

## UNIT ELECTRICITY PRODUCTION ANALYSIS OF GAS TURBINES ON PART LOAD

**Hasan Hüseyin ERDEM\***, Süleyman Hakan SEVİLGEN, Ali Volkan AKKAYA,  
Burhanettin ÇETİN

*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

**Geliş/Received: 24.05.2004 Kabul/Accepted: 09.03.2005**

### ABSTRACT

Gas turbine systems are one of the most preferred systems in the distributed power production. The most used gas turbines are simple one shaft gas turbines because these type gas turbines are simple and have low investment costs. In this study, unit electricity production costs on the part load of the simple gas turbines producing 5 MW power, which have different design parameters, have been computed. Levelized cost method has been used in the cost calculation. Furthermore, the parameters effects on unit electricity production costs have been investigated. As a conclusion, it has been demonstrated that unit electricity production costs on the part and full load for a certain power have been a decisive factor in the selecting power production plant.

**Keywords:** Levelized cost method, Electricity production cost, Gas turbine.

**MSC number/numarası:** 80A17, 74A15, 74G65

### GAZ TÜRBİNLERİNİN KISMİ YÜKLERDEKİ BİRİM ELEKTRİK ÜRETİM MALİYETİNİN ANALİZİ

#### ÖZET

Dağıtılmış güç üretiminde en çok tercih edilen sistemlerden biri gaz türbinli sistemlerdir. Gaz türbinleri içinde en çok kullanılan basit tek şaftlı gaz türbinleridir. Bunun nedeni ise basit ve yatırım masraflarının düşük olmasıdır. Bu çalışmada, farklı dizayn parametrelerine sahip 5 MW güç üreten basit gaz türbinlerinin kısmi yüklerdeki birim elektrik üretim maliyetleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda bir değere getirilmiş maliyet metodu kullanılmıştır. Ayrıca, parametrelerin birim elektrik üretim maliyetlerine etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, belirlenmiş bir güç için, kısmi ve tam yükteki birim elektrik üretim maliyetlerinin, santral seçiminde karar parametresi olarak değerlendirme gerekliliği gösterilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Bir değere getirilmiş maliyet metodu, Elektrik üretim maliyeti, Gaz türbini.

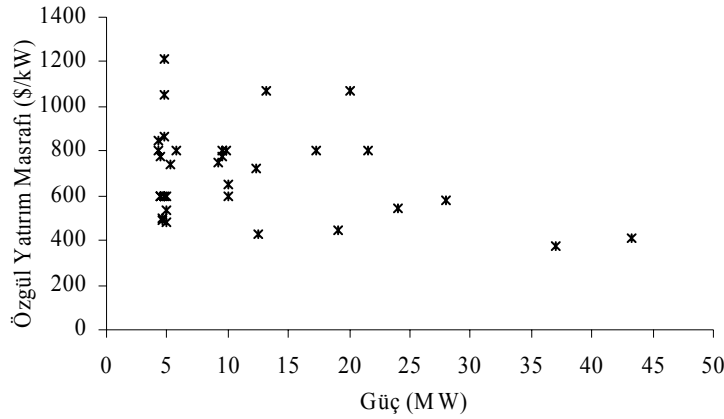
#### 1. GİRİŞ

Gaz türbinleri özellikle son yıllarda elektrik üretim sektöründe artarak kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri de performanslarının iyileşmesidir. Bu iyileşmeleri güç ve termik verimi artıran düzenlemeler sağlamıştır. Fakat özellikle küçük güçlerdeki kojenerasyon sistemlerinde basit ve ilk yatırım masraflarının düşük olmasından dolayı basit tek şaftlı gaz türbinleri tercih edilmektedir. Şekil 1'de Türkiye'de 2001 yılı itibari ile kojenerasyon

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Autor: e-posta: herdem@yildiz.edu.tr, Tel: (0212) 259 70 70/2727

sistemlerinde kullanılan 34 adet gaz türbininden 17 adetinin 4-5,5 MW arasında olduğu görülmektedir.

