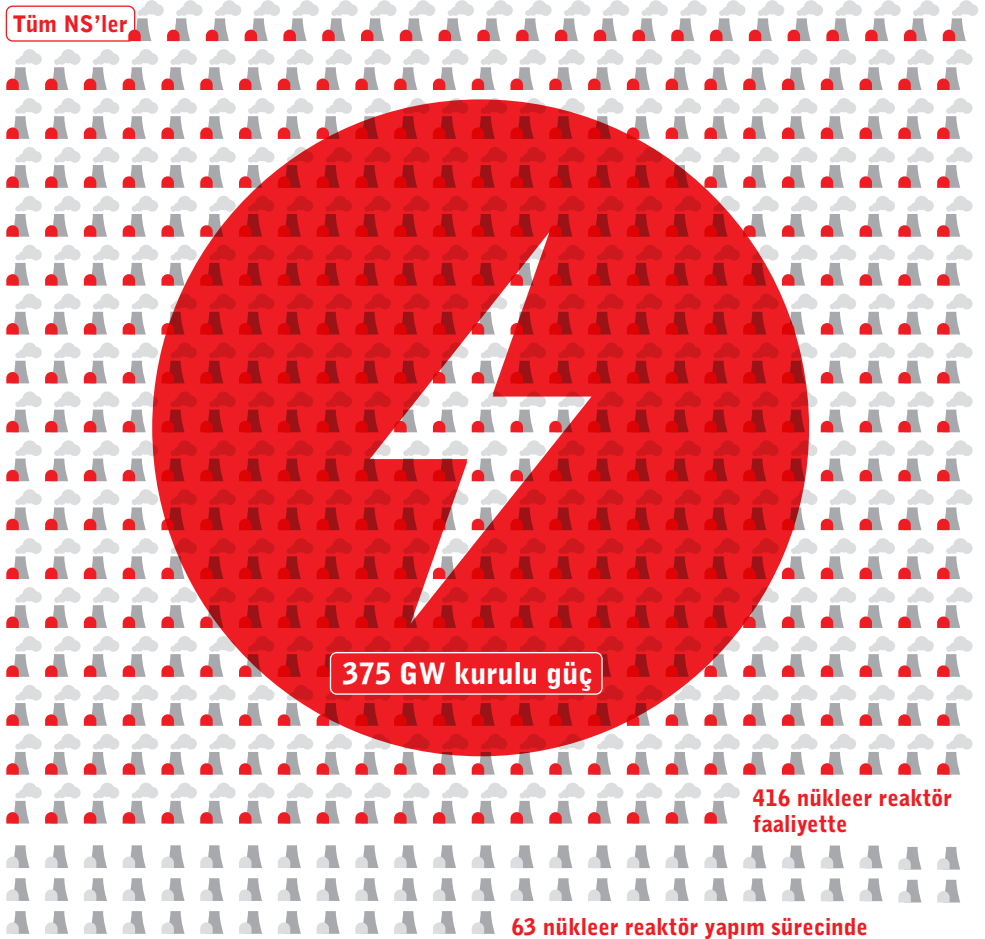
Bu tasarımların her biri güvenlik, yakıt tedariki, atık yönetimi, nükleer silahların yayılmasını önleme veya maliyet açısından çeşitli avantajlar sunabilir. Ancak hiçbir tasarım bu avantajları bir arada sağlamıyor, üstelik çoğu zaman bazı dezavantajlar da içeriyor. Bu teknolojilerin ticarileşme aşamasına gelmesi için onlarca yıl daha geliştirilmesi ve büyük yatırımlar gerekiyor. Dolayısıyla, söz konusu tasarımların bugünkü nükleer enerji sorunlarına çözüm sunabileceği ve yakın gelecekte düşük karbonlu enerji üretimine anlamlı bir katkı yapabileceği yönündeki umutlar gerçekçi değil.⁵¹

