

## **TİCARİ NÜKLEER SANTRAL MODELLERİNİN YAKIT MASRAFLARINA GÖRE ELEKTRİK ÜRETİM MALİYETLERİNİN DEĞERLENDİLMESİ**

Nimeti DÖNER<sup>1</sup>

**ÖZET :** Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri, üretim tükettikleri enerji ile ölçülür. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesinin enerji raporuna göre ülkemiz için 2010 yılındaki elektrik ihtiyacının karşılanması için toplam 2000 MW(e) kapasiteli nükleer santralin kurulmasına ihtiyaç olduğu açıklanmıştır. Türkiye’de kurulması düşünülen Nükleer Elektrik Santrali için basınçlı su reaktörü (PWR), kaynar su reaktörü (BWR), basınçlı ağır su reaktörü CANDU (PHWR) olmak üzere üç tip ticari reaktör modeli sözkonusudur. Bu makaledeki amacımız bu modelleri kWh üretimde yakıt maliyeti açısından karşılaştırarak Türkiye için nükleer enerjinin gerekliliğini göstermektir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Nükleer Santrallar, PWR, BWR, CANDU

## **EVALUATION OF ELECTRICITY PRODUCTION COST OF COMMERCIAL NUCLEAR POWER PLANT MODELS**

**ABSTRACT :** The level of the development of countries is being measured by the country’s quantity of production and consumption energy. Concerning Turkey, according to an energy report of The World Energy Council Turkish National Committee in order to meet the electricity needs of the country in 2010, there should be founded a 2000 MW(e) capacity nuclear power plant. For the nuclear electric power plant considered to be founded in Turkey, three types of commercial reactor models, that are Pressiued Water Reactor (PWR), Boiling Water Reactor (BWR) and Pressiued Heavy Water Reactor CANDU (PHWR), can be considered. Our aim in this article is to prove the necessity of nuclear energy in Turkey by comparing these three models in terms of kWh cost.

**KEYWORDS:** Nuclear power plants, PWR, BWR, CANDU

---

<sup>1</sup> Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, KÜTAHYA

## ***I. GİRİŞ***

Nükleer enerjinin kullanılmaya başlamasından bugüne dek geçen yaklaşık elli yıl içinde bir çok nükleer reaktör tipi tasarlanmış, imal edilmiş ve çalıştırılmıştır; ancak günümüzde ticari olan nükleer santral tipleri çok az sayıdadır. Hafif su teknolojisi olarak adlandırılan normal su ile soğutulan reaktörleri kapsayan teknoloji ve ağır su teknolojisi adını verdiğimiz hidrojenin bir izotopu olan deuteriyumdan yapılan ağır su ile soğutulan reaktörleri kapsayan teknoloji, günümüzde ticari olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan gaz soğutmalı reaktörler ve sıvı metal soğutmalı hızlı üretken reaktörler ise, gelecekte kullanıma girmeye adaydır.

Ülkemizin gelişmesine paralel olarak artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için çeşitli enerji kaynakları, özellikle nükleer enerji kaçınılmaz olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde yapımı düşünülen Nükleer Santralın, Atatürk barajının ürettiği elektrik enerjisinden daha fazla elektrik enerjisi üretmesi planlanmaktadır. Bu boyuttaki bir yatırımın hem ülkemizin hem de santral çevresindeki yerleşim birimlerinin ekonomik ve teknolojik gelişimine önemli katkıları olacağı kesindir. Türkiye'nin hidrolik ve kömüre bağlı elektrik üretim kapasitesi 245 milyar kWh ile sınırlıdır. 2005-2010 yılları arasında Türkiye'nin elektrik enerji talebi bu miktarı aşacak ve yıllık yaklaşık %8 talep büyümesi ile 300 milyar kWh civarına ulaşacaktır. Bu ihtiyacın 2000 MW(e)'lık kısmını nükleer santralın karşılaması planlanmaktadır.

## ***II. ANALİZ***

Elektrik üretimi için kullanılan nükleer santralların büyük bir bölümü Basınçlı su reaktörü (PWR), kaynar su reaktörü (BWR), basınçlı ağır su reaktörü (PHWR)'dir. Bunlardan ilk ikisi, hafif su soğutmalı termal reaktör sınıfına girer. Üçüncü reaktör tipi ise, dünyada ilk olarak Kanada'da elektrik üretimi için kurulan, Basınçlı ağır su reaktörü olan CANDU (PHWR) modelidir [1].