Gaz türbinlerinde performans kriterleri elektrik üretim gücü ve termik verimdir. Gücün artması elektrik üretim miktarını artırır. Termik verimin artması ise birim elektrik üretimi için gerekli yakıt miktarını azaltır. Gerçek gaz türbinlerinin dayandığı Brayton çevrimi çözümlendiğinde gücün göstergesi olan net iş ve termik verime etki eden dizayn parametrelerinin türbin giriş sıcaklığı ( $T_3$ ) ve kompresör basınç oranı ( $P_{rc}$ ) olduğu görülür [1-5]. Türbin giriş sıcaklığı arttıkça hem net iş hem de termik verim artar. Bu nedenle, türbin giriş sıcaklığının artması performansı iyileştirir. Bu sıcaklık değerinin üst sınırını kullanılan malzeme belirler. Belirli bir  $T_3$  değerinde kompresör basınç oranının net işi ve termik verimi maksimum yapan ayrı ayrı iki değeri vardır. Gaz türbini dizaynında  $T_3$  belirlendikten sonra kompresör basınç oranı bu iki basınç oranından biri ya da arasında bir değer olarak belirlenir. Bu nokta gaz türbininin dizayn noktasıdır. Fakat gaz türbinleri işletilirken her zaman bu noktada çalışma mümkün değildir. Özellikle sistemden istenen elektrik enerjisinin sürekli değiştiği durumlarda dizayn noktasındaki güçten daha farklı güçlerde çalışmak gerekir. Bu durum kısmi yükte çalışma olarak adlandırılır.



Şekil 1. Gaz türbinlerinin spesifik yatırım masraflarının kapasite ile değişimi

Basit tek şaftlı gaz türbinlerinde kısmi yüklerde işletme, türbin giriş sıcaklığının düşürülmesi ile sağlanır. Türbin giriş sıcaklığının azaltılması için yakıt miktarı azaltılır [5]. Çevrimde dolaşan kütleli akışkan debisi ve basınç oranı ise sabittir [6]. Fakat gerçek Brayton çevriminde kompresör basınç oranı sabit kalırken türbin giriş sıcaklığının düşmesi termik verimi düşürür [1,3]. Diğer bir ifade ile basit tek şaftlı gaz türbinlerinde kısmi yüklerde çalışmada termik verim önemli miktarda azalmaktadır. Bu ise birim elektrik enerjisi için gerekli yakıt miktarını ve dolayısı ile elektrik üretim maliyetini artırır. Elektrik üretim maliyetini artıran diğer bir faktör ise kısmi yüklerde elektrik üretim miktarının azalmasıdır. Çünkü elektrik üretim miktarının azalması ile üretim miktarından bağımsız olan sabit masrafların birim elektrik miktarı içindeki payları artar. Her iki sebepten dolayı elektrik maliyetlerinin artması üreticilerin karlarını ve rekabet şanslarını azaltır. Sabit elektrik üretim miktarı olmayan yerlerde gaz türbinleri seçilirken kısmi yüklerdeki elektrik üretim maliyetlerinin artışı göz önünde bulundurulmalıdır. Kısmi yüklerdeki maliyet artışları sabit olmayıp dizayn parametrelerine bağlıdır. Bu sebepten dolayı dizayn parametrelerinin kısmi yüklerdeki verim ve üretim maliyetlerine etkilerinin analiz edilmesi gerekir.

Bu çalışmada; 5000 kW<sub>e</sub> güç üreten gerçek basit tek şaftlı gaz türbini ele alınmıştır. Türbin giriş sıcaklığı etkisini analiz amacı ile bu sıcaklık için iki farklı değer (1100 K ve 1300 K) alınmıştır. Bu sıcaklık değerleri için net işi ve termik verimi maksimum yapan kompresör basınç

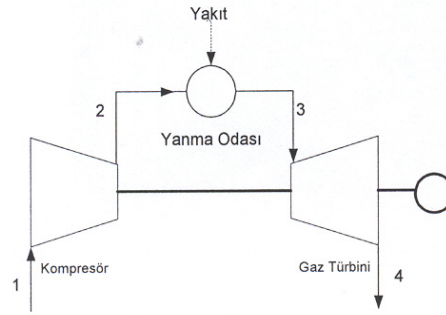
oranları belirlenmiştir. Bu basınç oranı değerleri ile bu iki değer arasında kalan ara bir basınç oranı için kısmi yük durumunu gösteren kapasite faktörü ile termik verim değişimi hesaplanmıştır. Daha sonra bir değere getirilmiş maliyet yöntemi kullanılarak kapasite faktörü ile birim elektrik üretim maliyetlerinin değişimi gösterilmiştir. Çalışma sonunda kısmi yüklerde en az maliyet değişimini veren parametreler belirlenmiştir.

