

Elektrik Santralleri Neden Tüm Isıl Enerjiyi Elektriğe Çeviremezler?

Yüksel Atakan, Radyasyon Fizikçisi ybatakan4@gmail.com, 22.01.2026 /1/

1200 MWe Akkuyu ve 1,2 MW SMR Reaktörleri İçin Karşılaştırmalı Açıklamalar ve Hesaplar

Kentlerde kurulabilen SMR’lerde atık ısı enerjisi de kullanılabildiğinden verim büyük reaktörlere göre %35’den iki katına yükselebilir. Bu büyük bir avantajdır.

1. Giriş

Elektrik üretim santralleri, enerji kaynağı ne olursa olsun (nükleer, kömür, doğal gaz), temelde **ısı enerjisi üreten sistemlerdir**. Elektrik enerjisi, bu ısı enerjisinin bir bölümünün **ısı makineleri** (buhar türbini, gaz türbini vb.) aracılığıyla mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilir.

Bu yazımızda, **1200 MWe kapasiteli (kurulu güçlü) bir Akkuyu Nükleer Güç Reaktörü (VVER-1200)** ile **1,2 MW elektrik gücündeki bir Küçük Modüler Reaktör (SMR)** karşılaştıracız. Karşılaştırmada:

- Uranyum yakıt kullanımı,
- Filyon (U235 atom çekirdeğinin bölünmesi) kaynaklı ısı enerjisi üretimi,
- Isı enerjisinin elektriğe dönüşüm sınırları,
- Atık ısı enerjisinin kojenerasyon yoluyla kullanımı ayrıntılı ve matematiksel olarak ele alacağız.

2. Nükleer Reaktörde Isı Enerjisinin Oluşumu

Nükleer reaktörlerde enerji, **U235 çekirdeklerinin nötronların etkisiyle bölünmesi (filyonu)** sonucu, özellikle ortaya çıkan bölünme ürünlerinin kinetik enerjilerinin suya aktarılmasıyla, açığa çıkar. Her bir bölünmede yaklaşık **200 MeV** enerji ortaya çıkar. Bu enerjinin dağılımı yaklaşık olarak şöyledir:

- %80–85 → **Bölünme ürünlerinin kinetik (hareket) enerjisi**
- %5–7 → Anında gama ışınları
- %5 → Nötronların kinetik enerjisi
- Kalan → Beta bozunmaları ve gecikmiş gama ışınları

Bölünme ürünleri yüksek hızlarla çevredeki **su molekülleriyle çarpışarak** kinetik enerjilerini yitirirler. Bu süreç sonunda enerji **mikroskobik düzeyde düzensiz moleküler harekete**, yani **ısı enerjisine** dönüşür.

Önemli nokta:

Reaktörde doğrudan “elektrik” üretilmez. Önce U235 çekirdek bölünmesi → kinetik enerji → **ısıl enerji**, ardından ısıl enerji → mekanik → elektrik dönüşümü gerçekleşir.

3. Enerji Dengesi ve Elektriksel Verim

Bir nükleer santral için basitleştirilmiş enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$P_{\text{ısıl}} = P_{\text{el}} + Q_{\text{atık}}$$

Elektriksel verim:

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{ısıl}}}$$

Burada:

- $P_{\text{ısıl}}$: Reaktörde üretilen toplam ısıl güç (1 sn enerji)
- P_{el} : Elektrik gücü
- $Q_{\text{atık}}$: Çevreye verilen atık ısıl enerji

Akkuyu (VVER-1200) Örneği

- Isıl güç: $\approx 3200 \text{ MW}_{\text{th}}$
- Elektrik gücü: $\approx 1200 \text{ MW}_e$

$$\eta \approx \frac{1200}{3200} \approx 0,37$$

Yani üretilen ısıl enerjinin yalnızca %35–37’si elektriğe dönüşebilmektedir.

4. Termodinamik Sınır: Carnot Verimi

Bu sınırlamanın temel nedeni **Termodinamiğin İkinci Yasasıdır**.

İki sıcaklık arasında çalışan herhangi bir ısı makinesinin kuramsal üst sınırı **Carnot verimi** ile belirlenir:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{soğuk}}}{T_{\text{sıcak}}}$$

Akkuyu’daki gibi hafif su reaktörlerinde tipik olarak:

- $T_{sıcak} \approx 580 \text{ K}$
- $T_{soğuk} \approx 300 \text{ K}$

Bu durumda kuramsal üst sınır

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{soğuk}}{T_{sıcak}} = 1 - 300/580 \approx \%48 \text{ dir.}$$

Gerçek santrallerde ise:

- Türbin kayıpları
- Pompa ve sürtünme kayıpları
- Isı değiştirici kayıpları

nedeniyle pratik verim **%35–37** düzeyine iner.

