

**KOJENERASYON SİSTEMLERİNDEKİ YAKIT FİYATLARININ VE BİRİM YAKIT MALİYETLERİNİN ANALİZİ****Hasan Hüseyin ERDEM\***, Süleyman Hakan SEVİLGEN, Burhanettin ÇETİN,  
Ali Volkan AKKAYA*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL***Geliş /Received: 30.06.2003 Kabul/Accepted: 03.03.2004****ANALYSIS OF FUELS PRICE AND UNIT FUEL COST ON COGENERATION SYSTEMS****ÖZET**

Bu çalışmada kojenerasyon sistemlerinde kullanılan yakıtların 1991-2003 yılları arasındaki fiyatları analiz edilerek yıllık fiyat eskalasyonları belirlenmiştir. Bu analiz sonuçları kullanılarak, 2003-2023 yılları arasındaki döneme ait her yıl için tahmini yakıt fiyatları hesaplanmıştır. Yakıt fiyatlarının değişimi ekonomik analizleri zorlaştırmaktadır. Ekonomik analizlerin yapıldığı döneme ait fiyat değişimlerini içine alan sabit yakıt fiyatının belirlenmesi hesaplamaları kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle, 2003-2023 yılları arasında yakıtların bir değere getirilmiş fiyatları elde edilmiştir. Daha sonra, kojenerasyon sistemlerinin birim elektrik üretimi için yakıt masrafları bulunmuştur. Bu sistemlerde aynı yakıttan elektrik ve ısı enerjisi ürün olarak elde edilir. Yakıt masrafının ürünlere dağıtılması satış fiyatlarının belirlenmesi için gereklidir. Bu amaçla, yakıt masraflarının ürünlere dağıtılmasında iki sınır koşul belirlenmiş ve sınır koşullar için hesaplamalar yapılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Kojenerasyon, Birim yakıt maliyeti, Bir değere getirilmiş fiyat metodu**ABSTRACT**

In this study, price escalations of fuels used in cogeneration system have been determined in analyzing between 1991 and 2003 fuel price. With determination of price escalations, fuels price has been calculated for interval of 2003-2023 years. Owing to difficulty of evaluating of price increasing in economic analysis, Levelized Cost of fuels price has been obtained between 2003 and 2023 years. Fuel cost has been computed in using Levelized Cost method for unit electricity production related to specific fuel consumption of cogeneration systems. Due to gaining electricity and heat energy from single fuel in this systems, Calculations for two limit conditions have been realized to distribute from total fuel cost to this products.

**Keywords:** Cogeneration, unit fuel cost, Levelized cost method**1. GİRİŞ**

Kojenerasyon sistemleri, elektrik ve ısı enerjisinin beraber üretildiği sistemlerdir. Kojenerasyon sistemlerinin konvansiyonel güç ve ısı üretim sistemlerine göre sahip oldukları üstünlüklerden

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: e-mail: [herdem@yildiz.edu.tr](mailto:herdem@yildiz.edu.tr) ; tel: (0212) 259 7070 /2540/2727/2488

## ***Kojenerasyon Sistemlerindeki Yakıt Fiyatlarının...***

dolayı kullanımları artmaktadır. Bu sistemlerin en önemli avantajı, elektrik ve ısı enerjisini aynı yakıttan birlikte ürettiği için toplam yakıt tüketimini azaltmasıdır. Bu sayede işletmelerin enerjiye harcadıkları masraflar azalmaktadır. Ancak kojenerasyon sisteminin işletmeye sağladığı kazancın büyük olması için elektrik enerjisi üretiminin yanında ısı enerjisinin de üretilmesi ve kullanılması gereklidir [1].

Kojenerasyon sistemlerinin işletmelere sağladığı faydaların belirlenmesi için ekonomik analizlerinin yapılması zorunludur. Elektrik ve ısı enerjisinin kojenerasyon sisteminde elde edilmesinde üç masraf grubu vardır. Bunlar yatırım, yakıt, işletme ve bakım masraflarıdır. Yatırım masrafları bir kez yapılır ve işletmenin çalışma süresinden bağımsızdır. Yakıt masrafları işletmede kullanılan kojenerasyon sisteminin tipine, yakıt cinsine, yakıtın fiyatına ve yakıtın ısı kalitesine bağlıdır. Bu masraf grubu kojenerasyon sisteminin çalışma süresine bağlı olarak değişmektedir. Yakıt seçimi yapıldıktan sonra yakıt fiyatı haricindeki diğer parametreler sabit kalır. İşletme ve bakım masrafları ise işletmenin çalışma süresine bağlı olarak değişen bakım giderleri ile personel v.b. gibi sabit giderlerin toplamından oluşur. Bu üç masraf grubunun belirli bir süre için toplamı kojenerasyon sisteminin giderlerini oluşturur. Sistemden tek ürün elde edildiği durumlarda birim ürün maliyetleri, belirli bir sürede yapılan toplam masrafların aynı sürede üretilen ürün miktarına bölünmesiyle bulunur. Kojenerasyon sistemlerinde ise iki ürün olduğundan, yapılan toplam masrafların bu ürünlere dağıtılması birim ürün maliyetlerinin belirlenmesi için gereklidir. Değişik çalışmalar da bu dağıtımı yapmak için farklı yöntemler kullanılmıştır [2,3,4,5].