## 2. TERMODİNAMİK ANALİZ

Basit tek şaftlı gerçek gaz türbinlerinde kompresör ve gaz türbini birer tanedir ve bir mil ile birbirlerine bağlıdır (Şekil 2). Çevre şartlarında kompresöre giren hava sıkıştırıldıktan sonra yanma odasında yakıt ile karıştırılır ve yakılır. Yanma odası çıkışında yanma ürünleri çevrimin maksimum sıcaklığına sahiptir. Bu sıcaklıkta türbine giren yanma ürünleri türbinde çevre basıncına kadar genişler. Gaz türbininden elde edilen işin bir bölümü kompresördeki sıkıştırma işinde harcanır. Geriye kalan iş net iş olarak türbin milinden alınır. Çevrimde dolaşan 1 kg akışkan için elde edilen net iş ( $W_{net}$ ) yakıt miktarı ihmal edildiğinde;

$$W_{net} = c_{pg} T_3 \eta_{tis} \left( 1 - \frac{1}{P_{rt}^b} \right) - \frac{c_{pa} T_1}{\eta_{cis}} (P_{rc}^a - 1) \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Burada;  $c_{pg}$  yanma ürünlerinin özgül ısısı,  $c_{pa}$  havanın özgül ısısı,  $T_3$  türbin giriş sıcaklığı,  $\eta_{tis}$  türbin izentropik verimi,  $\eta_{cis}$  kompresör izentropik verimi,  $P_{rt}$  türbin basınç oranı,  $P_{rc}$  kompresör basınç oranı,  $a = (k_a - 1/k_a)$  ve  $b = (k_g - 1/k_g)$ ,  $k_g$  gazların özgül ısı oranı,  $k_a$  havanın özgül ısı oranı ve  $T_1$  çevre sıcaklığıdır. Türbin basınç oranı, kompresör basınç oranından sistemdeki kayıpların miktarına bağlı olarak daha küçüktür. Bu sebepten türbin basınç oranı kayıplara bağlı olarak kompresör basınç oranı ile ifade edilir.



Şekil 2. Basit tek şaftlı gaz türbini

Eşitlik 1'de net işe etki eden parametrelerden  $c_{pg}$ ,  $c_{pa}$ ,  $k_a$ ,  $k_g$ ,  $\eta_{tis}$ ,  $\eta_{cis}$ , basınç kayıpları ve  $T_o$  sabit olarak alınabilir. Bu nedenle, net iş türbin giriş sıcaklığı ve kompresör basınç oranının fonksiyonudur. Gaz türbinlerinde termik verim, net işin yanma odasında verilen ısı enerjisine ( $Q_y$ ) oranıdır.

$$\eta_{the} = \frac{W_{net}}{Q_y} \quad (2)$$

Yanma odasında 1 kg hava için verilen ısı miktarı ( $Q_y$ );

$$Q_y = \frac{c_{pb} \cdot (T_3 - T_2)}{\eta_b} \quad (3)$$

olarak yazılır. Burada;  $c_{pb}$  yanma odasındaki ortalama özgül ısı,  $T_2$  kompresörden çıkış ve yanma odasına giriş sıcaklığı ve  $\eta_b$  yanma verimidir. Kompresör çıkış sıcaklığı ve net iş ifadesi eşitlik 2'de yazılarak gaz türbinlerindeki termik verim,

$$\eta_t = \frac{\left( c_{pg} T_3 \eta_{tis} \left( 1 - \frac{1}{P_{rt}^b} \right) - \frac{c_{pa} T_1}{\eta_{cis}} (P_{rc}^a - 1) \right) \eta_b}{c_{pb} \cdot \left( T_3 - T_1 \left( 1 + \frac{1}{\eta_{cis}} (P_{rc}^a - 1) \right) \right)} \quad (4)$$

olarak elde edilir. Sonuç olarak termik verim  $c_b$  ve  $\eta_b$  sabit alındığında türbin giriş sıcaklığı ve kompresör basınç oranının fonksiyonu olacaktır. Gaz türbinlerinde net çıkış gücü (N), net iş ve kütleli debiye ( $\dot{m}_a$ ) bağlı olarak,

$$N = \dot{m}_a W_{net} \quad (5)$$

şeklinde olur. İşletme esnasında basit tek shaftlı gaz türbinlerinde kütleli debi sabit kalacağından güç net işin değişimi ile değişir. Diğer bir deyişle güç, kompresör basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığının fonksiyonudur.