1994 yılı sonu itibari ile dünya çapında çalışan 432 nükleer santralın toplam üretim kapasitesi 340 347 MW(e) olup, dünya elektrik kapasitesinin %17'sini karşılamaktadır. Batı Avrupa'da çalışan reaktör sayısı 150, Doğu Avrupada 66, Kuzey Amerika'da 131, Latin Amerika'da 5, Orta Doğu'da 10, Güney Afrika'da 2 ve Uzak Doğu'da 68 halen çalışan nükleer santraller vardır. Bu çalışan toplam santrallerin %57'si basınçlı su reaktörü (PWR) modelindedir. Kaynar su reaktörü (BWR) modeli santraller ise toplam

santrallerin %27'sini oluşturur ve çoğunlukla Batı Avrupa ve Amerika'da kurulmuştur. İngiltere ve Japonya'da ticari olmayan modeldeki nükleer santrallerin toplam kapasitesi yaklaşık %8'dir. Basınçlı ağır su reaktörü sınıfına giren CANDU modelinin sayısına baktığımızda diğer modellere göre %7.6 gibi oldukça az olduğu ve çoğunluğunun Kanada'da inşa edilmiş, dünya çapındaki uygulamalarında ise, genelde Arjantin, Romanya, Hindistan, Pakistan, Güney Kore gibi gelişmekte olan ülkelerde olduğu görülmektedir [2].

BWR tipi reaktörler bir çok yönden PWR reaktörlerine benzemekle birlikte, temel fark reaktör kuru içinde kaynama olayına izin verilmesidir. Bu modelin diğer hafif sulu reaktörlere göre üstünlüğü reaktör kuru içinde elde edilen buharın doğrudan tribünlere gönderilmesidir.

Yakıt elemanı temini açısından CANDU, PWR ve BWR modellerinin her üçünde de dışa bağımlılık söz konusudur. CANDU modelinde kullanılan doğal uranyum yakıtının giriş zenginliği %0.71 ve yakıt verimi %50'dir. PWR modelindeki santralde yakıt zenginliği %3 ile %3.2, BWR modelindeki santralde ise %2.5 ile %3'tür. PWR ve BWR nükleer santrallerinde zenginleştirilmiş uranyum kullanıldığı için yakıt verimi daha fazladır. CANDU modeli santrallerin yakıt tüketimleri basınçlı su reaktörlerine göre yaklaşık dört kat daha fazladır.

Atık yakıt saklama yönünden karşılaştırıldığında, CANDU modellerinde santral çalışırken periyodik olarak sürekli yakıt değişimi söz konusu olduğu için büyük bir saklama deposuna ihtiyaç vardır. PWR modelinde ise yakıt değişimi 3-4 ayda bir olup tekrar işleme tabi tutulmaktadır ve daha az atık yakıt olmaktadır. Bu sebeple CANDU modelindeki gibi çok fazla depolama havuzlarına gerek kalmamaktadır. Böylece maliyet oldukça azalmaktadır.

PWR tipi santrallerde herhangi bir kaza anında reaktör korunun soğutulmasını sağlamak için kullanılan güvenlik sistemleri genellikle yüksek ve alçak basınçta çalışan sistemler ve akümülatorlerden oluşur. Akümülatorler, 3-4.5 MPa'da azotla basınçlandırılmış boronlu soğuk su bulunan büyük hacimli tanklardır. Ayrıca yedek besleme suyu sistemi, kazanlar veya reaktörün durdurulması sırasında buhar üreteçlerinden ısı çekilmesini sağlamak için kullanılır.

BWR modeli reaktörler, olası bir kaza durumunda reaktörün güvenli bir şekilde durdurulması için gerekli donanımlara sahiptir. Reaktörde oluşan herhangi bir geçiş sırasında düşük basınç su injeksiyon sistemi, bağımsız düşük ve yüksek basınç yağmurlama sistemleri ve yoğuşma havuzu sistemi ile sistemin bütünlüğünün korunması sağlanmaktadır. Reaktör koruma kabı ile de radyasyonun atmosfere sızması engellenmektedir.

