

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Bir Nükleer Güç Santralının Karşılaştırılmalı Maliyet Analizi: Akkuyu Özelinde

A Comparative Cost Analysis of a Nuclear Power Plant: Akkuyu Case

Gürcan Tiryaki, Ünal Çamdalı*

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bil. Fak., Mak. Müh. Bölümü, Etlik Ankara, Türkiye

Geliş / Received: 15.04.2024

Kabul / Accepted: 16.08.2024

*Sorumlu Yazar: Ünal Çamdalı unalcamdali@gmail.com

ÖZ: Türkiye son yıllarda enerji tüketimini en çok artıran ülkelerden biri olup, enerji tüketimini önümüzdeki yıllarda daha da artırması beklenmektedir. Dolayısıyla ülkemizin gelecekteki ekonomik, sosyal vd. alanlardaki başarısı, büyük oranda enerji sorununa çözüm üretebilme yeteneğine bağlı olacaktır.

Dünyada enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan nükleer enerji, atom çekirdeğinden elde edilen bir enerji türüdür. Radyoaktivite, füzyon ve fisyon olmak üzere üç farklı çeşidi bulunmaktadır. Türkiye Rusya Federasyonu ile 6007 Sayılı Kanun kapsamında yapmış olduğu anlaşmayla önümüzdeki yıllarda nükleer bir santrale sahip ülkeler arasında yer alacaktır. Söz konusu anlaşmaya göre Rusya Federasyonu Hükümeti himayesinde kurulacak olan bir şirket tarafından, Mersin/Akkuyu bölgesinde nükleer santral kurulacaktır. Toplam yatırım maliyeti 22 Milyar \$ olacak olan nükleer santralde, yeni geliştirilen VVER1200 tipi PWR (Basınçlandırılmış Su Reaktörü) reaktörleri kullanılacaktır. Söz konusu reaktörlerin her biri 1200 MW gücünde olup, toplamda dört adet kurulması planlanmaktadır. Dolayısıyla santralin kurulumu gerçekleştiğinde toplam güç: 4800 MW olacaktır. Üretici şirket tarafından 60 yıl ömür biçilen reaktörlerin toplam ömrü boyunca üretecekleri elektrik, Türkiye'nin elektrik ihtiyacının belli bir kısmını karşılamak amacı ile kullanılacaktır.

Bu çalışmada önce nükleer enerji santrallerinin çalışma prensibi ile birlikte Mersin-Akkuyu bölgesinde kurulması planlanan santral hakkında genel bilgi verilmiştir. Sonrasında nükleer enerji santrallerle ilgili yatırım ve işletme maliyet analizleri yapılarak bu tür santrallerin enerji üretim maliyet değerleri, ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonunda da ülkemizde farklı iki durum (mevcut ve alternatif) için kurulması varsayılan nükleer santralin maliyet değeri önce birbirleriyle sonrasında kömür, doğalgaz, rüzgâr gibi farklı yakıtları kullanan elektrik santrallerinin maliyetleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akkuyu, Nükleer Enerji, Nükleer Santral, Nükleer Reaktör, Maliyet Analizi, Akkuyu Nükleer Güç Santrali, Enerji Maliyeti Analizi

ABSTRACT: Türkiye is one of the countries that has increased its energy consumption the most in recent years, and it is expected to increase its consumption even more in the coming years. Therefore, our country's future economic, social, and other successes will largely depend on its ability to provide solutions to energy problems.

Nuclear energy, which has an important place in energy production worldwide, is a type of energy obtained from the nucleus of the atom and has three different types: radioactivity, fusion, and fission. With the agreement made by Türkiye and the Russian Federation within the scope of Law No. 6007, Türkiye will be among the countries that have a nuclear power plant in the coming years. According to the agreement, a nuclear power plant will be established in the Mersin/Akkuyu region by a foreign company under the auspices of the Russian government. The nuclear power plant, whose total installation cost will be 22 billion USD, will use the newly developed VVER-1200 type PWR (Pressurized Water Reactor) reactor. Each of the reactors in question has a power of 1200 MW, and it is planned to install four in total. Therefore, when the power plant is established, the total power will be 4800 MW. The electricity produced by the reactors, which are estimated to have a lifespan of 60 years by the manufacturing company, will be used to meet some of our country's electricity needs.

In this study, the main operational principles of a nuclear power plant are introduced, and general information is given on the nuclear power plant that is planned to be constructed in the Mersin-Akkuyu region. Energy production costs for this kind of power plant are determined by carrying out investment and operational cost analyses. At the end of the study, the cost value of the nuclear power plant, which is assumed to be established under different conditions in our country, was compared first with each other and then with the costs of power plants using different fuels such as coal, natural gas, and wind..

Keywords: Akkuyu, Nuclear Power Plant, Nuclear Reactor, Cost Analysis, Energy Cost Analysis of Akkuyu Nuclear Power Plant

1. GİRİŞ

Türkiye son yıllarda enerji tüketimini en çok artıran ülkelerden biri olup, tüketimini önümüzdeki yıllarda daha da artırması beklenmektedir. Bu nedenle ülkemizin gelecekteki ekonomik, sosyal vd. alanlardaki başarısı, büyük oranda enerji sorununa çözüm üretebilme yeteneğine bağlı olacaktır [1].

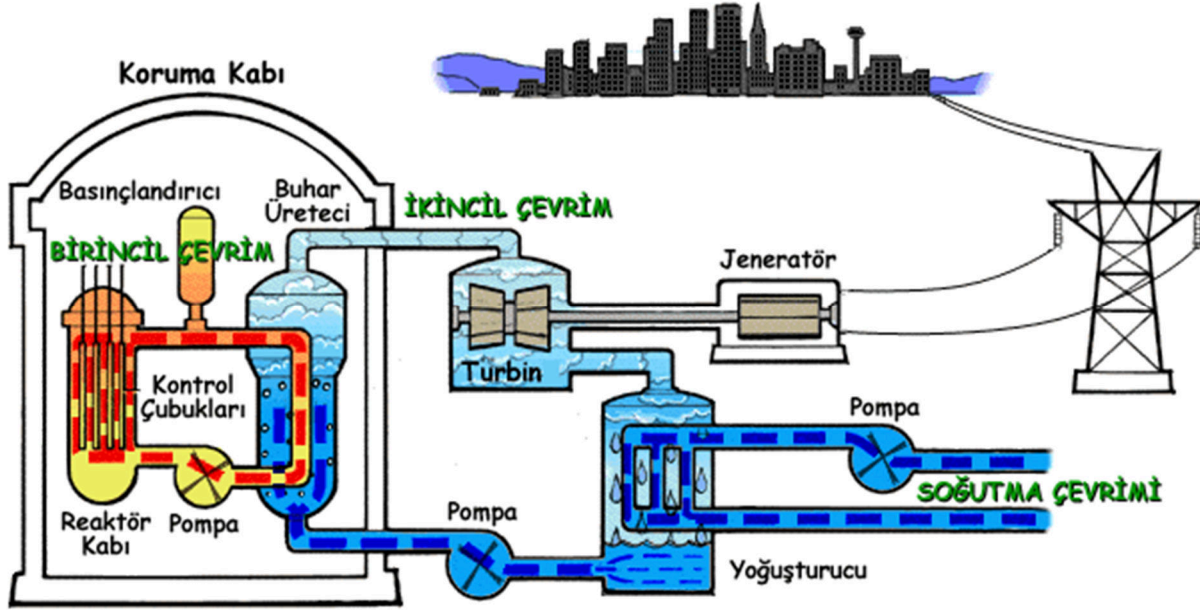
Gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, enerjiye olan talebin artmasına neden olmaktadır. Enerji, üretim için zorunlu bir faktör olmakla birlikte tüketimi, bir ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtan, temel göstergelerden biridir. Ayrıca enerji tüketimi ile sosyal kalkınma arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bununla birlikte ekonomik gelişme ve refah artışı, enerji tüketimini artırmaktadır [2].