### 3. BİR DEĞERE GETİRİLMİŞ ÜRETİM MALİYETİ

Elektrik üretim santrallerinde üretim maliyeti yatırım, yakıt, işletme ve bakım (İ&B) masraflarından oluşur. Yatırım masrafları, kojenerasyon sisteminin planlama aşamasında ve inşaatında yapılan ekipman ve mühendislik masraflarıdır. İşletme ve bakım masrafları personel, tamirat ve sarf malzemeleri için yapılan masraflardır. Yatırım ve İ&B masrafları elektrik üretim miktarından bağımsızdır ve bu nedenle sabit masraflar olarak adlandırılır. Sabit masrafların birim elektrik üretim maliyeti içindeki payı elektrik üretim miktarının düşmesi ile artar. Yakıt masrafı ise üretim miktarına bağlıdır ve değişken masraflar olarak adlandırılır.

Birim elektrik üretim maliyeti, belirli bir süredeki masrafların o sürede üretilen elektrik miktarına bölünmesi ile elde edilir. Bu süre genellikle saatlik ya da yıllıktır. Fakat paranın zaman içindeki değerinin değişmesi ve masrafların farklı zamanlarda değişik miktarlarda yapılmasından dolayı her zaman farklı üretim maliyetlerinin olacağı açıktır. Zamana bağlı üretim maliyetlerinin hesaplanması zorluk oluşturduğundan bir değere getirilmiş maliyet metodu enerji üretim maliyetlerinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılır. Bu yöntemde santralin inşaat başlangıcı ile ekonomik ömrü sonuna kadar yapılan yatırım, yakıt ve İ&B masrafları santralin elektrik üretimine başladığı tarihe iskonto oranı ile getirilir. Elde edilen toplam masraf ekonomik ömre eşit miktarda seriye dönüştürülür [7,8]. Verilen bir yıl için yatırım masrafı ( $C_k$ ) lineer azalan sermaye maliyetine göre,

$$C_{k(t)} = I \left[ \left( 1 - \frac{t-1}{n} \right) i + \frac{1}{n} \right] \quad (\$/Yıl) \quad (6)$$

şeklinde yazılır. Burada, I ilk yatırım masrafı (\$), t yıl, n ekonomik ömür ve i faiz oranıdır. İ&B masrafı ( $C_m$ ),

$$C_m = c_m \cdot N_e \quad (\$/Yıl) \quad (7)$$

olarak yazılır. Burada,  $c_m$  spesifik İ&B masrafı ( \$/kW-Yıl) ve  $N_e$  santralin nominal gücüdür (kW). Sabit masraflar toplamının yıllık bir değere getirilmiş değeri ( $C_s$ ),

$$C_s = \frac{\sum_{t=0}^n I \left[ \left( 1 - \frac{t-1}{n} \right) i + \frac{1}{n} \right] \cdot (1+r)^{-t} + \sum_{t=0}^n c_m \cdot N_e \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^n (1+r)^{-t}} \quad (\$/Yıl) \quad (8)$$

## Unit Electricity Production Analysis of Gas Turbines...

şeklinde. Burada  $r$  iskonto oranıdır. Bu değer yıllık çalışma saatine bölünerek saatlik bir değere getirilmiş sabit masraf ( $C_{sh}$ ),

$$C_{sh} = \frac{C_s}{LF \cdot 8760} \text{ (\$/h)} \quad (9)$$

elde edilir. Burada, yük faktörü (LF) yıllık çalışma saatinin bir yıldaki maksimum çalışma saatine oranıdır. Sistemin kapasite faktörü (KF) ise işletmede olduğu gerçek üretim gücünün (N) nominal güce oranıdır. Gerçek işletme gücü; ihtiyaca göre yanma odası giriş sıcaklığının düşürülmesi (yakıt miktarının azaltılmasıyla) ile elde edilir. Nominal güç ise dizayn şartlarındaki maksimum türbin giriş sıcaklığında elde edilir. Bu nedenle kapasite faktörü kısmi yük oranını göstermektedir.