CANDU tipi santraller oldukça karmaşık sistemlerden meydana gelmektedir. Güvenlik felsefesi açısından bu durum iyi karşılanmamaktadır. Karmaşıklığa rağmen, bu sistemler iki bağımsız bilgisayar sistemi tarafından kontrol edilmektedir ve her iki bilgisayar sistemi tek başına tüm kontrolü gerçekleştirebilecek yetenekte tasarlanmıştır. İkisi de devre dışı kalırsa reaktör güvenli bir şekilde kapanmaktadır. Bu yüzden sistemlerin karmaşık olması güvenlik açısından fazla bir önem arz etmemektedir [3-6]. İncelendiğinde CANDU tipi santrallerin bütün güvenlik felsefelerine çok iyi şekilde uyularak tasarlandığı görülmektedir. Çeşitlilik, paralel yedekli olma, fiziksel ayrılma, güvenli bölgede kalma, otomatik kontrol gibi tasarım ilkeleri tam olarak yerine getirilmiştir.

Bunların dışında CANDU modeli santrallerin termik verimi %29-31, PWR ve BWR modeli santrallerde ise termik verim %33'tür. Bu da PWR ile BWR modellerinin daha efektif olduğunu göstermektedir. CANDU reaktörleri , sahip oldukları değişik avantajlardan dolayı nükleer teknolojiye sahip olmak isteyen ülkelerin ilgisini çekmiştir. 2000 yılında devreye girecek CANDU reaktörlerinde üretilen elektriğin maliyetinin büyük bir kısmını yatırım maliyeti belirlemektedir ve toplam maliyetin %56.5'lik bölümünü oluşturmaktadır. Yakıt maliyeti toplam maliyetin %22.5 bölümü olup %21'lik kısmını da işletme ve bakım maliyeti oluşturmaktadır.

Bir santralde üretilen enerjinin kWh maliyeti üç ana kalemden oluşur [7,8].

1. Yıllık Sermaye Masrafları: Santralin toplam yatırım masraflarının, santralin ömrü dikkate alınarak çeşitli amortisman metotlarıyla bulunan ve bir yıla isabet eden masraflardır. Buna sabit masraflar da denir.

Yatırımdan gelen yıllık sermaye (sabit) masrafları aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$C_s = \frac{Y_T \times K}{E} \quad (1)$$

Bu işlem yapılırken bugünkü değer metodu kullanılmaktadır.

2. Yakıt Masrafları: Nükleer santrallarda yıllık yakıt masrafı

$$C_y = \frac{P_e \times 365 \times 24 \times LF \times (N_y - N_i)}{\eta \times B_u} \quad (2)$$

Santralin termik gücü

$$P_t = \frac{P_e}{\eta} \quad (3)$$

Yıllık Yakıt yükleme miktarı

$$T_y = \frac{P_t \times 365 \times 24 \times LF}{B_u} \quad (4)$$

Sermaye itfa faktörü

$$C_t = \frac{d}{1 - (1 + d)^{-m}} \quad (5)$$

İlk yükleme miktarı

$$T_i = \frac{P_t}{P_s} \quad (6)$$

İlk yüklemeden gelen yıllık sabit masraflar

$$M_y = (T_i - T_y) \times N_y \times C_t \quad (7)$$

Faizler

$$I_y = T_y \times i \times [N_y(0.5 + k_1) + N_i(0.5 + k_2)] \quad (8)$$

kWh başına yakıt maliyeti

$$Y_K = \frac{C_y + M_y + I_y}{P_e \times 365 \times 24 \times LF} \quad (9)$$

formülleri ile hesaplanır.

3. İşletme ve Bakım Masrafları: Bir nükleer santralde işletme ve bakım masrafları toplam üretim maliyetinin küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bununla beraber işletme ve bakım masraflarını sermaye ve yakıt masrafları gibi genel formüllerle ifade etmek mümkün değildir. Santral tipine ve gücüne, işletme şartlarına, santrali işleten kuruluşun yapısına, genel muhasebe sistemine bağlı olarak değişmektedir.