Dünyada enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan nükleer enerji, atom çekirdeğinden elde edilen bir enerji biçimidir. Radyoaktivite, füzyon ve fisyon olmak üzere üç farklı yapıdadır.

Radyoaktivite atom çekirdeğinin, tanecikler ve elektromanyetik ışınlar yayarak zaman içerisinde kendi kendine parçalanmasıdır. İşlem sırasında ortaya çıkan enerji, radyasyon olarak isimlendirilmektedir. Nükleer enerjinin bu türü daha çok uydularda, uzay sondalarında vb. uzaya gönderilen ve insansız çalışan sistemlerde kullanılmaktadır.

Füzyon, iki hafif elementin atomlarının nükleer reaksiyon sonucunda birleşerek, daha ağır bir element oluşturmasıdır. Füzyon reaksiyonlarının meydana geldiği reaktöre, Güneş örnek verilebilir. Evrendeki yıldızların enerji kaynağı olarak da bilinen füzyonun başlatılabilmesi için elementlerin çekirdekleri arasındaki itme kuvvetini yenebilecek büyüklükteki bir enerji gerekmektedir. Bu enerji ise çekirdek sıcaklığını yaklaşık olarak 100 milyon °C'ye getirmekle mümkündür. Günümüzde Dünyanın çeşitli yerlerinde bulunan araştırma merkezlerinde, füzyondan enerji elde etme yöntemleri henüz araştırma aşamasındadır.

Fisyon ise kütle numarası yüksek bir elementin çekirdeğinin parçalanarak, kütle numarası daha küçük iki elemente dönüşmesi olarak adlandırılır. Bu işlem sırasında açığa çıkan enerji fisyon enerjisi olarak tanımlanır. Şekil 1'de bu prensibe göre çalışarak elektrik ve ısı elde etmek için kullanılan bir nükleer santralin şematik resmi verilmiştir. Bu tip nükleer santrallerde U-235 atomları parçalanmaya zorlanarak yani fisyon reaksiyonuna tabii tutularak, olağanüstü miktarda enerji açığa çıkmasına neden olunmaktadır. Bunun için önce uranyum yakıt hücreleri, çubuklar haline getirilip suya batırılır. Sonra fisyon reaksiyonu başlatılır. Bu reaksiyon suyu ısıtarak buhar haline getirir. Meydana gelen buhar, türbini, türbin de jeneratörü döndürerek elektrik üretilir [3].



Şekil 1: Bir nükleer santralin çalışma şeması [4].

Tablo 1’de farklı enerji kaynaklarının birim miktarları için enerji değerleri verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere nükleer enerji diğer kaynaklara göre oldukça yüksek enerji değerine sahiptir. Bu durum günümüzde nükleer enerjiden yararlanma nedenini net olarak ortaya koymaktadır [5].

Tablo 1: Birim miktar başına enerji miktarı [5].

Yakıt Türü	Enerji Miktarı
Nükleer	$2,3 \times 10^{10}$ kWh/ton
Kömür	6.944 kWh/ton
Doğal Gaz	10,62 kWh/m ³
Fuel Oil	11.120 kWh/ton
Petrol	1.700 kWh/varil

Nükleer santraller, yenilenebilir enerji kaynaklı santraller gibi iklim koşullarına, kömür santralleri gibi yakıtın kalitesine, petrol ve doğalgaz santralleri gibi rezerv miktarına bağlı olmayan ve elektrik

üretiminde süreklilik gösteren santrallerdir [6]. Bu santrallerin güvenlik kontrolleri, bağımsız lisanslama kuruluşları tarafından son derece katı kurallara göre yapılmaktadır ve işletmede oldukları süre boyunca, sürekli denetim altındadır. Bu nedenle nükleer santrallerin çevre ve insana zarar verebilecek şekilde kaza yapma riski, günümüzde kullanılan diğer teknolojik ürünlere göre daha düşüktür. Kaldı ki nükleer santrallerin projelendirilmesi, tasarlanması, kurulması, işletilmesi ve sökümü esnasında çok ciddi güvenlik önlemlerinin alınması zorunludur [7,8]. Ayrıca sera gazı salınımı konusunda da en temiz seçenek olarak görülmektedirler. Bu bağlamda nükleer enerjinin iklim değişikliğine sebep olan atmosferdeki sera gazı miktarının azaltılmasında, büyük bir rolü vardır. Günümüzde nükleer santrallerin kullanılmasıyla elektrik üretiminin neden olduğu sera gazı salınımının, yaklaşık olarak %17 oranında azaldığı belirtilmektedir [9]. Tablo 2’den görüldüğü üzere dünyada 30 ülkede 435 adet elektrik üretme amaçlı nükleer santral mevcuttur.

Tablo 2: Ülkelere göre kurulmuş ve kurulmakta olan reaktör sayıları [10].