Küçük Modüler Reaktörler (SMR) de son yıllarda sıkça gündeme geliyor. Bunlar günümüzdeki nükleer santrallere kıyasla çok daha küçük kapasiteye sahip tasarımlar.⁵² Bu fikrin geçmişi 1950'lere kadar uzanıyor.⁵³ BSMR fikrini savunanlar, bu reaktörlerin bazı kısımlarının veya tamamının merkezi tesislerde seri bir şekilde üretilebilmesi sayesinde daha hızlı ve ucuza üretim yapılabileceğini düşünüyor. Ne var ki dünyada bu şekilde üretilmiş nükleer reaktör sayısı henüz çok sınırlı ve bu amaçla kurulmuş bir seri üretim altyapısı da bulunmuyor. Söz konusu prototiplerin ise hiçbiri modüler olarak üretilmediği için boyutlarıyla orantılı düşünüldüğünde hem mevcut reaktörlerden daha pahalıya mal oldular, hem de hızlı üretim avantajı sunamadılar. Son analizler, SMR'lerin mevcut nükleer reaktörlere kıyasla daha ucuz elektrik üretebilmesi için yüzlerce değil, binlerce ünite (reaktör) üretim hacmine ulaşması gerektiğini gösteriyor.⁵⁴

Faaliyette ve yapım aşamasındaki nükleer reaktörlerin sayısı ve kapasitesi

Aralık 2024 itibarıyla

Tüm NS'ler



SMR



3'ü faaliyette

3'ü yapım sürecinde

0,214 GW kurulu güç
(yalnızca faaliyettekiler)

Alternatif
reaktör
tasarımları



3'ü faaliyette

5'i yapım sürecinde



1,53 GW kurulu güç
(yalnızca faaliyettekiler)

12. Gerçek Nükleer enerji sürdürülebilir mi?

Nükleer enerji sürdürülebilir değil, zira dolaylı da olsa seragazı emisyonlarına yol açıyor, uranyum madenciliği nedeniyle büyük çevresel tahribat yaratıyor ve kaza durumunda son derece ağır sonuçlar doğuruyor.

Nükleer santral inşasına dair en sık dillendirilen gerekçelerden biri iklimi koruma iddiası. NS'ler fosil yakıtlı tesislerin aksine doğrudan seragazı emisyonu oluşturmadığı için kömür veya doğal-gaz santrallerine kıyasla emisyon oranları bir hayli düşük. Ancak NS'lerin yaşam döngüsü boyunca, yani uranyum madenciliği, yakıt üretimi ve santralin inşası gibi süreçler esnasında dolaylı da olsa seragazı emisyonları ortaya çıkıyor. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC) göre bu emisyonlar kilovat saat başına 4-110 gram CO₂ eşdeğeri (CO₂e) arasında değişmekte olup, ortalama değer 25 g CO₂e'dir.⁵⁵ Almanya Federal Çevre Ajansı'nın (UBA) yakın tarihli araştırmasına göre, rüzgar enerjisinde bu değer yaklaşık 9 gramken, güneş enerjisinde panelin hangi ülkede üretildiğine bağlı olarak kilovat saat başına 17-63 gram CO₂e arasında değişiyor.⁵⁶

Nükleer enerjinin düşük emisyonlu oluşu sıkça vurgulansa da uranyum madenciliğinin yarattığı korkunç çevre tahribatı çoğu zaman göz ardı ediliyor. Eski maden sahaları ve cevher atıkları rüzgarın taşıdığı radyoaktif toz nedeniyle geniş alanları radyasyonla kirletebilir. Yerinde (in-situ) liç adı verilen yöntemde yer altındaki cevher yataklarına asit ve baz çözeltileri enjekte edilerek

uranyumun kayadan ayrılması ve yüzeye pompalanması sağlanır. Ancak bu süreç yeraltı sularının zehirlenmesine yol açabilir. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın geride mutlaka radyoaktif atık kalır. Çoğu zaman şirketler madeni kaptıktan sonra bölgeden çekilir ve radyoaktif kalıntıların yükü bölge halkının omuzlarına bırakılır. Örneğin Fransız şirketlerin 1960 yılında Nijer'de işletmeye başladığı Cominak uranyum madeni 2021'de kapatıldığında geride 20 milyon ton radyoaktif atık bıraktı.^{57,58} Bölgedeki toprak ve su kaynakları bu nedenle kirlendi.