Toplam masraflar incelendiğinde yatırım masrafları zaman içinde sabit kalırken yakıt, işletme ve bakım masrafları zamanla değişim göstermektedir. Ayrıca, toplam masraflar içinde en büyük pay yakıt masraflarına aittir [6]. Kojenerasyon sistemlerinde kullanılan yakıtın herhangi bir sebeple bulunmaması durumunda, farklı bir yakıtın ikinci yakıt olarak kullanılması mümkündür. Bu nedenle, sistemde kullanılacak birinci ve ikinci yakıtın belirlenmesi gerekir. Seçim yapılırken ilk şart yakıtın temin edilebilirliğidir. Temin edilebilen yakıtlar içinden ucuzluk sırasına göre birinci ve ikinci yakıt seçilir. İkinci yakıt, birinci yakıtın bulunamadığı zamanda ya da birinci yakıtın fiyat üstünlüğünü kaybettiğinde kullanılan yakıttır. Dolayısıyla kojenerasyon sisteminin ve kullanılan yakıtın seçiminde ve ürün maliyetlerinin hesaplanmasında yakıt fiyatları ve fiyatlardaki zamana bağlı değişimler dikkate alınmak zorundadır. Bunların göz ardı edilmesi ile yapılan değerlendirmeler hesaplarda önemli hatalara sebep olacaktır ve işletmeleri zarara sokacaktır.

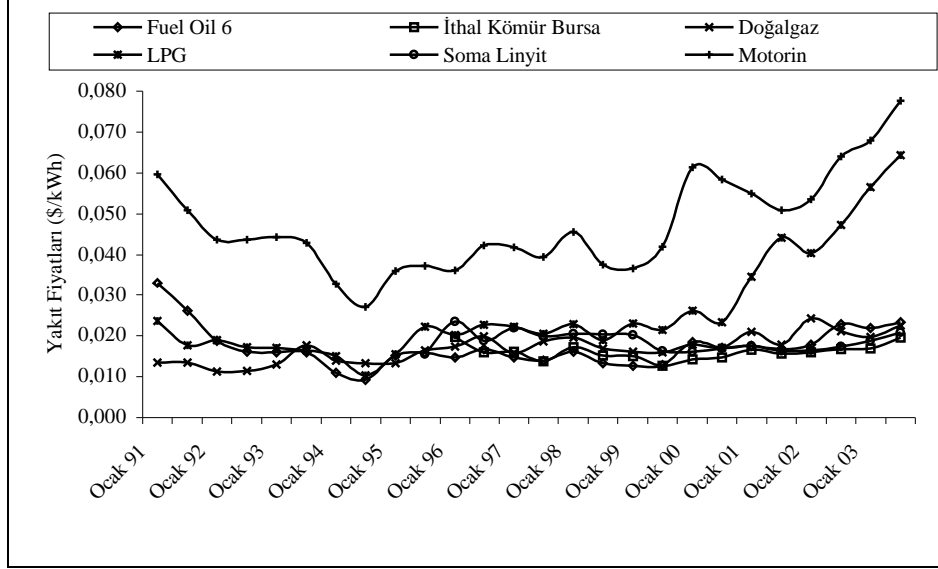
Türkiye’de kojenerasyon sistemleri için kullanabilecek yakıtlar olarak fuel oil 6, doğalgaz, ithal kömür, LPG, yerli linyit (Soma) ve motorin alınmış ve bu yakıtların 1991-2003 yılları arasındaki birim fiyatları değerlendirilmiştir. Yakıt fiyatlarının analizi sonucunda bu döneme ait fiyat eskalasyonları belirlenmiş ve 2003-2023 tarihleri arasındaki yakıt birim fiyat tahminleri yapılmıştır. İskonto oranlarına bağlı olarak geleceğe ait 20 yıllık dönemdeki bir değere getirilmiş yakıt fiyatları (Levelized Fuel Price) bulunmuştur. Daha sonra bir değere getirilmiş yakıt fiyatları kullanılarak ısı-elektrik oranı ve özgül ısı tüketimine bağlı olarak yakıt masraflarının elektrik ve ısı ürünleri üzerine olan payları iki sınır koşul için hesaplanmıştır.

## **2. YAKIT FİYATLARININ ANALİZİ**

### **2.1. Yakıt Fiyat Eskalasyonları**

Türkiye’de kojenerasyon sistemleri için kullanabilecek yakıtlar olarak fuel oil 6, doğalgaz, ithal kömür, LPG, yerli linyit (Soma) ve motorin alınmıştır. 1991-2003 yılları arasındaki dönem için birim yakıt fiyatları Şekil 1’de gösterilmiştir [7]. Yakıt fiyatlarının birbirleriyle ekonomik karşılaştırılmasının yapılabilmesi için alt ısı değerleri, özgül hacimleri ve döviz kuru göz önüne alınarak orijinal fiyat birimlerinden  $[TL/Nm^3, TL/kg, TL/lt]$   $\$/kWh$  dönüştürülmüştür.

Yakıt fiyatlarının 1991-2003 yılları arasında 6 aylık dönemler için verilen değerleri kullanılarak yıllık fiyat eskalasyonları belirlenmiştir. Yakıtlara ait fiyat değişimleri için eğri uydurma yöntemi ile fiyat değişim eğrileri oluşturulmuştur. Bazı yakıtlarda belirli dönemlerde fiyat düşüşü görülse de, son dönemlerdeki yakıt fiyatları artış eğilimindedir. Yakıtın birim fiyatında artış görülmeye başladığı yıl referans yıl ve fiyatı da referans fiyat ( $F_{y_0}$ ) olarak alınmıştır. Fiyat artışları 6 aylık olduğundan periyot (n) 6 ay alınmıştır.