Ülke	Faaliyette		Yapım Aşamasında	
	Sayı	Elek. Üretimi (MW)	Sayı	Elek. Üretimi (MW)
Arjantin	3	1.627	2	717
Ermenistan	1	375	0	0
Belarus	0	0	1	1.109
Belçika	7	5.927	0	0
Brezilya	2	1.884	1	1.245
Bulgaristan	2	1.906	0	0
Kanada	19	13.500	0	0
Çin	21	16.890	28	27.756
Çek Cumhuriyeti	6	3.804	0	0
Finlandiya	4	2.752	1	1.600
Fransa	58	63.130	1	1.600
Almanya	9	12.068	0	0
Macaristan	4	1.889	0	0
Hindistan	21	5.308	6	3.907
İran	1	915	0	0
Japonya	48	42.388	2	1.325
Güney Kore	23	20.710	5	6.370
Meksika	2	1.330	0	0
Hollanda	1	482	0	0
Pakistan	3	690	2	630
Romanya	2	1.300	0	0
Rusya	34	24.654	9	7.371
Slovakya	4	1.815	2	880
Slovenya	1	688	0	0
Güney Afrika	2	1.860	0	0
İspanya	7	7.121	0	0
İsveç	10	9.474	0	0
İsviçre	5	3.308	0	0
Ukrayna	15	13.107	2	1.900
Birleşik Arap Emirlikleri	0	0	3	4.035
İngiltere	16	9.231	0	0
Amerika Birleşmiş Devletleri	104	101.465	5	5.633
Toplam	435	371.598	70	66.078

2. AKKUYU NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ANTLAŞMASI

Türkiye Rusya Federasyonu ile 6007 Sayılı Kanun kapsamında yapmış olduğu anlaşmayla önümüzdeki yıllarda, nükleer bir santrale sahip olan ülkeler arasında yer alacaktır. Söz konusu anlaşmaya göre Rusya Federasyonu Hükümeti himayesinde kurulacak olan bir şirket tarafından Mersin/Akkuyu bölgesinde nükleer santral kurulacaktır. Toplam yatırım maliyeti 22 Milyar \$ olacak olan nükleer santralde, yeni geliştirilen VVER1200 tipi PWR (Basınçlandırılmış Su Reaktörü) reaktörleri kullanılacaktır. Söz konusu reaktörlerin her biri 1.200 MW gücünde olup toplamda dört adet kurulması planlanmaktadır. Dolayısıyla santral kurulduğunda, toplam güç 4.800 MW olarak gerçekleştirilecektir. Üretici şirket tarafından 60 yıl ömür biçilen reaktörlerin çalışma süresi boyunca üretecekleri elektrik, ülkemizin elektrik ihtiyacının belli bir kısmının karşılamak amacı ile kullanılacaktır. Ayrıca anlaşma kapsamında, ülkemizden Rusya'ya nükleer santraller konusunda eğitim almak amacıyla öğrenci de gönderilmiştir. Eğitim alacak öğrenciler sonrasında yani santral işletilmeye alındığında, teknik ekibin önemli bir kısmını oluşturacaktır. Türkiye ile Rusya Federasyonu arasında nükleer santral yapımı konusunda yapılan anlaşmanın bazı önemli maddeleri aşağıda verilmiştir [11]:

- Proje şirketi Nükleer Güç Santrali (NGS) inşasının başlaması için gerekli tüm evrakların (belgeler, izinler, lisanslar vb.) hazırlanmasından itibaren yedi yıl içinde Ünite 1'i ticari işletmeye alacaktır.
- Proje Şirketi Ünite 1'in ticari işletmeye alınmasından itibaren birer yıllık aralıklarla Ünite 2, Ünite 3 ve Ünite 4'ü ticari işletmeye alacaktır.
- TETAŞ (2018'de Elektrik Üretim Anonim Şirketi'ne devredildi) santraldeki Ünite 1 ve Ünite 2'nin ürettiği elektriğin % 70'ini, Ünite 3 ve Ünite 4'ün ürettiği elektriğin % 30'unu 15 yıl boyunca kWh'i en az 12,35 ABD sentinden, KDV hariç satın almayı garanti eder.

- Proje şirketi, TETAŞ tarafından satın alınan elektrik için *Kullanılmış Yakıt ve Radyoaktif Yakıt Yönetimi Hesabına* kWh başına 0,15 ABD senti ve *İşletmeden Çıkarma Hesabı* için yine kWh başına 0,15 ABD senti tutarında bir ödeme yapar.
- Elektrik fiyatındaki yıllık değişim, proje şirketi tarafından hesaplanır. Bu miktar 15,33 ABD senti/kWh'i geçemez.
- Her bir güç ünitesinin ticari işletmeye alınmasından 15 yıl sonra proje şirketi net karının % 20'sini Türk tarafına verecektir.
- Nükleer yakıt, proje şirketi tarafından tedarikçilerden temin edilecektir.
- Proje Şirketi santralin söküm ve atık yönetiminden sorumludur.

3. NÜKLEER SANTRALLERDE ENERJİ MALİYETİ

Nükleer santrallerdeki yakıt maliyet hesabı, fosil yakıtlı santrallere göre daha karmaşıktır. Zira nükleer yakıt, reaktöre girmeden önce ve reaktörlerde kullanıldıktan sonra çeşitli işlemlere tabii tutulmaktadır. Bütün bu işlemlerden kaynaklanan giderlerin yıllık toplam yakıt maliyetlerine yansıtılması gerekmektedir. Bu nedenle bu santrallerde yakıt maliyetinin elde edilmesinde, *değere getirilmiş veya seviyelendirilmiş maliyet* metodu tercih edilmektedir [12].

Şekil 2'de nükleer santrallerde, enerji maliyetine etki eden unsurlar gösterilmiştir. Burada *Sermaye*: santralin kurulma süresince yapılan harcamalar ile santralin ömrünü tükettikten sonra sökümünde yapılan harcamaların toplamını yansıtmaktadır. *Başlangıç Sermayesi* altında bulunan *Esas Maliyetler*: santralin inşaat giderlerini; *Mal Sahibi Maliyetleri*: mal sahibinin idari, müşavirlik vb. dolaylı giderlerini temsil etmektedir. *Ek Maliyetler* ise inşaat süresince faiz, eskalasyon ve beklenmeyen giderleri temsil etmektedir.

Nükleer santrallerin yıllık sermaye giderleri hesaplanırken santralin ömrü dikkate alınmak koşulu ile çeşitli amortisman (yıpranma payı) metodları kullanılmaktadır.

Yatırımdan gelen yıllık sermaye (sabit) giderleri, aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır [9].

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

$$K = \frac{1}{m} \quad (2)$$

C_s (\$/kWh) yıllık sabit sermaye lerini; Y_T (\$) toplam yatırım tutarını, E (kWh) yıllık enerji üretimini; K sabit maliyet oranını, m (yıl) ise santralin ömrünü göstermektedir.