Ayrıca nükleer enerjiyle elektrik üretimi de yüksek düzeyli radyoaktif atık yaratır. Büyük kazalar meydana geldiğinde ise geniş bölgelerin tahliyesini gerektirecek ölçüde ağır çevresel yıkımlar ortaya çıkabilir.⁵⁹

Elektriğin iklim yükü

Farklı enerji kaynaklarının seragazı salımı
(kWh başına ortalama CO₂ eşdeğerleri, gram)

1038



liniyit

874



kömür

459



doğalgaz

335



biyogaz

31

güneş enerjisi
(FV)

25

nükleer enerji
basiñlı su reaktörü

9



rüzgar enerjisi

3

hidroelektrik santrali
akarsu tipi HES

13. Gerçek Nükleer enerji yaygınlaşmadan iklim hedeflerine ulaşmak mümkün mü?

İklim hedeflerine ulaşmak için nükleer enerjinin yaygınlaşması ne gerekli ne de gerçekçi. Çünkü nükleer enerji hem aşırı maliyetli hem de devreye girmesi için gereken süre çok uzun.

Küresel iklim senaryoları küresel ısınmayı 1,5 ya da 2°C ile sınırlamak için hangi yolların izlenebileceğini ortaya koyuyor. Bu senaryolar açıkça şunu gösteriyor: Küresel iklim hedeflerine ulaşmak ve 2050'ye kadar fosil yakıtları tamamen devreden çıkarmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı ve güçlü bir şekilde yaygınlaşması şart. Ancak bugün küresel elektrik üretiminde yalnızca yüzde 9 paya sahip nükleer enerjinin yaygınlaşması şart değil.⁶⁰ Bazı iklim senaryolarında sınırlı bir nükleer enerji payı bulunsa da seçenek yelpazesi tamamen nükleerden vazgeçmek ile nükleerin payının hafifçe artırılarak elektrik üretiminin yüzde 12 kadarına ulaşması arasında değişiklik gösteriyor.⁶¹ Ancak uzun inşaat süreleri ve yüksek maliyetler nedeniyle nükleer enerjinin payının daha yüksek bir orana ulaşması gerçekçi görünmüyor.

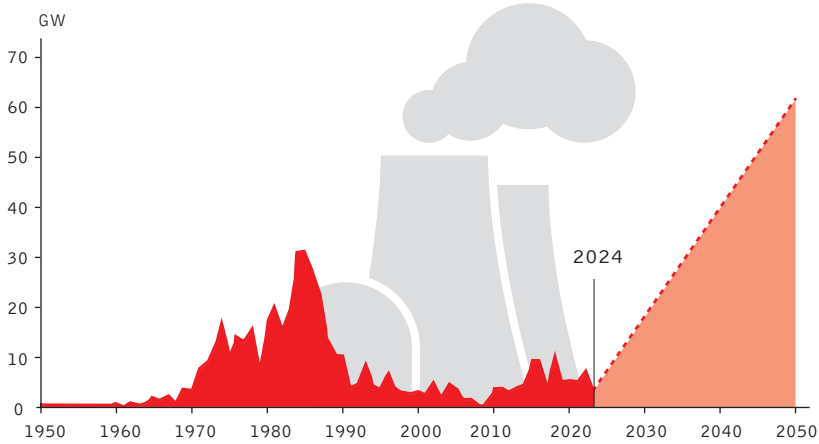
Senaryoların çoğunda nükleer santrallerin elektrik üretimindeki payı 2050'ye doğru hızla azalırken,⁶² yenilenebilir enerji kaynaklarının payı yüzde 70 ila 100'e kadar yükseliyor. İklim hedefleri dikkate alındığında, nükleer enerjinin yaygınlaşması, yenilenebilir enerjiye geçişten çok

daha maliyetli olmakla kalmayıp, uzun planlama, izin ve yaklaşık 10 yıllık inşaat süreçleri nedeniyle zamanlama açısından da hedeflere yetişmeyi mümkün kılmıyor.

Yine de 20 ülke, iklim koruma gerekçeleriyle 2050 yılına kadar küresel nükleer kapasitenin üç katına çıkarılması hedefi açıkladı.⁶³ Bu hedefe ulaşabilmesi için her yıl devreye giren nükleer kapasitenin hızla artması ve 2050 yılına gelindiğinde 60 GW'lık yeni kapasitenin şebekeye bağlanması gerekiyor.⁶⁴ Oysa nükleer enerjinin tarihsel olarak en hızlı büyüdüğü 1980'lerin ortasında bile yılda devreye alınan kapasite yaklaşık 30 GW ile sınırlı kalmıştı. Bu karşılaştırma hedeflenen büyümenin son derece gerçek dışı olduğunu gösteriyor. Dahası, mevcut nükleer santrallerin çoğu öyle yaşlanmış durumda ki bunların 2050'ye kadar kapatılması ve yenileriyle değiştirilmesi gerekecek. ABD gibi çok sayıda eski reaktöre sahip ülkelerde bile yeni nükleer projelerinin yok denecek kadar az olduğu düşünülürse, yenileme yapılmadığı takdirde nükleer enerjinin 2050'ye kadar gerilemesi kaçınılmaz görünüyor.