Şekil 1. 1991-2003 birim yakıt fiyat değişimleri

Referans yılındaki periyot başlangıç periyodu alınarak ( $n=0$ ), yakıt fiyatını ( $F_{y_n}$ ) veren periyoda ait yakıt fiyat eskalasyonu ( $e_f$ ) eşitlik 1'e [8] uyacak şekilde bulunmuştur.

$$F_{y_n} = F_{y_0} (1 + e_f)^n \quad (1)$$

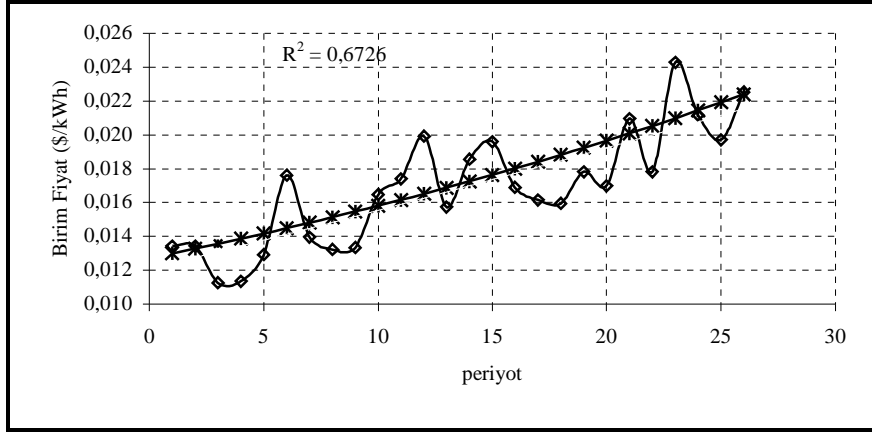
Şekil 2'de doğalgaz için gerçek yakıt fiyatları, belirlenen yakıt fiyat eskalasyonuna göre bulunan yakıt fiyatları ve  $R^2$  değerleri gösterilmiştir.

Eşitlik 2 kullanılarak belirlenen periyotluk yakıt eskalasyonundan yıllık yakıt eskalasyonuna ( $e_{fy}$ ) geçilmiştir [8]. Burada m bir yıl içindeki periyot sayısını ( $m=2$ ) göstermektedir. Tablo 1'de ise tüm yakıtlar için aylık, altı aylık ve yıllık yakıt fiyat eskalasyonları verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi en düşük yıllık yakıt eskalasyonu sıralamasında % 6,09 doğalgaz ilk sıradadır. Doğalgazı sırası ile % 8,16 linyit (Soma) ve % 10,25 ile ithal kömür ve fuel oil 6 izlemektedir.

$$e_{fy} = (1 + e_f)^m - 1 \quad (2)$$

Yakıtlar için belirlenen yıllık yakıt eskalasyonları kullanılarak 2003-2023 yılları arası için tahmini yakıt fiyatları belirlenmiştir. Fiyat artışlarının 20 yıllık dönem alınarak incelenme sebebi, kojenerasyon sistemlerinin ekonomik ömrünün 20 yıl olmasıdır. Bu nedenle, 2003 yılında kurulacak bir kojenerasyon sistemi bu dönemdeki yakıt fiyatlarını kullanacaktır. Referans yıl olarak 2003 ve referans yakıt fiyatı olarak Mayıs 2003 fiyatları alınmıştır (Tablo 1). Şekil 3'de Fuel Oil 6, ithal kömür (Bursa), doğalgaz ve linyit (Soma) için 2003-2023 yılları arasındaki, Şekil 4'de aynı yakıtlar için 2003-2013 yılları arasındaki ve Şekil 5'de LPG ve motorin için 2003-2023 yılları arasındaki tahmini yakıt fiyatları verilmiştir.

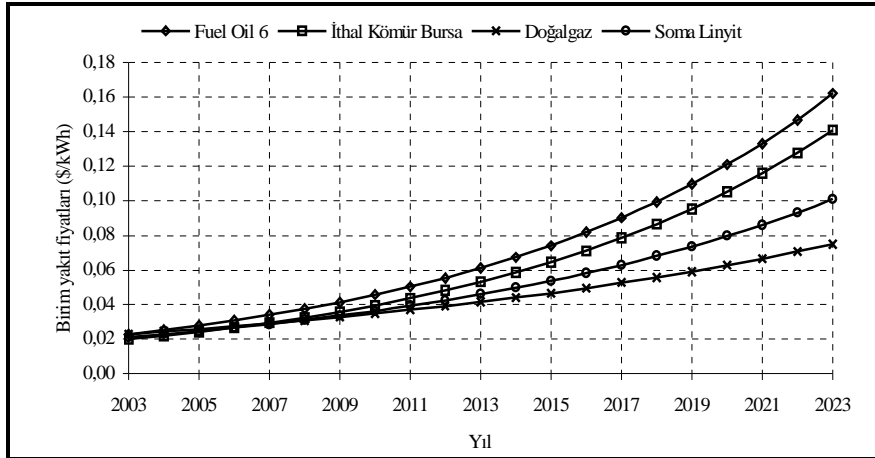
## Kojenerasyon Sistemlerindeki Yakıt Fiyatlarının...