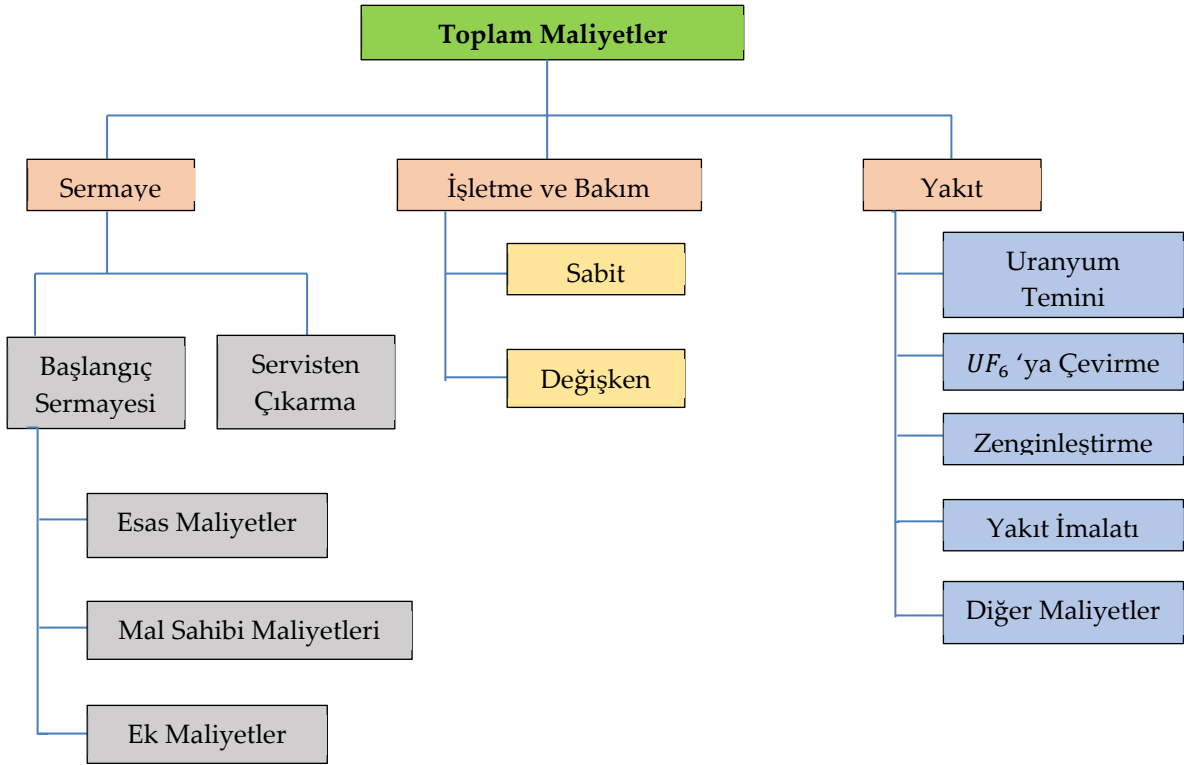
Bir nükleer santralde işletme ve bakım giderleri, toplam üretim giderlerinin küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Ayrıca işletme ve bakım maliyetlerini sermaye ve yakıt giderleri gibi genel formüllerle ifade etmek mümkün değildir. Zira işletme ve bakım giderleri; santral tipine ve gücüne, işletme şartlarına, santrali işleten kuruluşun yapısına ve genel muhasebe sistemine bağlı olarak değişmektedir. Ancak genel olarak nükleer

santrallerde işletme ve bakım giderleri, sabit maliyetler ile değişken maliyetlerin belli bir oranı şeklinde kabul edilmektedir [12, 13].

Yakıt giderleri uranyumun sahadan doğal olarak çıkarılmasından başlayarak bertaraf edilme sürecine kadar yapılan işlemlerin, toplam maliyetlerini kapsamaktadır. Nükleer santrallarda kWh başına yakıt maliyeti aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [13]:

$$Y_K = \frac{C_y + M_y + I_y}{P_e (365)(24)(LF)} \quad (3)$$

Y_K , kWh başına yakıtın maliyetini, C_y (\$) yıllık yakıt giderini, M_y (\$) ilk yüklemenden gelen yıllık sabit giderleri, I_y (\$) faiz miktarını, P_e (MWe) santralin gücünü, LF de yük faktörünü (%) ifade etmektedir.



Şekil 2: Nükleer santrallerde yıllık maliyetler [12,13].

Nükleer santrallerde yıllık yakıt maliyeti [9]:

$$C_y = \frac{P_e (365)(24)(LF)(N_y - N_i)}{\eta B_u} \quad (4)$$

N_y ve N_i ise sırası ile kullanılmamış ve kullanılmış yakıtların \$/kg olarak değerini, η santralin genel verimini, B_u ise MWgün/ton cinsinden yakıtın ısıl değerini ifade etmektedir.

Santralin termik gücü [13]:

$$P_t = \frac{P_e}{\eta} \quad (5)$$

P_t (MWth) santralin termik gücünü ifade etmektedir.

İlk yüklemenden gelen yıllık sabit giderler [13]:

$$M_y = (T_i - T_y)N_y C_t \quad (6)$$

T_i (ton U) reaktöre yapılan yakıtın ilk yükleme miktarını, T_y (ton U) reaktöre yapılan yıllık yakıt yükleme miktarını, C_t ise sermaye itfa faktörünü ifade etmektedir.

İlk yükleme miktarı [13]:

$$T_i = \frac{P_t}{P_s} \quad (7)$$

P_s (MW/ton U) uranyum yakıtının spesifik gücünü ifade etmektedir.

Yıllık Yakıt yükleme miktarı [13]:

$$T_y = \frac{P_t(365)(24)(LF)}{B_u} \quad (8)$$

Sermaye itfa faktörü [13]:

$$C_t = \frac{d}{1-(1+d)^{-m}} \quad (9)$$

d iskonto (indirim) oranını ifade etmektedir.

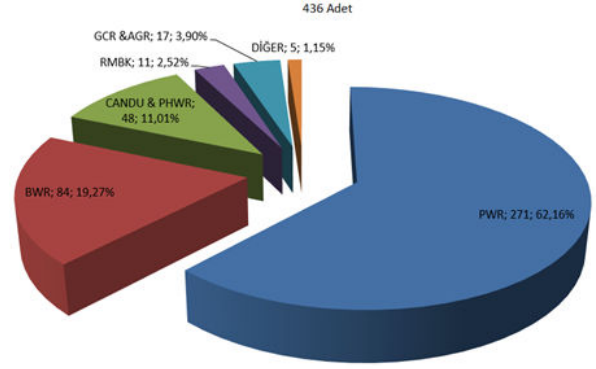
Faiz (I_y) [13]:

$$I_y = T_y i [N_y(0.5 + k_1) + N_i(0.5 + k_2)] \quad (10)$$

i faiz oranını, k_1 ve k_2 ise sırasıyla kullanılmış yakıt ile depoda bekleyen kullanılmamış yakıtın bekleme sürelerini göstermektedir.