Yakıt masraflarına göre hesaplama yapılacağı için formüller (2)-(9) kullanılır ve faiz oranı %9 ile iskonto haddi %5 ve sermaye itfa faktörü  $C_i = 0.065$  alınır. CANDU modeli için ünite başına kurulum gücü standard 630 MW(e), PWR ve BWR modeli için 600 MW(e) alınarak, işlemler yapılmış ve her üç santral modeli için bir kıyaslama çizelgesi Tablo 1'de oluşturulmuştur. Burada uranyumun spesifik gücü  $P_s = 30$  kW/kg'dır. Basınçlı su reaktörlerinin işletim deneyleri ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir. PWR modeli için ortalama yıllık yük faktörleri %65-87 arasındadır. BWR modelinde ortalama yıllık yük faktörleri %70'lerin üzerindedir. Hesaplamalarda hafif sulu reaktörlerinin yük faktörü %80, CANDU modelinin yük faktörü %70 alınmıştır. Santralin yük faktörü ne kadar büyük olursa, yıllık ürettiği enerjide o kadar fazla olur. Doğal uranyumun fiyatı 60\$, zenginleştirilmiş taze yakıt fiyatı 100\$ ve kullanılmış yakıt fiyatı (atık tasfiyesi şeklinde) 47\$ olarak hesaplamalarda kullanılmıştır [9].

**Tablo 1.** Üç nükleer santral modeli için yakıt maliyetlerinin kıyaslanması

	<b>CANDU</b>	<b>PWR</b>	<b>BWR</b>
$P_i(MWe)$	2032.3	1818.2	1818.2
$T_i(ton)$	67.7	60.6	60.6
$T_y(ton)$	51.92	16.09	18.6
$C_y(\$)$	675015	852672	987305
$M_y(\$)$	61542	289315	272805
$I_y(\$)$	393221	165302	191397
$Y_k(cent / kWh)$	0.03	0.031	0.035

Faiz oranı ile iskonto haddi %7 ve sermaye itfa faktörü  $C_i = 0.0805$  olarak ele alındığında üç tip nükleer santralin kWh başına yakıt maliyetlerinin değişmediği, ayrıca uranyumun spesifik gücü  $P_s = 22.5$  kW/kg olduğunda da sonuçların aynı kaldığı görülmektedir. Her üç santral modeline genel olarak baktığımızda; yıllık yakıt yükleme miktarı açısından CANDU modelinin diğer modellere göre yaklaşık üç katı değere sahip olduğu görülür. PWR ve BWR tipi nükleer santralleri kendi aralarında kıyasladığımızda ilk yüklemeye gelen yıllık sabit masraflar hariç diğer hesaplama sonuçlarına göre, PWR modeli daha ekonomik sonucu vermektedir. Yine PWR modeli nükleer santralde ünite gücü 900 veya 1200 MW(e) olması durumunda tüm hesaplama kriter değerleri artmasına rağmen elde edilen kWh başına yakıt maliyeti hemen hemen aynı kalmaktadır.

Petrol krizinden sonra artan petrol fiyatlarına paralel olarak uranyum fiyatları da 1980'li yıllara kadar hızla artmış ve daha sonra ortaya çıkan arz fazlalığı nedeniyle, %50'den fazla düşüş göstermiştir [10]. Buna göre yakıt fiyatları 1990 öncesindeki gibi yüksek seviyelerde olsaydı, yakıt fiyatı 400\$ ve kullanılmış yakıt fiyatı (atık tasfiyesi şeklinde) 50\$ olarak hesaplamalarda kullanılırsa; PWR ve BWR modellerindeki elektrik üretim maliyeti 3 cent/kW-saat'e yükselecektir. Bu durumda diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında nükleer elektrik, yüksek yatırım maliyeti ve düşük yakıt maliyeti ile ifade olunabilir. Yani nükleer enerjiyi ekonomik kılan faktör düşük yakıt fiyatlarıdır.

1995 yılında ABD’de, işletmedeki 109 Nükleer Santralın sermaye payı hariç elektrik üretim maliyeti (sökme, atık depolama dahil) kW-saat başına 2 cent olmuştur. Bu üretim maliyetini ABD’de 1.1 cent/kW-saat’e düşüren işletmeler de bulunmaktadır. Bunun üzerine 2-2.5 cent/kW-saat sermaye payı eklense bile üretim maliyetleri doğal gaz ve termik santralleri ile rekabet edebilmektedir. İthal kömür ile elektrik üretim maliyeti 4.6 cent/kWh ve doğal gaz ile 3.5-4 cent/kWh’tir [11].

### ***III. SONUÇLAR***

Nükleer santraller genel olarak ilk yatırım maliyetleri yüksek, yakıt ve işletme giderleri düşük santrallerdir. Yatırım maliyetleri ise, elektrik maliyetinin yarısından fazlasına denk gelmektedir. Yine de, nükleer santrallerden elde edilen elektrik, termik ve hidrolik santrallara göre daha ucuz olmaktadır.