Şekil 2. Doğal gaz için 1991-2003 yılları arası fiyat değişimi

Tablo 1. Yakıtların fiyat eskalasyonları

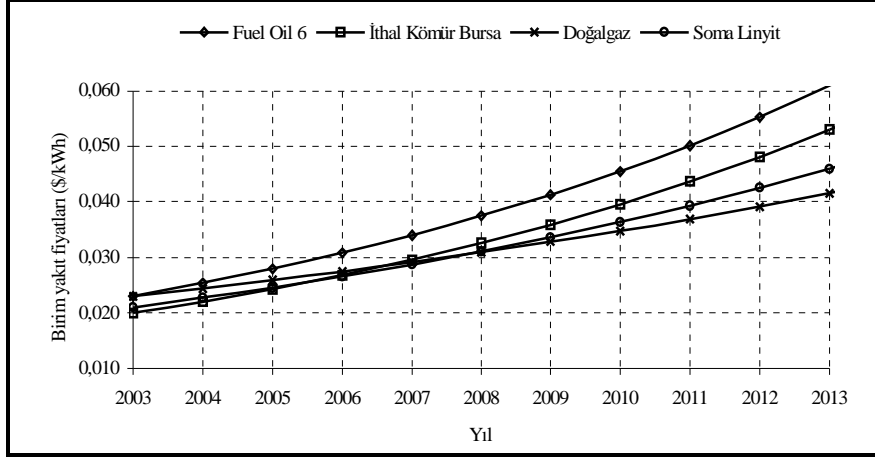
Yakıtlar	Yakıt fiyatı (May.03) \$/kWh	Birim Fiyat Eskalasyonu ( $e_f$ )		
		Aylık	6 Aylık	Yıllık
Fuel Oil 6	0,023	0,0082	0,05	0,1025
İthal Kömür Bursa	0,020	0,0082	0,05	0,1025
Doğal gaz	0,023	0,0049	0,03	0,0609
LPG	0,064	0,0145	0,09	0,1881
Soma Linyit	0,021	0,0066	0,04	0,0816
Motorin	0,078	0,0098	0,06	0,1236



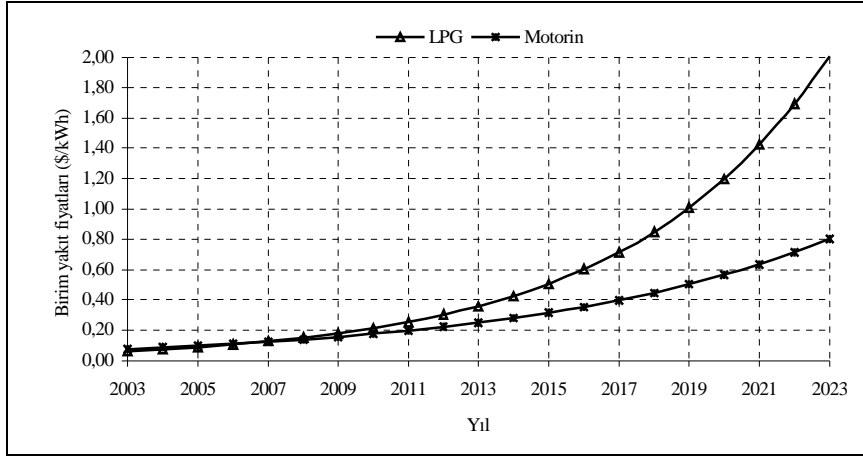
Şekil 3. 2003-2023 yılları arası tahmini yakıt fiyat değişimleri

Şekil 3,4 ve 5'den görüleceği gibi yakıtların yıllık fiyat eskalasyonlarına bağlı olarak gelecekte fiyat farkları artmaktadır. Ayrıca bugünkü değerler ile birbirlerine göre ucuzluk avantajı olan yakıtlar arasındaki bu avantaj belirli bir yıldan sonra yer değiştirmektedir. 2003 yılı için ucuzluk sıralaması ithal kömür, linyit (Soma), doğalgaz, fuel oil, LPG ve motorin şeklindedir.

Şekiller incelenerek Tablo 2’de verilen yıllara göre ucuz yakıt sıralamaları elde edilmiştir. 2003-2005 yılları arasında ithal kömür, 2005-2007 yılları arasında linyit (Soma) ve 2007 yılından sonra doğalgaz en ucuz yakıttır. İkinci ucuz yakıt sıralaması ise 2003-2005 arasında linyit (Soma), 2005-2006 arasında ithal kömür, 2006-2007 arasında doğalgaz ve 2007 den sonra linyit (Soma) şeklindedir.



Şekil 4. 2003-2013 yılları arası tahmini yakıt fiyatları



Şekil 5. 2003-2013 yılları arası tahmini yakıt fiyatları

## 2.2. Bir Değere Getirilmiş Yakıt Fiyatları

Kojenerasyon sistemlerinin ekonomik analizlerinin yakıt fiyatlarının değişen değerleri ile yapılmasında zorluklar vardır. Bu nedenle, bilinen bir periyottaki (n) yakıt fiyatları referans bir tarihe, geçerli iskonto oranıyla (i) getirilerek bugünkü toplam değeri ( $C_{PW}$ ) elde edilir. Bugünkü toplam değer, o periyottaki eşit fiyat serisine dönüştürülerek bir değere getirilmiş birim yakıt fiyatı ( $F_{Y1}$ ) elde edilir [9].

**Tablo 2.** 2003-2023 yılları arası tahmini ucuz yakıt sıralaması

Sıralama	Dönemler			
	2003-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2023
1	İthal Kömür	Soma Linyit	Soma Linyit	Doğalgaz
2	Soma Linyit	İthal Kömür	Doğalgaz	Soma Linyit
3	Doğalgaz	Doğalgaz	İthal Kömür	İthal Kömür
4	Fuel Oil 6	Fuel Oil 6	Fuel Oil 6	Fuel Oil 6
5	LPG	LPG	Motorin	Motorin
6	Motorin	Motorin	LPG	LPG

$$C_{PW} = \sum_{t=0}^n F_{yo} \times (1+e_{fy})^t \times (1+i)^{-t} \quad (3)$$

$$F_{yl} = \frac{C_{PW}}{\sum_{t=0}^n (1+i)^{-t}} = \frac{\sum_{t=0}^n F_{yo} \times (1+e_{fy})^t \times (1+i)^{-t}}{\sum_{t=0}^n (1+i)^{-t}} \quad (4)$$

Böylece bir değere getirilmiş birim yakıt fiyatı ile belirlenen periyotta yakıtların fiyat eskalasyonunu ve paranın zaman içindeki değerini dikkate alan bir tek yakıt fiyatı elde edilmiş olur. Kojenerasyon sistemlerinde bir değere getirilmiş yakıt fiyatı hesaplamalarında referans tarih olarak sistemin üretime başladığı tarih ve periyot olarak ekonomik ömrü alınmalıdır. Referans tarihi 2003 ve sistemlerin ekonomik ömürleri 20 yıl alınarak iskonto oranının % 0-10 aralığındaki değerleri için yakıtların bir değere getirilmiş yakıt fiyatları (\$/kWh) hesaplanarak Tablo 3 ve Şekil 6'da verilmiştir.