4. MALİYET ANALİZLERİ

Günümüzde dünyanın pek çok ülkesinde farklı tipte nükleer santraller kullanılmaktadır. Şekil 3'den de görüldüğü üzere dünyada en çok kullanılan nükleer santraller, basınçlı su reaktörü (PWR) kullanan santrallerdir. Bunlardan sonra en çok kullanılan santraller ise kaynar su reaktörleri (BWR) ve basınçlı ağır su reaktörleri kullanan santrallerdir (CANDU&PHWR).



Şekil 3: Dünyada nükleer santrallerdeki reaktör dağılımı [14].

PWR tipi santrallerin en çok tercih edilmesinin nedeni bu tip santrallerde güvenlik ve kontrolün diğer santrallere göre daha yüksek seviyede olmasındandır. BWR tipi santrallerin kurulum ve söküm maliyeti, diğer santrallere göre daha düşüktür. CANDU (Kanada Döteryum Uranyum) tipi santraller ise doğal uranyumu yakıt olarak kullanma özelliğine sahiptir [15, 16].

Bu çalışmada Akkuyu'da kurulması planlanan VVER-1200 tip PWR reaktörü baz alınarak iki farklı durum için ekonomik analiz yapılmıştır. İlk durumda, Türkiye Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu arasında yapılan mevcut anlaşma gereği, santralin kurulumu Rusya Federasyonu Devletine bağlı bir şirket tarafından gerçekleştirilecek ve yine bu şirket tarafından işletilerek üretilen elektriğin, ülkemize satılması esas alınarak maliyet analizi yapılmıştır. İkinci durumda ise aynı tip bir nükleer santralin Türkiye Cumhuriyeti Devletince kurdurularak işletildiği varsayımına dayalı olarak maliyet analizi yapılmıştır. Söz konusu analizler aşağıda *Mevcut Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul I)* ve *Alternatif Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul II)* başlıkları altında verilmiştir. Analiz sonucu elde edilen maliyet değerleri, önce kendi aralarında, sonra da kömür, doğalgaz, nükleer gibi farklı yakıtları kullanan elektrik santralleri ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Mevcut Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul I)

Bu analizde T.C. Devleti ile Rusya Federasyonu Devleti tarafından yapılan mevcut anlaşma koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Anlaşmaya göre santral Rus firması tarafından gerçekleştirilecektir. Yapılan analizde santralin toplam yatırım bedeli olan 22 Milyar \$ finansmanın, bir banka kredisi ile karşılanacağı, banka kredisinin

geri ödeme süresinin 15 yıl ve faiz oranının da aylık % 0,6 olacağı varsayılmıştır. Kurulacak reaktörlerin ömrü ise anlaşma gereği ve Tablo 3’de görüldüğü üzere 60 yıl alınmıştır.

Tablo 3: VVER 1200 Reaktör ve santralinin özellikleri [17].

İsmi	Reaktör Tipi	Nötron Spektrumu	Termodinamik Döngü (çevrim)
VVER-1200 (V-491)	Basınçlı Su Reaktörü (PWR)	Termal Nötron	Rankine
Reaktör Ömrü	Soğutucu	Reaktör Isı Kapasitesi	Santral Brüt Elektrik Kapasitesi
60 Yıl	Su	3.200 MWth	1.170 MWe
Santral Net Elektrik Kapasitesi	Reaktör Net Verimliliği	Santral Kapasite (Kullanım) Faktörü	Tasarım
1.082 MWe	33,9 %	> 90 %	Gidropress

Bu verilerden yararlanarak maliyetler hesaplanmıştır.

Sermaye Gideri: Aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır [18]:

$$\text{Sermaye gideri} = \text{Kredi tutarı} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} n \quad (11)$$

i yüzde olarak faiz oranını, n ise taksit sayısını (180 ay) ifade etmektedir.

Sermaye gideri =

$$(22 \times 10^9) \frac{(6 \times 10^{-3})(1 + (6 \times 10^{-3}))^{180}}{(1 + (6 \times 10^{-3}))^{180} - 1} (180) = 36,04 \text{ milyar ABD \$}.$$

Söküm Maliyeti: Nükleer santrallerin giderlerinden biri de ömürleri tamamlandıktan sonra sökülerek radyoaktif parçaların bertaraf edilmesidir. Nükleer santrallerin söküm maliyeti, santralin başlangıç sermayesinin belli bir oranıyla değişmekle birlikte analizde %10 alınmıştır [19]. Bu değer, $22 \times 0,1 = 2,2$ milyar ABD \$ olarak hesaplanmıştır.

Yıllık Sermaye (Sabit) Maliyeti: 1 ve 2 eşitliklerinden yararlanılarak,

$$K = \frac{1}{60}$$

$$C_S = \frac{(36.04 \times 10^{11} + 2.2 \times 10^{11})(1/60)}{(1082 \times 10^3)(4)(24)(365)(0,9)}$$

$$= 1,87 \text{ ABD cent/kWh}$$

İşletme ve Bakım Maliyeti: Bir nükleer santralde işletme ve bakım maliyeti, toplam üretim maliyetinin küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bununla beraber işletme ve bakım maliyetinin sermaye ve yakıt maliyetleri gibi genel formüllerle ifade edilmesi, zor görünmektedir [20]. Dolayısıyla tesisin açılıp işletilmeye başlanmasından önce bu maliyeti kesin bir değerle ifade etmek, mümkün değildir.

Analizde ABD Enerji Bakanlığının desteklediği openEI’den alınan ve Tablo 4’de görülen verilerin ortalama değerleri kullanılmıştır.

Tablo 4: Enerji türlerine göre maliyet verileri [20].