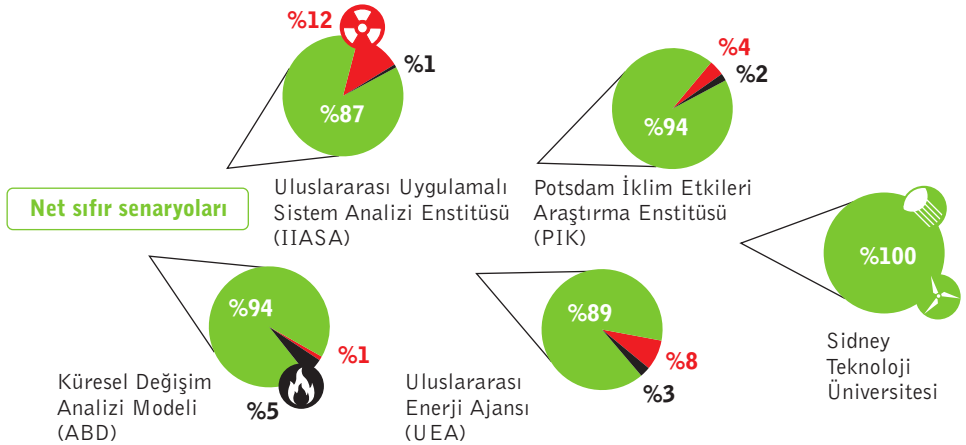
Nükleer enerjide yıllık kapasite artışları (GW)

1950'den bu yana kaydedilen yıllık şebeke bağlantılarıyla kıyaslandığında nükleer kapasitenin üç katına çıkması için gereken yıllık bağlantı miktarı



Net sıfır senaryoları

2050'de küresel elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payı (çeşitli senaryolara göre)



Kaynak: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_nuclear_in_international_energy_scenarios.pdf (Şekil 1)

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> ve https://www.ngfs.net/system/files/import/ngfs/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.pdf ve S. Teske, Achieving the Paris Climate Agreement Goals, 2019, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05843-2>

14. Gerçek Nükleer enerji net sıfır emisyonlu bir enerji sistemine geçişe katkı sağlayabilir mi?

Nükleer enerjinin bu geçişi destekleme kapasitesi oldukça sınırlı çünkü hem yapısal olarak esnek değil hem de maliyet açısından yenilenebilir enerji kaynaklarıyla rekabet edemez.

Geleceğin enerji sistemi büyük ölçüde rüzgar ve güneş enerjisinden oluşacak. Bu da elektrik üretiminin hava koşullarına daha bağımlı hale gelmesi demek; güneş enerjisi bakımından gün içinde, rüzgar enerjisi bakımından ise haftalık ölçekte ve mevsimsel olarak büyük dalgalanmalar yaşanacak. Dolayısıyla sistemin, elektrik depolama teknolojileri veya rüzgarsız ya da güneşsiz havalarda devreye girebilecek esnek santraller gibi, bu dalgalanmaları dengeleyebilecek çözümlere ihtiyacı olacak. Nükleer santraller ise bunun tam tersine, mümkün olduğunca sürekli ve tam kapasite çalışmaya yönelik tasarlandığı için hiç de esnek olmayan yapılarıyla üretimi kısa sürede artırma veya azaltma kapasitesine sahip değil. Buna karşılık, hidrojenle çalışabilen gaz santralleri sistemdeki değişen koşullara birkaç dakika içinde uyum sağlayabildiği için teknik olarak rüzgar ve güneş enerjisiyle çok daha iyi şekilde birleştirilebilir.