**Tablo 3.** Farklı iskonto oranları için bir değere getirilmiş yakıt fiyatları (\$/kWh)

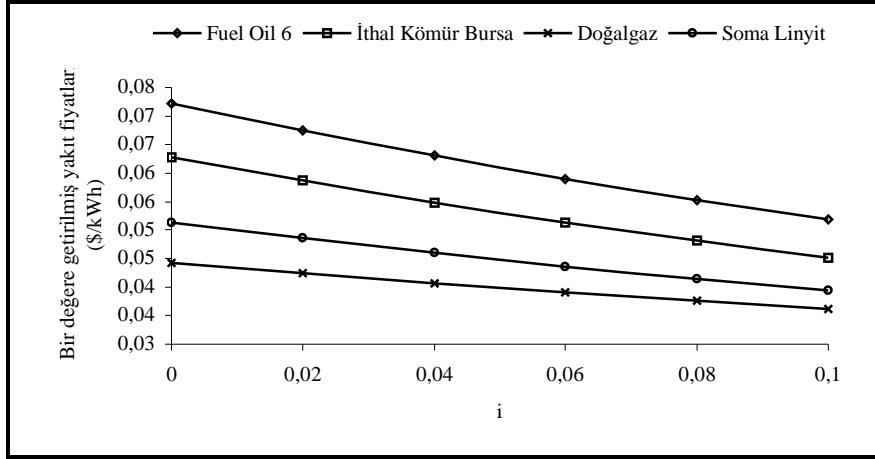
Yakıtlar	İskonto oranı					
	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
Fuel Oil 6	0,0722	0,0675	0,0631	0,0590	0,0553	0,0519
İthal Kömür Bursa	0,0628	0,0587	0,0549	0,0513	0,0481	0,0452
Doğalgaz	0,0443	0,0424	0,0407	0,0391	0,0376	0,0362
LPG	0,5884	0,5287	0,4736	0,4237	0,3791	0,3396
Soma Linyit	0,0514	0,0486	0,0460	0,0436	0,0414	0,0394
Motorin	0,3172	0,2932	0,2708	0,2502	0,2314	0,2147

Şekil 6'dan görüldüğü gibi en düşük bir değere getirilmiş fiyat doğalgazdadır. Doğalgazdan sonra sıralama linyit (Soma), ithal kömür, fuel oil, motorin ve LPG şeklindedir.  $i=0$  alınması paranın zaman içinde değişmediğini göstermektedir. Bu durumda bir değere getirilmiş yakıt fiyatları 20 yıllık değerlerin ortalaması olmaktadır. İskonto oranı % 6 için hesaplamalar yapılmıştır.

### 3. BİRİM YAKIT MALİYETLERİ

Kojenerasyon sistemindeki yakıt masraflarının elektrik ve ısı enerjisi üzerine olan paylarının belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılabilir. Kullanılan yöntemlerde, elektrik ve ısı enerjisinin üretim maliyetlerine yakıt masraflarının dağıtılmasının iki sınırı vardır. Birinci sınır durumda, sistemdeki tüm yakıt masrafları elektrik üretim maliyetine aktarılır. Bu durumda birim elektrik üretim maliyeti en büyük değerini, birim ısı enerjisi üretim maliyeti en küçük değerini alacaktır.

İkinci sınıır durum, sistemde üretilen ısı enerjisine eş enerjinin kazan sisteminde üretilmesi durumunda yakıt masrafının ısı enerjisine, kalan yakıt masrafının elektrik enerjisine aktarılmasıdır. Bu durumda ise birim ısı enerjisi üretim maliyeti en yüksek değerine ve birim elektrik üretim maliyeti en küçük değerine ulaşacaktır. Gerçek koşullardaki birim ısı ve elektrik üretim maliyetlerine aktarılan yakıt masrafları bu iki değer arasında bir değere sahip olacaktır.



Şekil 6. Farklı iskonto oranları için bir değere getirilmiş yakıt fiyatları (\$/kWh)

### 3.1. Yakıt Maliyetinin Sadece Elektrik Enerjisine Aktarılması

Kojenerasyon sistemlerinde, elektrik ve ısı enerjisi için bir tek yakıt tüketimi yapılmaktadır. Tüketim miktarı ve yakıtın birim fiyatı yakıt masrafını belirlemektedir. Bir önceki bölümde yakıtların bir değere getirilmiş birim fiyatları belirlenmiştir. Birim elektrik enerjisi üretimi için yakıt tüketim miktarı, özgül yakıt tüketimi ( $b_e$ ) olarak adlandırılır. Bu değer özgül ısı tüketimi ( $q_e$ ) ve yakıtın alt ısı değerine ( $H_u$ ) göre;

$$b_e = \frac{3600}{H_u} \cdot q_e \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kW}_e \cdot \text{h}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kW}_e \cdot \text{h}} \right] \quad (5)$$

yazılır. Özgül ısı tüketimi, birim elektrik enerjisi üretimi için sisteme verilmesi gereken ısı enerjisi miktarıdır. Bu durumda birim elektrik enerjisi için yakıt maliyeti ( $g_f$ );

$$g_f = b_e \cdot F_{y1} = \frac{3600}{H_u} \cdot q_e \cdot F_{y1} \left[ \frac{\$}{\text{kW}_e \cdot \text{h}} \right] \quad (6)$$

olur. Özgül ısı tüketimleri, kojenerasyon sistemlerin tipine bağlı olarak değişik değerlerde olabilir. Tablo 4'de farklı kojenerasyon teknolojileri için özgül ısı tüketimlerinin aralıkları verilmiştir [7]. Bu değerlerin azalması birim elektrik üretimi için gerekli ısı enerjisinin azalması anlamına geleceğinden, birim yakıt tüketimi de azalacaktır.