Santral Tipi	Enerji Maliyeti (ABD \$/MWh)			Ana Sermaye Maliyeti (1000x ABD \$/kW)			Sabit İşletme Maliyeti (ABD \$/kW)			Değişken İşletme Maliyeti (ABD \$/MWh)			Kapasite Kullanım Faktörü (%)		
	Mak	Med	Min	Mak.	Med	Min	Mak	Med	Min	Mak	Med	Min	Mak	Med	Min
Rüzgâr	120	60	20	2,6	1,57	1,13	60	10,95	10,9	23	6,45	5,02	50,4	38	18,4
PV	590	280	150	9,5	5,1	2,5	110	32,03	6,44	0	0	0	28	21	15,5
Jeotermal	140	60	40	5,94	2,82	1,63	229	155,4	68,3	0	0	0	95	85	75
Hidroelek	120	20	20	4	1,32	0,5	75	13,14	12,7	5,94	3,2	2,42	93,2	93,2	35
Doğalgaz	70	50	10	1,68	0,88	0,51	45,6	13,71	5,5	8,09	2,86	1,29	93	84,6	40
Kömür	120	50	10	8,4	1,92	0,56	33,5	27,5	13,1	5,9	3,7	1,62	93	84,6	80
Nükleer	120	60	40	8,2	3,1	2,28	127	85,66	12,8	6	0,49	0,42	90,2	90	85

Sabit işletme ve bakım maliyeti Tablo 3 ve Tablo 4'den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesap

edilmiştir. Sabit ve değişken işletme maliyeti hesabında medyan değerleri kullanılmıştır.

Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti:

$$\frac{(85.66 \times 10^2 \text{ ABD Cent/kW})(1082 \times 10^3 \text{ kW})(4 \text{ adet reaktör})}{(1082 \times 10^3 \text{ kW})(4 \text{ adet reaktör})(24 \text{ saat/gün})(365 \text{ gün/yıl})(0,9 \text{ kko})} = 1,09 \text{ ABD cent/kWh}$$

Değişken İşletme ve Bakım Maliyeti:

$$\frac{0.49 \times 10^2 \text{ ABD Cent/MWh}}{10^3 \text{ kWh/MWh}} = 0,05 \text{ ABD cent/kWh}$$

Nükleer yakıt olarak kullanılan uranyumun zenginleştirilme işleminin yüksek maliyetli olması, enerji maliyetini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Yapılan analizde Tablo 5'de verilmiş olan (2014 yılı) fiyat verileri kullanılmış ve uranyumun %5 zenginleştirilerek reaktör yakıtı olarak kullanılacağı varsayılmıştır [18, 21].

Tablo 5'den elde edilen verilere göre reaktörde kullanılacak olan nükleer yakıtın 1 kg'ı 1.590,68 \$ olarak elde edilmiştir.

kWh başına yakıt maliyeti Eşitlik 3'den :

$$Y_K = \frac{120.23 \times 10^8 + 23.42 \times 10^8 + 6.22 \times 10^8}{(1082)(4)(1000)(24)(365)(0.9)} = 0,44 \text{ ABDcent/kWh}$$

Yıllık yakıt maliyeti Eşitlik 4'den:

$$C_y = \frac{(1170)(4)(365)(24)(0.9)(1590.68)}{(0.339)(60)(24)} = 120,23 \text{ milyon ABD doları}$$

Eşitlik 6 kullanılarak ilk yüklemeye gelen yıllık sabit maliyetler:

$$M_y = (347.83 \times 10^3 - 70.08 \times 10^3)(1590.68)(0.05) = 23,42 \text{ milyon ABD doları}$$

İlk yükleme miktarı eşitlik 7'den yararlanılarak:

$$P_s = 36.8 \text{ MW/ton Uranyum}$$

$$T_i = \frac{12800}{36.8} = 347,83 \text{ ton Uranyum}$$

Isıl güç dört reaktör için toplam 12.800 MWth olarak Tablo 3'den alınır.

Eşitlik 8'den yararlanılarak yıllık yakıt yükleme miktarı:

$$T_y = \frac{(12800)(365)(24)(0.9)}{(60)(24)(1000)} = 70,08 \text{ ton U}$$

Sermaye itfa faktörü Eşitlik 9'dan (ıskonto oranı %5 alınmıştır):

$$C_t = \frac{0.05}{1 - (1 + 0.05)^{-60}} = 0,053$$

Faiz Eşitlik 10'dan yararlanılarak:

$$I_y = (70.08 \times 10^3)(1.006^{12} - 1)[(1590.68)(0.5 + 0.25)] = 6,22 \text{ milyon ABD \$}$$

Enerji Maliyeti:

$$1,87 + 1,09 + 0,05 + 0,44 = 3,45 \text{ cent/kWh}$$

Elde edilmiştir. 3,45 ABD cent/kWh maliyet değerinde üretilecek elektrik, yapılan anlaşma koşullarına göre Rus şirketince Türkiye Cumhuriyeti Devletine 12,35 ABD cent/kWh'den satılacaktır. Anlaşmada belirtilen başka bir önemli

husus da santralin kurulumundan itibaren ilk 15 yıl üretilecek elektriğin yarısının, Türkiye Cumhuriyeti Devletince alınmasının zorunlu olmasıdır. Bu bağlamda Türkiye'nin yıllık, 15 yıllık ve santral ömrü boyunca satın almakla yükümlü olduğu ve istediği takdirde satın alabileceği toplam elektrik miktarı ve değerleri Tablo 6'da detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5: Bir ton zenginleştirilmiş uranyumun maliyet analizi [18, 21].

Maliyet Parametreleri		İmalat Parametreleri		Malzeme Parametreleri			Maliyet (Bin ABD \$)	
<i>İşlem</i>	<i>Market Fiyatı</i>	Çevrim Kaybı	%0,5	<i>Giren Doğal Uranyum</i>	11,98 t U ₃ O ₈ (=10,16 t U)	Doğal Uranyum	745,97	
Doğal Uranyum	28,25 ABD\$/lb U ₃ O ₈	Zenginleştirme (U-235)	%5	<i>İşlem</i>	<i>Ürün</i>	<i>Kayıp</i>	Çevrim	76,18
Çevrim	7,5 ABD\$/kg U			Çevrim	14,95 t UF ₆ (=10,11t doğal U)		Zenginleştirme	768,53
Zenginleştirme	95 ABD\$/SWU			Zenginleştirme (8.089,80 SWU)	1,48 t UF ₆ (=1t zengin U)	13,47 t UF ₆ (=9,11 t U-233)	Toplam	1590,68

Tablo 6: Türkiye'nin kurulacak nükleer santralden alması zorunlu olan ve alabileceği elektrik miktar ve fiyatları (12,35 ABD cent/kWh sabit kabul edilmiştir).