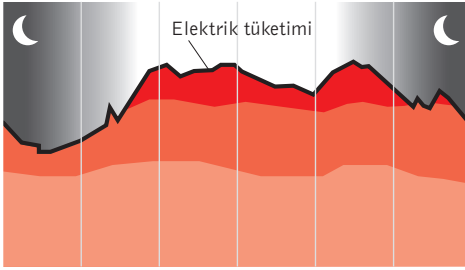
Bir başka önemli nokta da şu: Nükleer santrallerin esnek çalıştırılması – yani yenilenebilir enerji yeterli ve ucuz elektrik ürettiğinde reaktörlerin

üretiminin düşürülmesi – nükleer enerjiyi ekonomik açıdan sürdürülemez hale getirecektir. Fransız enerji şirketi EDF, sırf 2024’ün ilk yarısında yenilenebilir enerjinin elektrik fiyatlarını düşürmesi nedeniyle 8,1 milyar avro kayıp yaşadığını açıkladı.⁶⁵ Nükleer santrallerin yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle bir reaktörün üretimini azaltmak ya da geçici olarak kapatmak son derece pahalıya mal oluyor. Buna karşılık, batarya depolama sistemleri, hidrojen üretimi ve hidrojenle çalışan yedek gaz santralleri gibi çözümler yenilenebilir enerjinin yetersiz olduğu dönemleri telafi etmek açısından nükleere kıyasla çok daha düşük maliyetli seçenekler.

Düşük emisyon performansı tek başına yeterli değil: İklim hedeflerine ulaşmada belirleyici olan şey, yatırımların yıllık ve birim maliyet başına sağladığı emisyon azaltımıdır. Bu açıdan bakıldığında geleceğin enerji sisteminde yenilenebilir enerji kaynaklarındaki dalgalanmaları dengelemek için nükleer santrallere kıyasla çok daha ucuz, daha esnek ve daha az riskli yollar mevcut.

Fosil yakıtlı santraller ve yenilenebilir enerji sistemlerinde elektrik üretimi ve esnek santrallerin devreye girme süreleri

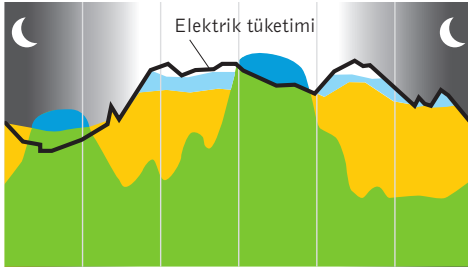
0:00 4:00 8:00 12:00 16:00 20:00 24:00



Baz yük üretim modeli

Fosil yakıtlı veya nükleer santraller elektrik sistemindeki baz yükü karşılamak için 24 saat sürekli tam kapasite çalışır.

- Tepe yük
- Orta yük
- Baz yük



Değişken yenilenebilir enerji üretimi

Elektrik üretimi gittikçe daha çok yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanıyor; bu kaynakların üretimi daha değişken ve öngörülmesi daha zor olduğundan, esnek santraller ve enerji depolama sistemleri ile dengelemesi gerek.

- Üretim fazlası (depolama veya ihracat için)
- Depolardan veya ithalattan gelen enerji
- İhtiyaç halinde devreye giren esnek santraller
- Değişken yenilenebilir enerji



10–20 dk.

Açık çevrim gaz türbini (OCGT)



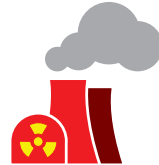
30–60 dk.

Kombine çevrim gaz türbini (CCGT)



1–10 saat

Kömür santrali



2–48 saat

Nükleer santral



Kaynakça

Pistner Neles, Kernenergie, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-24329-5>

Schneider, M. et al 2024, The World Nuclear Industry Status Report 2024, <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wmisr2024-v2.pdf>

M.V. Ramana, Nuclear is not the solution, https://www.versobooks.com/products/3013-nuclear-is-not-the-solution?_pos=1&_sid=1e2083dec&_ss=r

Lochbau vd., Fukushima. The story of a nuclear disaster, <https://www.ucsusa.org/resources/fukushima-story-nuclear-disaster>

Hahn Radkau, Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft, <https://www.oekom.de/buch/aufstieg-und-fall-der-deutschen-atomwirtschaft-9783865813152>