### 3.2. Yakıt Maliyetinin Elektrik ve Isı Enerjisine Dağıtılması

Kojenerasyon sistemleri, elektrik üretiminden kaynaklanan atık ısıyı ısı enerjisi olarak tesise geri kazandırır. Sistemdeki atık ısının miktarı ve faydalı ısıya dönüştürülme oranı kojenerasyon sisteminin teknolojisine bağlıdır. Birim elektrik enerjisi için sistemde üretilen ısı enerjisi miktarı ısı-elektrik oranı ( $o_e$ ) olarak adlandırılır. Bu değer büyük olması kojenerasyon sistemine giren

## Kojenerasyon Sistemlerindeki Yakıt Fiyatlarının...

yakıt enerjisinden daha çok faydalandığını ve dolayısıyla kullanıcıya daha fazla fayda sağladığını gösterir. Kojenerasyon teknolojilerine ait ısı-elektrik oranları Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Kojenerasyon sistemlerinin özgül ısı tüketimleri ve ısı-elektrik oranları [7]

Kojenerasyon Sistemi	Özgül Isı Tüketimi	Isı-Elektrik Oranı
Karşı Basınçlı Buhar Türbini	2,9 – 7,1	4,0-14,3
Kondensasyonlu Buhar Türbini	2,5 – 4,5	2,0-10,0
Basit Çevrim Gaz Türbini	2,2 – 4,0	1,3-2,0
Kombine Çevrim	2,2 – 2,9	1,0-1,7
Diesel Motor	2,2 – 2,9	0,4-1,25
Gaz Motoru	2,5 – 3,7	1,0-3,0

Kojenerasyon sisteminde üretilen ısı enerjisi, bu sistem olmaması durumlarında kazanlardan üretilir. Bu nedenle, ısı enerjisinin birim yakıt maliyeti belirlenirken kazanda yakılan yakıt miktarına bağlı yakıt masrafı belirlenmelidir. Kazanda birim ısı enerjisi için yakılan yakıt miktarı ( $b_{ek}$ ) kazan verimi ( $\eta_k$ ) ve yakıtın ısı değerine göre;

$$b_{ek} = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_k} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}} \right] \quad (7)$$

yazılabilir. Kojenerasyon sisteminde üretilen ısı miktarına eş ısının kazanda üretilmesi durumundaki yakıt tüketim miktarı ( $b_{eie}$ );

$$b_{eie} = b_{ek} \cdot o_{ie} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}} \right] \quad (8)$$

şeklinde. Bu durumda kojenerasyon sisteminde üretilen birim ısı enerjisi için yakıt maliyeti ( $g_{fi}$ );

$$g_{fi} = b_{eie} \cdot F_{yl} = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_k} \cdot o_{ie} \cdot F_{yl} \left[ \frac{\$}{\text{kWh}} \right] \quad (9)$$

olur. Kojenerasyon sisteminde, birim elektrik üretimi için yapılan yakıt maliyeti ile ısı enerjisi aktarılan bölümü arasındaki fark, birim elektrik enerjisine kalan yakıt maliyetini verecektir.

$$g_{fe} = g_f - g_{fi} = (b_e - b_{eie}) \cdot F_{yl} = \frac{3600}{H_u} \left( q_e - \frac{o_{ie}}{\eta_k} \right) F_{yl} \left[ \frac{\$}{\text{kWh}} \right] \quad (10)$$

Kojenerasyon sistemlerinde ısı-elektrik oranının artması ısı enerjisine aktarılan yakıt maliyetini artırmaktadır. Isı-elektrik oranı özgül ısı tüketimine bağlı olarak belirli bir değerden büyük olmaz. Bu maksimum değer, kritik ısı-elektrik oranı ( $o_{ie}^*$ ) olarak adlandırılmıştır (eşitlik 11). Bu durumda, kojenerasyon sisteminden atılan tüm ısı geri kazanılmaktadır. Gerçekte ise atılan ısının tümünden faydalanmak mümkün olmadığından, ısı-elektrik oranı her zaman bu değerden daha küçük olacaktır. Tablo 5’de özgül ısı tüketimi ile kritik ısı-elektrik oranları gösterilmiştir.

$$o_{ie}^* = (q_e - 1) \quad (11)$$

**Tablo 5.** Özgül ısı tüketimine göre kritik ısı-elektrik oranları

Özgül ısı tüketimi (kW <sub>h</sub> /kW <sub>e</sub> h)	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Kritik ısı-elektrik oranı	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4