	Zorunlu Minimum Elektrik Miktarı (GWh)	Zorunlu Alınacak Elektriğe Ödemesi Gereken Tutar (Milyar ABD \$)	Satın Alınabilecek Maksimum Elektrik Miktarı (GWh)	Maksimum Elektrik Miktarına Ödemesi Gereken Bedel (Milyar ABD \$)
1 Yıl	17.061	2,11	34.122	4,21
15 Yıl	255.915	31,61	511.830	63,21
60 Yıl	255.915	31,61	2.047.320	252,84

4.2. Alternatif Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul II)

Bu analizde nükleer santralin hizmet bedeli karşılığında kurulması durumundaki elektrik maliyeti elde edilmeye çalışılmıştır. Santralin yapım maliyeti 22 milyar dolar olarak kabul edilmiş, santrali yapacak olan kuruluşun bu değere genel fizibilite yaklaşımlarına dayalı olarak %30 kâr

$$\text{Sermaye gideri} = (22 \times 10^9)(1,3) \frac{(6 \times 10^{-3})(1 + (6 \times 10^{-3})^{180})}{(1 + (6 \times 10^{-3})^{180}) - 1} (180) = 46,85 \text{ milyar ABD \$}.$$

Söküm maliyeti %30 kâr oranında, hizmet bedeli karşılığı olarak 2,86 milyar \$ elde edilmiştir.

Yıllık sermaye (sabit) maliyeti Eşitlik (1) ve (2)'den yararlanarak,

$$K = \frac{1}{60}$$

$$C_s = \frac{(46,85 \times 10^{11} + 2,86 \times 10^{11})(1/60)}{(1082 \times 10^3)(4)(24)(365)(0,9)} = 2,43 \text{ ABD cent/kWh}$$

Santralin işletme ve bakım maliyetleri ile yakıt maliyeti ilk analiz ile aynı olacaktır. Bu Durumda enerji maliyeti;

2,43 + 1,09 + 0,05 + 0,44 = 4,01 ABD cent/kWh olarak elde edilir.

5. DEĞERLENDİRME

Tablo 7'de analiz sonucu elde edilen değerler ile kömür, doğalgaz ve hidroelektrik santrallerinin Tablo 4'den alınan maliyet değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere hidroelektrik santrallerden elde edilen elektrik enerjisi maliyeti olan 0,93 cent/kWh, diğer santrallere göre en düşüktür. Bu santrallerden sonra en düşük elektrik, nükleer santrallerden elde edilmektedir. Burada iki farklı durum karşımıza çıkmaktadır. Birinci durumda santralin Rusya Federasyonu ile yapılan anlaşmaya göre gerçekleşmesi durumunda, 3,45 ABD cent/kWh'e üretilecek elektrik, Türkiye Cumhuriyeti Devletine 12,35 ABD cent/kWh'e satılacaktır. Santralin Türkiye Cumhuriyeti Devletince yapılması durumunda ise söz konusu bedel, 4,01 ABD

eklediği, kabul edilmiştir. Hizmet bedelinin geri ödeme süresi 15 yıl ve faiz oranı da aylık %0,6 kabul edilmiştir. Kurulacak olan dört reaktörün ömrü ilk analizde olduğu gibi 60 yıl alınmıştır. Bu verilere göre sermaye gideri:

cent/kWh olacaktır. Doğalgaz ve kömür termik santralleri ise sırası ile 5,80 ABD cent/kWh ve 6,46 ABD cent/kWh ile en pahalı elektrik üretimini gerçekleştirmektedir.

Ülkemiz ve Rusya Federasyonu için mevcut ve alternatif durumda ortaya çıkan maliyet, Şekil 4'te yıllara bağlı olarak gösterilmiştir.

6. SONUÇ

Basına yansıyan bilgilere göre Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin (NGS) birinci ünitesinin tüm donanımlarının çalışması ile ilgili testlere başlanması, olumlu bir gelişmedir. Santralin kısa sürede tam kapasitede üretime geçmesi, beklenen ve arzu edilen bir durumdur. Tüm bunlara rağmen ülkemizin öncelikle enerji üretimi noktasında kendi kaynaklarına dayalı bir politika izlemesi ve bir yapı ortaya koyması gerek cari açığın kapanması gerekse de enerji bağımlılığının azaltılması açısından önemlidir.

Bu çalışmada mevcut anlaşma ile (Koşul I) Akkuyu'da Rus şirketi tarafından kurulacak olan santralin ürettiği elektriğin, ülkemizin almakla yükümlü olduğu miktarının (üretimin %50'si) ülkemize maliyeti 15 yıl için 31,61 milyar ABD \$. Üretimin tamamının ülkemize olan maliyeti ise yine 15 yıl için toplam 63,21 milyar ABD \$. Alternatif durumda ise yani santralin hizmet bedeli karşılığında, Türkiye tarafından kurulması halinde (Koşul II), 15 yıllık işletme, bakım ve yakıt maliyetleri ile santralin kurulum ve söküm maliyetleri toplamı, yaklaşık olarak 60,63 milyar ABD \$ olarak hesaplanmıştır. İki değer arasında 2,58 milyar ABD \$ fark vardır. Bu miktar ülkemiz

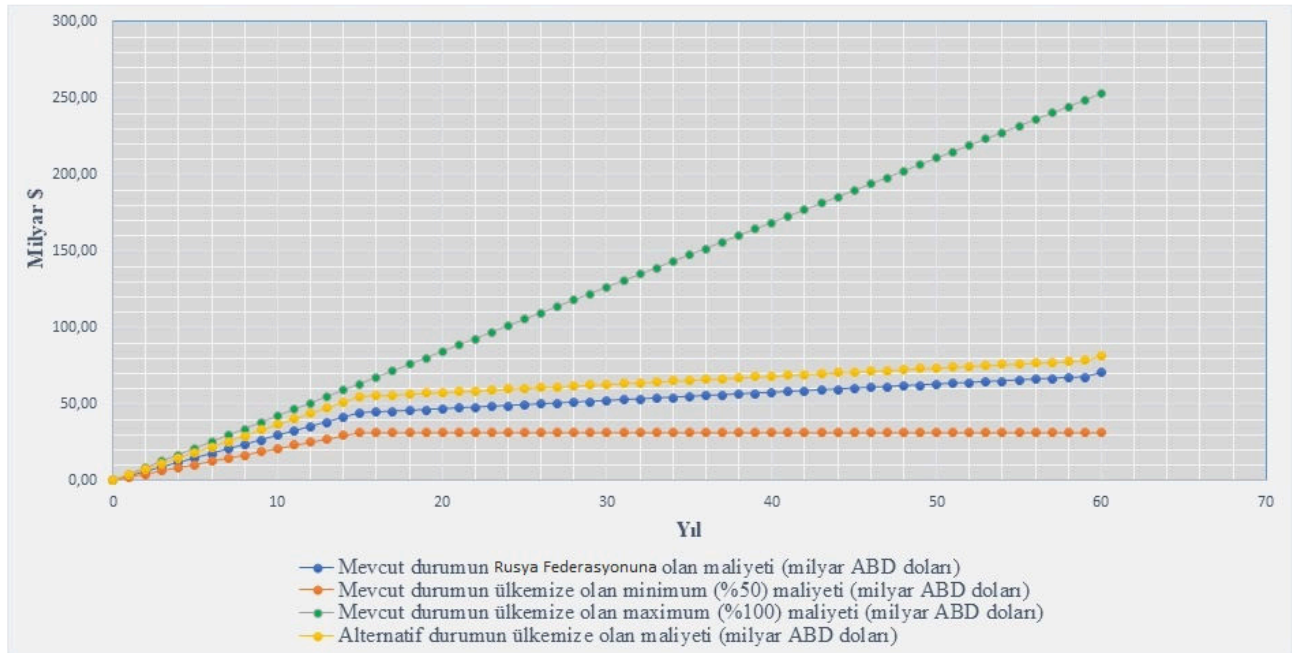
açısından önemlidir. Ayrıca santralin hizmet bedeli karşılığı kurulumu, hem santralin ülkemize ait olması hem de ucuz elektrik üretimi için daha uygun olduğu görülmektedir. Kaldı ki aynı santralin elektrik üretimine ve diğer sektörler