- 1 Energy Institute, Statistical Review of World Energy, 2024, <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>
- 2 Energy Institute, 2024, a.g.k.
- 3 Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), Power Reactor Information System, 2024, <https://pris.iaea.org/pris/>
- 4 M. Schneider vd., The World Nuclear Industry Status Report 2024, <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf>
- 5 Energy Institute, 2024, a.g.k.
- 6 B. Burger, 2024, Ein Jahr ohne Kernkraftwerke in Deutschland, Fraunhofer ISE, https://www.energy-charts.info/downloads/Ein_Jahr_ohne_Kernkraftwerke.pdf
- 7 B. Burger, 2024, a.g.k.
- 8 B. Burger, 2024, www.energy-charts.info, Haritalar: ithalat ve ihracat, 2023 ithalati: 17 TWh, https://www.energy-charts.info/charts/import_export_map/chart.htm?l=de&c=DE&year=2023&interval=year, 2023 toplam net elektrik üretimi: 486,3 TWh, https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&source=total&interval=year&year=2023.
- 9 B. Burger, 2024, Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2023, s. 58-59, https://www.energycharts.info/downloads/Stromerzeugung_2023.pdf.
- 10 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 11 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 12 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 13 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Public net electricity generation in France, 2024, https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=en&c=FR&interval=year&year=2022.
- 14 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 15 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 16 Euratom Tedarik Ajansı, 2023 Yıllık Raporu, Nihai Versiyon, Ağustos 2024, https://euratom-supply.ec.europa.eu/document/download/29018562-122c-4818-8774-2424fc029bf6_en?filename=ESA%20Annual%20Report%202023%20-%20Final%20draft.pdf.
- 17 Dünya Nükleer Birliği (WNA), Uranyum üretim rakamları 2015-2024, güncellenmiş veri 2025, <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-by-country>; Uranium One Group 2025, Our Operations, <https://uranium1.com/our-operations/#home>.
- 18 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 19 K. Gufler, F. Meister, Arkaplan Notu – Rosatom Aktivitäten und Verflechtungen, Umweltbundesamt Report REP-0814, 2022, Viyana, <https://www.umweltbundesamt.at/energie/kernenergie/hintergrundpapier-rosatom>.
- 20 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 21 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 22 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 23 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 24 <https://www.worldnuclearreport.org/Der-Welt-Statusreport>
- 25 M. Schneider vd., The World Nuclear Industry Status Report 2022, <https://www.worldnuclearreport.org/Europe-s-First-EPR-13-Years-Behind-Schedule-01kiluo-to-3-in-Finland-Starts-Up.html>.
- 26 M. Schneider vd., The World Nuclear Industry Status Report 2020, <https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Report-2020-HTML.html>; M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 27 WNN-world nuclear news, 3 Eylül 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/articles/edf-begins-start-up-process-for-flamanville-epr>.
- 28 M. Schneider vd., 2024, a.g.k., s. 221 ve devamı.
- 29 EDF <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/hinkley-point-c-update-1>.
- 30 EnBW, Kurumsal Strateji, 2024, <https://www.enbw.com/investoren/finanzstrategie/#unternehmensstrategie>