$$KF = \frac{N}{N_e} \quad (10)$$

Sabit masrafların birim elektrik üretim maliyetindeki payı ( $g_s$ ) kapasite faktörüne bağlı olarak,

$$g_s = \frac{C_{sh}}{KF \cdot N_e} \text{ (\$/kWh)} \quad (11)$$

Eşitlik 11'den görüldüğü gibi kapasite faktörünün azalması sabit masrafların üretim maliyetindeki payını artırır. Yakıt masrafının birim elektrik üretim maliyetindeki payı ( $g_f$ ),

$$g_f = F \cdot \frac{3600}{H_u \cdot \eta_t} \text{ (\$/kWh)} \quad (12)$$

olarak yazılır. Burada,  $F$  yakıt fiyatı (  $\$/m^3, \$/kg$ ),  $H_u$  yakıtın alt ısı değeri (  $kJ/m^3, kJ/kg$ ) ve  $\eta_t$  termik verimdir. Kapasite faktörü ile termik verimin azalması birim elektrik üretim maliyeti içindeki yakıt masrafının payını artırmaktadır. Bir değere getirilmiş birim elektrik üretim maliyeti ( $g$ ),

$$g = g_s + g_f \text{ (\$/kWh)} \quad (13)$$

şeklinde.

## 4. KAPASİTE FAKTÖRÜ İLE ÜRETİM MALİYETİ ANALİZİ

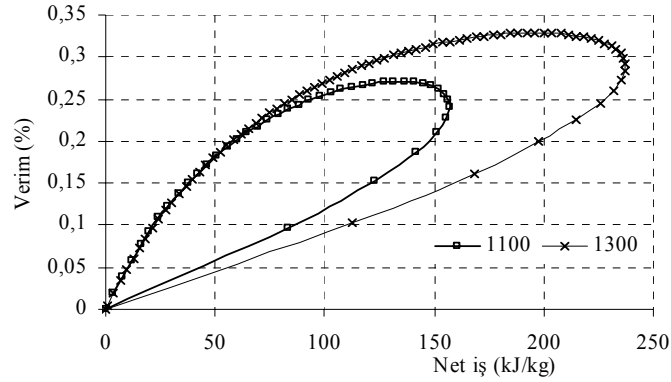
Türkiye'deki kojenerasyon sistemlerin yaklaşık % 50'si 5000 kW'a yakın güçlerdedir (Şekil 1). Bu çalışmadaki basit tek şaftlı gaz türbinlerin termodinamik ve maliyet hesaplamalarında Tablo 1'de verilen kabuller kullanılmıştır. Öncelikle çalışmada kabul edilen farklı iki türbin giriş sıcaklığı için net iş ve termik verimin kompresör basınç oranı ile değişimleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir. Gerçek Brayton çevriminde sabit türbin giriş sıcaklıklarında basınç oranının artması ile önce hem termik verim hem de net iş artmaktadır. Türbin giriş sıcaklığına bağlı olarak belirli bir basınç oranından sonra bu değerler azalmaktadır. Fakat Şekil 3'den açıkça görüldüğü gibi sabit türbin giriş sıcaklığında net işin ve termik verimin maksimum olduğu noktalar farklıdır. Ayrıca türbin giriş sıcaklığının artması net işin ve termik verimin maksimum değerlerini artırmaktadır. Tablo 2'de türbin giriş sıcaklıkları için net işi ve termik verimi maksimum yapan kompresör basınç oranları ile hesaplamalara dahil edilen ara basınçlar verilmiştir.

Yapılan kabuller ve türbin giriş sıcaklıkları için kapasite faktörü ile termik verim değişimleri hesaplanmıştır. Şekil 4'de  $T_3=1100$  K ve Şekil 5'de 1300 K için basınç oranlarına göre kapasite faktörü ile termik verim değişimleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi basınç oranının büyük olması tam kapasitede verimi artırmaktadır. Fakat büyük basınç oranında kapasite faktörünün azalması ile verim düşüşü daha fazladır.  $T_3=1100$  K ve  $KF= \% 42$  olduğu durumda

termik verimler,  $P_{rc} = 7$  ve  $P_{rc} = 14$  için eşitlenmektedir. Daha küçük kapasite faktörlerinde  $P_{rc}=14$ 'deki termik verim değeri  $P_{rc}=7$ 'deki değerine inmektedir. Ara değer olan  $P_{rc}=10$ 'da termik verim değişimi  $P_{rc}=14$ 'e göre daha az olmakta ve  $KF=\% 80$ 'de eşitlenmektedir.  $T_3=1300$  K olduğunda da yüksek basınç oranlarında kapasite faktörünün azalması ile termik verim düşüşü artmaktadır. Ayrıca termik verimi maksimum yapan  $P_{rc}=24$  ile net işi maksimum yapan  $P_{rc}=10$  arasında tam yükte fark daha fazla olmasına rağmen  $KF=\% 42$ 'de eşitlenmektedir. Şekil 6'da  $P_{rc}=14$  olduğu durumda türbin giriş sıcaklıkları için kapasite faktörü ile termik verim değişimi verilmiştir. Şekil 6'dan düşük türbin giriş sıcaklıklarında kapasite faktörünün azalması ile termik verim düşüşünün daha fazla olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** Hesaplamalarda kullanılan kabuller