Nükleer Santrallerin tarihi gelişim sürecinde, karşılaşılan tasarım sorunlarının giderilerek, daha kompleks kontrol sistemleriyle donatılması sonucu, her üç santral modeli de güvenli çalışma bakımından eşdeğer kabul edilebilir.

Burada hesaplanan maliyetler, belirli bir reaktör tipi ve çalışma koşulları göz önüne alındığında doğrudan tahmin maliyetlerdir. Tablo 1’e göre kWh başına yakıt maliyeti açısından incelenen modelleri kıyasladığımızda, santrallerin kurulduktan sonraki kWh elektrik üretiminin aynı olmasına karşılık; yatırım maliyetleri bakımından birbirleriyle kıyaslanabilir değerleri verdiği sonucuna varılır. En yaygın ticari nükleer santral (PWR ve BWR) modellerinde, enerji üretim kapasitesi yüksek olan 900-1200 MW(e)’lik ünitelerin kurulması maliyet açısından daha verimli olacaktır. CANDU modelinin kurulum maliyeti çok yüksek, ünite başına enerji üretim kapasitesi düşüktür.



## **KAYNAKLAR**

- [1]. Tombakođlu M., “Hafif ve Ağır Su soğutmalı Nükleer Reaktörler”, Mühendis ve Makina, 404, 1993.
- [2]. Glorian D., Spiegelberg-Planer R., “Thermal Generating Plant (100 MW+) Avalibility and Unavability Factors 1995”, Word Energy Council, Performance of Thermal Generating Plant, pp 1-26, September 1995.
- [3] Aşık O., “Nükleer Reaktörler ve Türkiye için Uygun Reaktörün Seçimi”, Dumlupınar Üniversitesi, Lisans Tezi,1999.
- [4]. Türkiye Atom Enerjisi kurumu Başkanlığı, CANDU Nükleer Reaktörü, Nükleer Güvenlik Dairesi, 1995.
- [5]. Sencer A., Enerji Sorunu, Alternatif Enerji Kaynakları ve Nükleer Elektrik Santralleri, 1989.
- [6]. Baran C., “Nükleer Yakıt İdaresi”, 1986.
- [7]. Şahin S., “Nükleer Enerji ve Nükleer Santraller”, Türkiye Elektrik Kurumu Eğitim Dairesi Bşk., 7-1985.
- [8]. Aybers N., Bayülken A, “Nükleer Reaktör Mühendisliği I Temel Bilgiler”, s 360-365, 1990
- [9]. Soyer A. E., Zabunođlu O., “Reaktör Sonrası Yakıt Çevrimi Senaryolarının Ekonomik Olarak Karşılaştırması”, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları.
- [10]. Yücel B. F., “Enerji Ekonomisi”,s 463-465, Febel Ltd.Şti, 1994
- [11]. Sarıcı L., Savruk N, Erdemir Z., “Soru ve Cevaplarla Nükleer Santraller ve Çevre”, TEAŞ Nükleer Santraller Daire Başkanlığı, 1999.

## İNDİSLER

$B_u$	yakıtın ısı değeri ( $MWd / ton$ )
$C_s$	kWh başına yıllık sabit masraflar ( $\$/kWh$ )
$C_y$	yıllık yakıt masrafı ( $\$$ )
$E$	yıllık enerji üretimi ( $kWh$ )
$I_y$	faizler
$K$	sabit masraf oranı
$K_1$	depoda bekleyen taze yakıtın bekleme süresi (3 ay)
$K_2$	kullanılmış yakıtın bekleme süresi (4 ay)
$LF$	yük faktörü
$N_i$	kullanılmış yakıtın fiyatı ( $\$/kg$ )
$N_y$	taze yakıtın fiyatı ( $\$/kg$ )
$P_e$	santralın gücü ( $MWe$ )
$P_t$	santralın termik gücü
$T_i$	ilk yükleme miktarı
$T_y$	yıllık yakıt yükleme miktarı
$M_y$	ilk yüklemeden gelen yıllık sabit masraflar
$Y_k$	kWh başına yakıt maliyeti
$Y_T$	toplam yatırım
$d$	iskonto haddi
$i$	faiz oranı
$m$	santral ömrü (30 yıl)
$\eta$	santralın genel verimi