- 31** A. Wimmers, F. Böse, C. Kemfert, B. Steigerwald, C.v. Hirschhausen ve J. Weibezahn, Ausbaun von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen. DIW Haftalık Bülten 10/2023, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.867893.de/23-10-1.pdf.
- 32** M. Schneider vd., 2024, a.g.k.
- 33** Lazard, Levelized Cost of Energy, Haziran 2024, https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoepus-june-2024-_vf.pdf.
- 34** Lazard, 2024, a.g.k.
- 35** A. Polfliet, The high price tag of the lifetime extension of Doel 4 and Tihange 3, "Why nuclear won't save the climate" başlıklı konferansta yapılan sunum, 2024, <http://bondbeterleefmilieu.be/kalender/why-nuclear-wont-save-climate>.
- 30** Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Annual electricity spot market prices in Belgium, 2024, https://energy-charts.info/charts/price_average/chart.htm?l=en&c=BE&interval=year&year=2024.
- 37** Nükleer Enerjiden Çıkış Finansmanını İnceleme Komisyonu, Verantwortung und Sicherheit - Ein neuer Entsorgungskonsens, 2016, https://www.bundeswirtschaftsmisterium.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bericht-der-expertenkommission-kernenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=11.
- 38** C. Pistner, C. Küppers, S. Kurth, Reaktorsicherheit – Sicherheitskonzepte und Unfallrisiko, J. M. Neles, C. Pistner, Kernenergie. Eine Technik für die Zukunft? içinde, Springer Vieweg 2012.
- 39** Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenlik Dairesi, Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği (INES) Sistemi, <https://www.base.bund.de/de/nukleare-sicherheit/stoerfallmeldestelle/ines.html>.
- 40** Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenlik Dairesi, Çernobıl kazası, https://www.base.bund.de/en/nuclear-safety/nuclear-accidents/chernobyl/chernobyl_content.html.
- 41** Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenlik Dairesi, On yıl sonra Fukushima: Felaket ve sonuçları, https://www.base.bund.de/en/nuclear-safety/nuclear-accidents/fukushima/fukushima_content.html.
- 42** Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Kerntechnische Sicherheit im Ukraine-Krieg, <https://www.grs.de/de/aktuelles/Infobereich-Ukraine; V. Ustohalova ve M. Englert, Nükleare Sicherheit in Krisengebieten. Öko-Institut e.V., 2017, https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Nukleare-Sicherheit-in-Krisengebieten.pdf>.
- 43** Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire: Méthodologie appliquée par l'IRSN pour l'estimation des coûts d'accidents nucléaires en France, https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports_expertise/IRSN-PRP-CRI-SESUC-2013-00261_methodologie-cout-accident.pdf.
- 44** G.S. Jones, Reactorgrade plutonium and nuclear weapons. Exploding the myths. Nonproliferation policy education center (NPEC), 2018; E. Kankeleit, C. Küppers ve U. Imkeller, Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium. Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft (IANUS), Technik und Sicherheit, Darmstadt Technik Üniversitesi. Çalışma Raporu 1/1989
- 45** Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenlik Dairesi, Almanya'daki radyoaktif atıklar, https://www.endlagersuche-info-plattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/info-broschueren/flyer-abfall-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- 46** Yüksek Düzeyli Radyoaktif Atıklar için Nihai Depolama Sahasının Aranması ve Seçilmesinin İlişkin Kanun (StandAG), https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html.
- 47** StandAG, a.g.k.
- 48** Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenlik Dairesi, Bundesgesellschaft für Endlagerung: Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens, Eylül 2022, https://www.base.bund.de/shareddocs/ip6/base/de/20221028_Zusammenfassung_Rahmenterminplanung_und_Zeitschaetzungen.pdf.
- 49** Öko-Institut e.V., BASE saha seçim süreci analizine (PaSta) yardımcı bilgi notu, Almanya Federal Nükleer Atık Yönetimi Güvenlik Dairesi adına, Temmuz 2024, https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/fachinfo/fa/pasta_abschlussbericht.pdf.