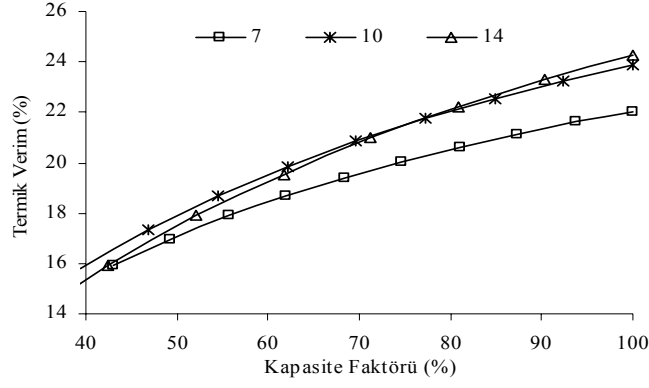
$T_3$	1300 K ve 1100 K
$T_1$	298 K
$\eta_{cis}$	0,84
$\eta_{tis}$	0,86
$c_{pa}$	1,005 kJ/kgK
$c_{pg}$	1,147 kJ/kgK
$c_{pb}$	1,15 kJ/kgK
$k_a$	1,4
$k_g$	1,333
Basınç kayıp oranı	0,9
$\eta_b$	0,98



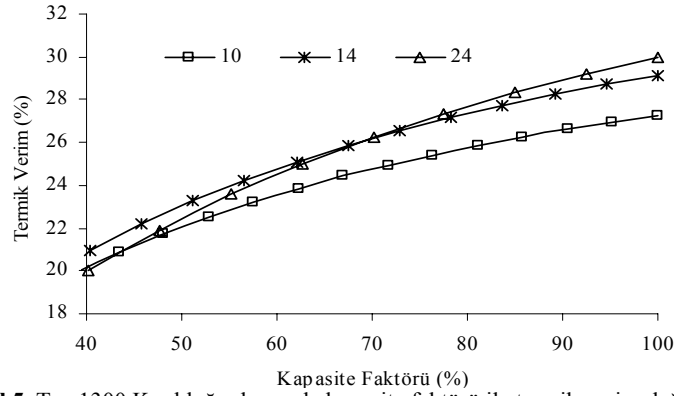
**Şekil 3.** Net iş ve termik verimin değişimi

**Tablo 2.** Net işi ve termik verimi maksimum yapan basınç oranı

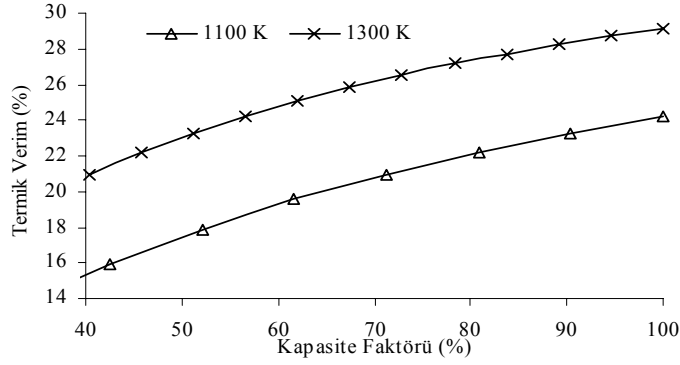
	Türbin Giriş Sıcaklığı	
	1100 K	1300 K
Net İş	7	10
Termik Verim	14	24
Seçilen Ara Basınç	10	14



Şekil 4.  $T_3=1100\text{ K}$  olduğu durumda kapasite faktörü ile termik verim değişimi



Şekil 5.  $T_3=1300\text{ K}$  olduğu durumda kapasite faktörü ile termik verim değişimi



Şekil 6.  $P_{rc}=14$  olduğu durumda kapasite faktörü ile termik verim değişimi

Kısmi yüklerdeki termik verim ve elektrik üretim miktarının azalmasının elektrik üretim maliyetine olan etkisi, termodinamik analizlerin sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 3'de