### 3.3. Kojenerasyon Sistemlerinde 2003-2023 Arası Döneme Ait Yakıt Maliyetleri

Kojenerasyon sistemlerine ait yakıt masrafları, bir önceki bölümde belirlenen bir değere getirilmiş yakıt fiyatları ile farklı özgül ısı tüketimleri ve ısı-elektrik oranları için hesaplanmıştır. Bu masrafların elektrik ve ısı enerjisine düşen payları iki sınır durum için belirlenmiştir. Hesaplamalarda kazan verimi % 85 alınmıştır. Birinci sınır durumdaki birim elektrik üretimi için yakıt maliyetleri, farklı yakıt tipleri için özgül ısı tüketimine göre Tablo 6'da verilmiştir. En düşük yakıt maliyeti doğalgazın tüketilmesi durumundadır. Tablo 7'de ise yakıt tipleri için ısı-elektrik oranına bağlı olarak birim ısı enerjisi için yakıt maliyetleri verilmiştir. İkinci sınır durumdaki birim elektrik üretimi için yakıt maliyetleri, sırası ile fuel oil, doğalgaz, ithal kömür, linyitin (Soma) ısı enerjisine aktarılan yakıt maliyetlerinin çıkartılması ile elde edilmiş ve Tablo 8,9,10,11'de verilmiştir.

**Tablo 6.** Özgül ısı tüketimi ile birim elektrik enerjisi için yakıt maliyeti ( $g_f$ ) (cent/kWh)

Yakıtlar	Özgül ısı tüketimi ( kWh/kWh <sub>e</sub> )						
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Fuel Oil 6	11,81	14,76	17,71	20,66	23,61	26,56	29,51
İthal Kömür Bursa	10,27	12,83	15,40	17,96	20,53	23,10	25,66
Doğalgaz	7,81	9,77	11,72	13,67	15,63	17,58	19,53
LPG	84,74	105,93	127,12	148,30	169,49	190,67	211,86
Soma Linyit	8,72	10,90	13,08	15,26	17,44	19,62	21,80
Motorin	50,03	62,54	75,05	87,55	100,06	112,57	125,08

**Tablo 7.** Isı-elektrik oranı ile birim ısı enerjisi için yakıt maliyetinin değişimi ( $g_f$ ) (cent/kWh)

Isı-elektrik oranı (kWh <sub>i</sub> /kWh <sub>e</sub> )	Yakıtlar					
	Fuel Oil 6	İthal Kömür Bursa	Doğalgaz	LPG	Soma Linyit	Motorin
1	6,94	6,04	4,60	49,85	5,13	29,43
2	13,89	12,08	9,19	99,70	10,26	58,86
3	20,83	18,12	13,79	149,55	15,39	88,29
4	27,78	24,15	18,38	199,40	20,51	117,72

**Tablo 8.** Fuel oil 6 için birim elektrik üretimine ait yakıt maliyetleri ( $g_{fe}$ ) (cent/kWh)

Isı-elektrik oranı (kWh <sub>i</sub> /kWh <sub>e</sub> )	Özgül ısı tüketimi ( kWh <sub>i</sub> /kWh <sub>e</sub> h )						
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
1	4,86	7,81	10,76	13,71	16,67	19,62	22,57
2			3,82	6,77	9,72	12,67	15,62
3					2,78	5,73	8,68
4							1,74

**Tablo 9.** Doğalgaz için birim elektrik üretimine ait yakıt maliyetleri ( $g_{fe}$ ) (cent/kWh)

Isı-elektrik oranı (kWh <sub>i</sub> /kWh <sub>e</sub> )	Özgül ısı tüketimi ( kWh <sub>i</sub> /kWh <sub>e</sub> h )						
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
1	3,22	5,17	7,12	9,08	11,03	12,98	14,94
2			2,53	4,48	6,43	8,39	10,34
3					1,84	3,79	5,74
4							1,15

## Kojenerasyon Sistemlerindeki Yakıt Fiyatlarının...

**Tablo 10.** İthal Kömür (Bursa) için birim elektrik üretimine ait yakıt maliyetleri ( $g_{fe}$ ) (cent/kWh)

Isı-elektrik oranı (kWh/kWh <sub>e</sub> )	Özgül ısı tüketimi ( kWh/kWh <sub>e</sub> )						
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
1	4,23	6,79	9,36	11,93	14,49	17,06	19,63
2			3,32	5,89	8,45	11,02	13,59
3					2,42	4,98	7,55
4							1,51

**Tablo 11.** Linyit (Soma) için birim elektrik üretimine ait yakıt maliyetleri ( $g_{fe}$ ) (cent/kWh)

Isı-elektrik oranı (kWh/kWh <sub>e</sub> )	Özgül ısı tüketimi ( kWh/kWh <sub>e</sub> )						
	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
1	3,59	5,77	7,95	10,13	12,31	14,49	16,67
2			2,82	5,00	7,18	9,36	11,54
3					2,05	4,23	6,41
4							1,28

## 4. SONUÇLAR

Kojenerasyon sistemlerindeki yakıt masraflarının toplam masraflar içindeki payının fazla olması ve yakıt fiyatlarının değişmesi ile bu payın değişimi kojenerasyon sistemlerindeki yakıt fiyatlarının ve yakıt masraflarının analizini zorunlu kılmaktadır.

Gelecekteki yakıt fiyatlarının tahmininde geçmişteki yakıt fiyatlarından yararlanmak mümkündür. Bu amaçla, kojenerasyon sistemlerinde kullanılabilen yakıtların 1991-2003 yılları arasındaki birim fiyatları analiz edilerek fiyat eskalasyonları belirlenmiştir. En düşük yıllık yakıt fiyat eskalasyonu % 6,09 oranı ile doğalgaza aittir. Yıllık yakıt fiyat eskalasyonu diğer yakıtlarda sırasıyla linyit (Soma) % 8,16, fuel oil ve ithal kömür % 10,25'dir. LPG ve motorinde ise % 18,81 ve 12,36 gibi yüksek bir değerdedir. 2003 tarihli yakıt fiyatları esas alınarak gelecek 20 yıl için belirlenen yakıt fiyat eskalasyonları kullanılarak tahmini yakıt fiyatları hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda 2003-2007 tarihleri arasında en ucuz yakıt sıralaması değişirken, 2007'den sonra sıralama doğalgaz, linyit (Soma), ithal kömür, fuel-oil, motorin ve LPG şeklinde sabit kalmaktadır. Ayrıca bu tarihten sonra yakıt fiyatları arasındaki fark hızlı bir şekilde artmaktadır.