- 50** Almanya Nükleer Atık Bertaraf Fonu, <https://www.kenfo.de/start>.
- 51** C. Pistner, M. Englert, C.v. Hirschhausen, F. Böse, B. Steigerwald, L. Gast, R. Donderer, Sogenannte "neuartige" Reaktor-konzepte, Öko-Institut e.V., Şubat 2024, <https://www.oeko.de/publikation/analyse-und-bewertung-des-entwicklungsstands-der-sicherheit-und-des-regulatorischen-rahmens-fuer-sogenannte-neuartige-reaktor-konzepte/>
- 52** C. Pistner, M. Englert, C. Küppers, B. Wealer, B. Steigerwald, C.v. Hirschhausen, R. Donderer, Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors), Öko-Institut e.V., Mart 2021, <https://www.oeko.de/publikation/sicherheitstechnische-analyse-und-risikobewertung-einer-anwendung-von-smr-konzepten-small-modular-reactors/>
- 53** M.V. Ramana, "The Forgotten History of Small Nuclear Reactors", IEEE Spectrum, Nisan 2015, <https://spectrum.ieee.org/the-forgotten-history-of-small-nuclear-reactors>.
- 54** B. Steigerwald, J. Weibezahn, M. Slowik, C.v. Hirschhausen, Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors, Energy, Volume 281, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ener.2023.128204>.
- 55** IPCC 2014: İklim Değişikliği 2014 İklim Değişikliğinin Azaltılması – Çalışma Grubu III, IPCC 5. Değerlendirme Raporuna Katkı.
- 56** J. Hengstler, M. Russ, A. Stoffregen, A. Hendrich, S. Weidner, M. Held, A.K. Briem, Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Umweltbundesamt, Abschlussbericht, 2021, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf.
- 57** Nuclear Free Foundation vd., Uranatlas: Daten und Fakten über den Rohstoff des Atomzeitalters, 2022, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/Uranatlas_2022_2.pdf.
- 58** CRIIRAD, 12 Ocak 2023, <https://www.criirad.org/orano-au-niger-des-millions-de-tonnes-de-dechets-radioactifs-non-confines-une-epee-de-damocles-pour-l'alimentation-en-eau-potable-de-plus-de-100-000-personnes/>
- 59** C. Pistner, M. Englert, "Nuclear Power and the do no significant harm" criteria of the EU Taxonomy. Öko-Institut Çalışma Belgesi, Nisan 2021, <https://www.oeko.de/publikation/nuclear-power-and-the-do-no-significant-harm-criteria-of-the-eu-taxonomy/>; C. Pistner, M. Englert, B. Wealer, Sustainability at risk. A critical analysis of the EU Joint Research Centre technical assessment of nuclear energy with respect to the "do no significant harm" criteria of the EU Taxonomy Regulation, Heinrich-Böll-Stiftung, Eylül 2021, https://eu.boell.org/sites/default/files/2021-09/Sustainability_at_risk_2021_final_0.pdf?dimension1=ecology.
- 60** Energy Institute, 2024, a.g.k.
- 61** Umweltbundesamt 2023, What is the role of nuclear energy in achieving climate targets in global scenarios?, C. Loreck, C. Pistner, A. Herold ve L. Rausch, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_nuclear_in_international_energy_scenarios.pdf; Network For Greening the Financial Systems (NGFS – Finansal Sistemi Yeşillendirme Ağı), NGFS Scenarios for central banks and supervisors, Eylül 2022, https://www.ngfs.net/system/files/import/ngfs/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.
- 62** Umweltbundesamt 2023, a.g.k.

63 Nükleer Enerji Ajansı,
Countries launch joint declaration to
triple nuclear energy capacity by
2050 at COP28, 2 Aralık 2023,
[https://www.oecd-nea.org/jcms/
pl_88702/countries-launch-joint-de-
claration-to-triple-nuclear-energy-
capacity-by-2050-at-cop28](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_88702/countries-launch-joint-declaration-to-triple-nuclear-energy-capacity-by-2050-at-cop28).

64 Umweltbundesamt 2023,
a.g.k.

65 M. Schneider vd., 2024, a.g.k.,
Şekil 58.

Tüm kaynaklar en son 21.11.2025
tarihinde kontrol edilmiştir.

Künye

Yayıncı: Heinrich Böll Stiftung Derneği Türkiye Temsilciliği
info@tr.boell.org
https://tr.boell.org/tr

Almanca metin: Anke Herold, Anna Kopp, Christoph
Pistner (Öko-Institut e.V.)
Proje ve içerik yönetimi: Anna Brehm
Yayına hazırlayan: Rita Hoppe ve Stephan Stoll
(Heinrich Böll Stiftung Derneği)
Çeviri: Defne Orhun
Editör: Özgür Gürbüz

Tasarım ve infografikler: Heimann + Schwantes, Berlin

Baskı: XXX

Almanya Basın Yasası uyarınca sorumlu: Annette Maennel,
Heinrich-Böll-Stiftung
Bu materyal Creative Commons "Atıf 4.0 Uluslararası"
lisansına tabidir (CC BY 4.0).

Heinrich Böll Stiftung Derneği yayınları seçim kampanyası
amaçlarıyla kullanılamaz.

Sipariş ve indirme adresleri:
info@tr.boell.org
https://tr.boell.org/tr/2026/01/26/nukleer-enerji

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

© Heinrich Böll Stiftung

Etkinliklerimiz, yayınlarımız, burs programlarımız ve
partnerimizden haberler olmak istiyorsanız iki ayda bir
yolladığımız e-bültenimize abone olmayı unutmayın.
Bizi şu kanallardan da takip edebilirsiniz:
https://tr.boell.org/tr/bultenin



@heinrichboellturkiye



@boell-tr



@HeinrichBoellTR



@heinrichboelltr.bsky.social



@heinrichbollstiftungdernegi



@tr.boell.org