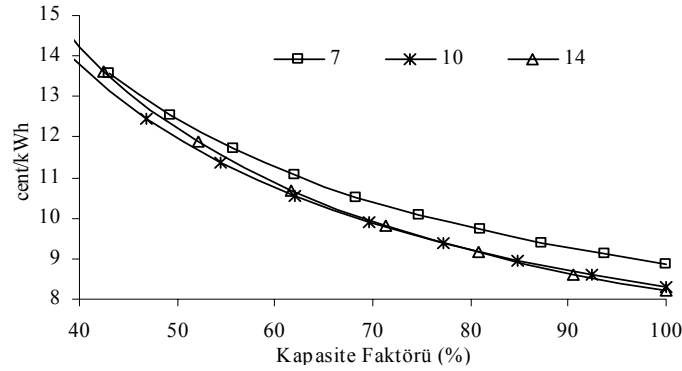
maliyet hesaplamalarında yapılan kabuller verilmiştir. Model olarak alınan basit tek shaftlı gaz türbini için spesifik yatırım masrafı Türkiye’de kurulu olan 5 MW güç civarındaki 17 santralin değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır (Şekil 1).

**Tablo 3.** Maliyet hesaplamasında yapılan kabuller

		Değer
$N_e$	kW	5000
$\eta_t$	%	30
F	\$/Nm <sup>3</sup>	0,177
c	\$/kW	703
$C_m$	\$/kW-Yıl	10
n	Yıl	20
r	%	10
i	%	8

Şekil 7’de türbin giriş sıcaklığının 1100 K olduğu durum için birim elektrik üretim maliyetinin kapasite faktörü ile değişimi verilmiştir. Tam yükte en düşük maliyet  $P_{rc}=14$  olduğunda elde edilmektedir. Fakat bu basınç oranında üretim maliyeti kapasite faktörünün azalması ile hızlı bir azalma göstermektedir.  $KF=70\%$  olduğunda  $P_{rc}=10$  ile ve  $KF=42\%$  olduğunda ise  $P_{rc}=7$  ile eşit üretim maliyetine sahip olmaktadır. Bu durumun nedeni Şekil 8’den görüldüğü gibi birim elektrik üretim maliyeti içinde yakıt maliyetinin payının büyük olmasıdır. Bu nedenle, basınç oranının yüksek değerlerinde termik verimin hızlı azalması üretim maliyetini de hızlı artırmaktadır. Ara basınç değerinde ( $P_{rc}=10$ ) üretim maliyeti termik verimi maksimum yapan basınç oranındaki ( $P_{rc}=14$ ) değerlere oldukça yakındır. Ayrıca, kapasite faktörü ile üretim maliyeti değişimi daha azdır. Bu iki sebepten dolayı gaz türbinlerinin dizayn değeri olarak bu basınç oranının seçilmesi daha uygun görünmektedir. Bu durum Şekil 9’dan görüldüğü gibi  $T_3=1300$  K olduğu durum içinde geçerlidir.

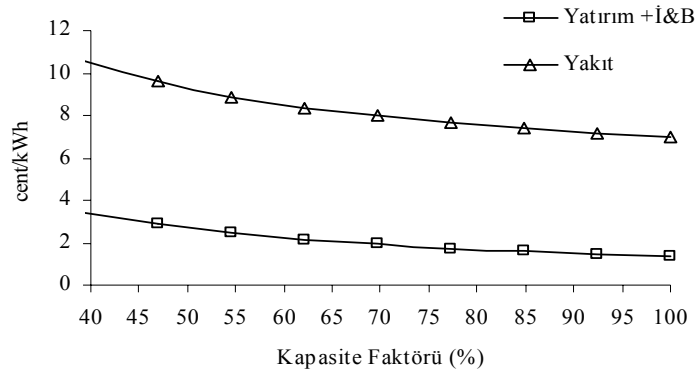
Kompresör basınç oranının 14 alındığı durumdaki kapasite faktörü ile birim elektrik üretim maliyetlerinin değişimi Şekil 10’da verilmiştir. Buradan görünen düşük türbin giriş sıcaklıklarında kapasite faktörü ile maliyet değişiminin daha fazla olduğudur. Çünkü üretim maliyeti içinde yakıt masraflarının payı daha büyüktür ve yakıt masrafları düşük türbin giriş sıcaklıklarında kapasite faktörü ile daha fazla düşüş gösteren termik verime bağlıdır.