Kojenerasyon sistemlerinde yakıt fiyatlarının değişimi ekonomik hesaplamaların yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle 2003-2023 yılları arasındaki dönem için yakıtlara ait bir değere getirilmiş birim yakıt fiyatları iskonto oranının değişimine göre elde edilmiştir. Buna göre % 6'lık iskonto oranının olduğu bir ortamda doğalgazın fiyatı 3,91 cent/kWh olarak en ucuz bulunmuştur. Diğer yakıtların bir değere getirilmiş maliyetleri cent/kWh olarak linyit(Soma) 4,36, ithal kömür 5,13, foil oil 5,9, motorin 25,02 ve LPG 42,37'dir. Motorin ve LPG'nin birim fiyatları kojenerasyon sistemlerinde kullanılmayacak kadar yüksektir. Bu nedenle, bu yakıtlara ait birim yakıt maliyetleri hesaplanmamıştır.

Bir değere getirilmiş birim yakıt fiyatları ile kojenerasyon sistemlerinin özgül ısı tüketimleri ve ısı-elektrik oranları kullanılarak birim yakıt maliyetleri hesaplanmıştır. Özgül ısı tüketiminin azalması sistemde harcanan yakıt miktarını azaltmakta ve yakıt maliyetlerini düşürmektedir. Özgül ısı tüketiminin 2 kWh/kWh<sub>e</sub> olması durumunda, doğalgaz yakıtlı kojenerasyon sisteminin birim elektrik üretimi için yakıt maliyeti 7,81 cent/kWh<sub>e</sub> ile en düşük değere sahiptir. Özgül ısı tüketiminin 5 kWh/kWh<sub>e</sub> olması durumunda, doğalgaz için birim elektrik üretimi için yakıt maliyeti 19,53 cent/kWh<sub>e</sub> yükselmektedir. Doğalgazdan sonra birim elektrik üretimi için yakıt maliyetinin ucuzluk sıralamasında linyit (Soma), ithal kömür ve fuel oil gelmektedir. Tüm yakıt masraflarının elektriğe aktarıldığı bu durumda yakıt maliyetleri elektrik üretim maliyetlerini çok artırmaktadır. Belirlenen birim elektrik maliyetleri ile kojenerasyon

sistemlerinin konvansiyonel elektrik üretim sistemleri ile rekabet etmesi mümkün değildir. Bu nedenle, kojenerasyon sistemlerinde elektrik enerjisi ile beraber ısı enerjisi mutlaka üretilmelidir. Elektrik üretimine bağlı olarak üretilen ısı miktarını gösteren ısı-elektrik oranlarının farklı değerleri için hesaplamalar yapıldığında, elektrik üretimine düşen yakıt maliyetlerinin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Yeni elektrik üretimine ait yakıt maliyetleri ile, kojenerasyon sistemlerinin elektrik üretim maliyetleri açısından konvansiyonel sistemler ile rekabet etmesi mümkün olacaktır. Tüm yakıtlarda, ısı-elektrik oranının artması elektrik üretimine düşen yakıt maliyetlerini düşürmektedir. Bu durumda ise ısı enerjisi maliyetleri kazan üretimindekine eşit olacaktır. Bu nedenle, gerçek şartlardaki elektrik ve ısı enerjisine yakıt maliyetlerinin dağılımı, bu iki durum için belirlenen değerler arasında alınabilir.

**KAYNAKLAR**

- [1] Hepbaşlı A., "Development of Cogeneration in Turkey", *Energy Sources*, 24, 195-204, 2002.
- [2] Shipley A.M., Green N., K.McCormack, Li J., et.al., "Certification of Combined Heat and Power Systems: Establishing Emissions Standards", American Council for an Energy-Efficient Economy, Report Number IE014, September 2001.
- [3] Casella F., Maffezzoni C., Piroddia L., Pretolani F., "Minimising Production Cost in Generation and Cogeneration Plants", *Control Engineering Practice*, 9, 283-295, 2001.
- [4] Sundberg G., Henning D., "Investments in Combined Heat and Power plants : Influence of fuel Price on Cost Minimised operation", *Energy Conversion and Management*, 43,639-650, 2002.
- [5] Bilgen E., "Exergetic and Engineering Analysis of Gas Turbine Based Cogeneration Systems", *Energy*, 25, 1215-1229, 2000.
- [6] Erdem H.H ve Sevilgen S.H., "Maliyet Bölümlerinin Ağırlıkları ile Elektrik Üretim Teknolojilerinin Yük-Süre Eğrisindeki Sıralamanın Belirlenmesi", 7. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Ankara,(2002),503-515
- [7] Teknik Yayıncılık, "Sanayideki Kullanım için Yakıt Fiyatların Karşılaştırılması",*Doğal Gaz LPGve Fuel Oil Dergisi*, 50-52, 2003.
- [8] Aybers N.,Şahin B., "Enerji Maliyeti",Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası,1995, İstanbul.
- [9] Şahin B.,Bekdemir Ş., "Kombine Çevrim Güç Tesislerinin Mukayeseli Ekonomik Etüdü ve ekonomik Çalışma Bölgelerinin Belirlenmesi",Türkiye 6. Enerji Kongresi,İzmir, (1995).