5. Uranyum Yakıt, Zenginleştirme ve Fisyon Oranı

Nükleer yakıt genellikle **%3–5 U235** oranında zenginleştirilmiş uranyumdan oluşur.

1200 MWe VVER-1200 için tipik değerler

- Reaktör çekirdeğindeki toplam yakıt: $\approx 90 \text{ ton}$
- Ortalama zenginleştirme: $\approx \%4,5$
- Çekirdekdeki toplam U-235 miktarı: $\approx 4 \text{ ton}$
- Her yıl değiştirilen yakıt: $\approx 20\text{--}25 \text{ ton}$

Yılda bölünen U 235 miktarı $\approx 1\text{--}1,3 \text{ ton}$.

Bu miktar yalnızca o yıl yüklenen yakıttan değil, **önceki yıllardan çekirdekte bulunan yakıtın fisyonu devam etmesinden** kaynaklanır.

1,2 MW SMR için

- Yıllık yakıt değişimi: $\approx 0,25\text{--}1 \text{ ton}$
- Yıllık fisyonu uğrayan U-235: $\approx 1\text{--}2 \text{ kg}$

6. Isıl Enerjinin Elektrik Dönüşümünün Evrensel Sınırı

(Nükleer – Kömür – Doğal Gaz Karşılaştırması)

Isıl enerjinin elektrikle dönüşüm oranı **yalnızca nükleer santrallara özgü değildir.**

Santral Türü

Isıl → Elektrik Verimi

Santral Türü	Isıl → Elektrik Verimi
Nükleer (LWR)	%33–37
Kömür (klasik)	%33–38
Doğal gaz (kombine çevrim)	%55–62
Kuramsal üst sınır (Carnot)	%45–60 (koşullara bağlı)

Kömür ve gaz santrallerinde de:

- Yakıtın kimyasal enerjisi → **ısıl enerji**
- Isıl enerji → türbin → elektrik

dönüşümü gerçekleşir.

Dolayısıyla **ısıl enerjinin yalnızca bir bölümünün elektrığe dönüşebilmesi**, tüm termik santraller için **evrensel bir fizik yasasının sonucudur**.

7. Atık Isıl Enerji ve Kojenerasyon

Nükleer santrallerde üretilen ısıl enerjinin yaklaşık **%65–70'i atık ısıl enerji** olarak açığa çıkar.

Büyük Reaktörler (Akkuyu)

- Yerleşim merkezlerinden uzakta kurulumlar
- Uzun yerlere ısıl enerjinin taşınması ekonomik değildir
- Kojenerasyon potansiyeli sınırlıdır (aynı anda elektrik ve ısıl enerji üretip yararlanmak)

SMR'ler

- Daha düşük güç
- Pasif güvenlik
- Yerleşim alanlarına daha yakın konumlandırılabilmesi

Bu nedenle **bölgesel ısıtma (district heating)** için daha uygundur.

Toplam verim:

$$\eta_{toplam} = \frac{P_{el} + Q_{kullanılan\ ısı}}{P_{ısıl}}$$

SMR tabanlı kojenerasyon sistemlerinde:

- **Toplam enerji verimi %70–85 düzeylerine yükselebilmektedir.**

8. Genel Karşılaştırma Tablosu

Parametre	Akkuyu (1200 MWe) SMR (1,2 MW)
Elektriksel verim	%35–37 %35
Atık ısı enerjisi	%65–70 %65–70
Kent içi ısıtma	Uygun değil Uygun
Kojenerasyon potansiyeli	Düşük Yüksek

9. Sonuç

Nükleer reaktörlerde U 235 bölünmesiyle açığa çıkan enerji, öncelikle **bölünme ürünlerinin kinetik enerjisi** olarak ortaya çıkar ve bu enerji su molekülleriyle çarpışmalar sonucu **ısıl enerjiye** dönüşür. Bu ısıl enerjinin yalnızca yaklaşık **%35'i elektrik enerjisine** çevrilebilir.

Bu durum nükleer santrallara özgü olmayıp, kömür ve doğal gaz santrallerinde de geçerli olan **termodinamik bir sınırdır**. Ancak özellikle **SMR teknolojilerinde**, atık ısı enerjinin kojenerasyon yoluyla değerlendirilmesine olanak sağlayarak enerji sistemlerinin toplam verimi iki katına yükseltilebilir.

Kaynakça/I/

1. World Nuclear Association, *How a Nuclear Reactor Works*
2. World Nuclear Association, *Thermal Efficiency of Nuclear Power Plants*
3. IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*
4. Nuclear-Power.com, *Fuel Consumption of Conventional Reactors*
5. Çengel & Boles, *Thermodynamics – An Engineering Approach*
6. YZ