vereceği katkı ile tecrübenin, ülkemiz ekonomisi açısından önemli olacağı da bir gerçektir.

Dış ticaret açığı miktarının yaklaşık olarak enerji ithalatı değerine eşit olduğu ülkemiz için farklı avantajların değerlendirilmesi oldukça önemlidir.

Tablo 7: Enerji santrallerinin enerji maliyeti yönünden karşılaştırılması.

	Yatırım Maliyeti (milyar \$)	Geri Ödenmesi Gereken Ana Para (milyar \$)	Santral Söküm Maliyeti (milyar \$)	İşletme ve Bakım (sabit) Maliyeti (milyon \$)		İşletme ve Bakım Maliyeti (değişken) (milyon \$)		Ortalama Çalışma Kapasitesi (%)	Yakıt Maliyeti (milyon \$)		Toplam Maliyet (milyar \$)	ABD cent/kWh
				Yıllık	60 Yıl	Yıllık	60 Yıl		Yıllık	60 Yıl		
Hidroelektrik Santral (4.800MW)	6,33	10,60	0,00	63,07	3.784,20	125,40	7.524,00	93,20	0,00	0,00	21,91	0,93
Nükleer Santral (Rusya Federasyonu ile olan anlaşma) (1.082MWx4)	22,00	36,04	2,20	370,74	22.244,40	16,72	1.003,20	90,00	149,87	8.992,20	70,48	3,45
Nükleer Santral (%30 karla hizmet bedeli karşılığı yapıldığında) (1.082MWx4)	28,60	46,85	2,86	370,74	22.244,40	16,72	1.003,20	90,00	149,87	8.992,20	81,95	4,01
Termik Santral (Doğalgaz) (4.800MW)	4,22	7,07	0,00	65,81	3.948,60	101,74	6.104,40	84,60	1.778,63	106.717,82	123,84	5,80
Termik Santral (kömür) (4.800MW)	9,22	15,44	0,00	132,00	7.920,00	131,62	7.897,20	84,60	1.778,63	106.717,82	137,98	6,46



Şekil 4: Türkiye Cumhuriyeti (Ülkemiz) ve Rusya Federasyonu devleti için mevcut ve alternatif durumdaki maliyetin yıllara göre değişimi.

Yazar Katkıları: Her iki yazar, kaynak araştırması, hesaplamalarının yapılması, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder.

8. KAYNAKLAR

- [1] Ü. Çamdalı, V. Ş. Ediger, "Optimization of fossil fuel sources: An exergy approach", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, vol. 29, no. 3, pp. 251-259, 2007.
- [2] E. Koç ve M.C. Şenel, "Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme", Mühendis ve Makina, c. 54, sy. 639, ss. 32-44, 2013.
- [3] Editors: S. B. Krivit, T.B. Kingery and J.H. Lehr, Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology, and Applications, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2011.
- [4] https://www.nukleer.web.tr/nukleer_santral_t_urleri/pwr_ana.html (Erişim: Temmuz 2024).
- [5] <http://www.nukte.org/atomenerjisi> (Erişim: Nisan 2024).
- [6] A. Baghirova, "Enerji kaynaklarında güvenlik sorunu ve nükleer santraller: Metsamor nükleer santrali örneği", Türk Dünyası Araştırmaları, c. 120, sy. 236, ss. 215-232, 2018.
- [7] E. H. Tüylüoğlu ve N. Türkan, "Nükleer güç santrallerinin Türkiye'de ve dünyada çevresel etkileri", OHS ACADEMY İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi, c. 6, sy.1, ss. 50-58, 2023.
- [8] B. B. Acar, "VVER-1200 tipi nükleer reaktörün kullanılmış yakıtları için depolama tesisi modeli geliştirilmesi ve maliyet analizi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 20, ss. 362-373, 2020.
- [9] Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, "Günümüzde Nükleer Enerji", 2011, <http://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/handle/20.500.12878/201>.
- [10] <http://www.iaea.org/newscenter/focus/nuclear-power> (Erişim: Ocak 2024).
- [11] <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/10/20101006-6.html> (Erişim: Ocak 2024)
- [12] N. Aybers ve B. Şahin, Enerji Maliyeti, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, 1995.
- [13] N. Döner, "Ticari nükleer santral modellerinin yakıt masraflarına göre elektrik üretim maliyetlerinin değerlendirilmesi", Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, c. 17, sy. 2, ss. 95-104, 2004.
- [14] <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/power-reactors/nuclear-power-reactors/> (Erişim: Ocak 2024)
- [15] G.H. Marcus, "Innovative nuclear energy systems and the future of nuclear power", Progress in Nuclear Energy, vol. 50, no. 2-6, pp. 92-96, 2008.
- [16] C. Mari, "The costs of generating electricity and the competitiveness of nuclear power", Progress in Nuclear Energy, vol. 73, pp. 153-161, 2014.
- [17] Status report 108 - VVER-1200 (V-491) (VVER-1200 (V-491)) (Erişim: [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1200\(V-491\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1200(V-491).pdf)).
- [18] W. Stocker, Design of Thermal Systems, 3rd edition, McGraw-Hill, 1989.
- [19] A. Bobat, "Akkuyu nükleer santrali üzerine bir anket ve düşündükleri", Türkiye 10. Enerji Kongresi, c.1, ss. 283-299, 2006.
- [20] <http://en.openei.org> (Erişim: Şubat 2024).
- [21] <https://tr.investing.com/commodities/uranium-futures-historical-data> (Erişim Ağustos 2024).