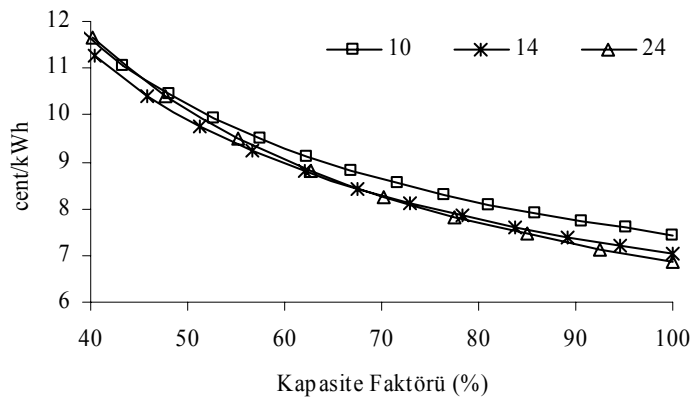
**Şekil 7.**  $T_3=1100$  K olduğunda kapasite faktörü ile birim elektrik maliyeti değişimi



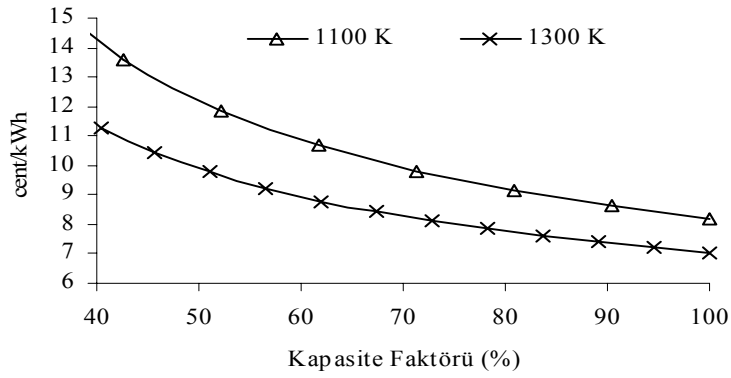
*Unit Electricity Production Analysis of Gas Turbines...*



**Şekil 8.**  $T_3=1100\text{ K}$  ve  $P_{re}=14$  olduğu durumda kapasite faktörü ile masraf gruplarının değişimi



**Şekil 9.**  $T_3=1300\text{ K}$  olduğu durumda kapasite faktörü ile birim elektrik maliyeti değişimi



**Şekil 10.**  $P_{re}=14$  olduğu durumda kapasite faktörü ile birim elektrik maliyeti değişimi

## 5. SONUÇLAR

Gaz türbinleri elektrik üretiminde farklı düzenlemelerle yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük kapasiteli kojenerasyon sistemlerinde, maliyetlerinin düşük olması nedeni ile basit tek şaftlı gaz türbinleri tercih edilmektedir. Fakat bu sistemlerin kısmi yüklerde çalışılması gerektiğinde termik verimlerde önemli düşüşler olmaktadır. Kapasitenin azalması ile termik verimdeki ve elektrik üretim miktarındaki azalma elektrik üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bu ise elektrik üretim şirketlerinin kârlarını ve rekabet güçlerini azaltmaktadır. Kapasitenin değişmesi ile türbin performansında meydana gelen değişiklikler dizayn parametreleri olan türbin giriş sıcaklığına ve kompresör basınç oranına bağlıdır. Bu nedenle, dizayn parametrelerinin kapasite değişimi ile üretim maliyetine etkisi bu çalışmada analiz edilmiştir.

Türbin giriş sıcaklığı için 1100 K ve 1300 K değerleri alınarak, net işi ve termik verimi maksimum yapan kompresör basınç oranları belirlenmiştir. Bu basınç oranlarına iki değer arasında kalan başka bir basınç oranı da eklenerek üç basınç oranı için termik verimin kapasite faktörü ile değişimi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir değere getirilmiş maliyet yöntemine aktararak birim elektrik üretim maliyetleri hesaplanmıştır.

Analizler sonucunda termik verimi maksimum yapan basınç oranının net işi maksimum yapan basınç oranından daha büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle, büyük basınç oranlarında tam yükte üretim maliyeti daha küçük olmaktadır. Fakat birim elektrik üretim maliyetlerinde yakıt maliyetinin payının büyük olması üretim maliyetlerini termik verime karşı hassas hale getirmektedir. Bundan dolayı büyük basınç oranlarında kapasite faktörünün azalması ile termik verimin daha hızlı azalması üretim maliyetlerinin de hızla artmasına neden olmaktadır. Düşük basınç oranlarında ise kapasite faktörü ile termik verim değişimi daha az olduğundan üretim maliyeti değişimi de az olmaktadır. Fakat termik verim değerinin düşük olması üretim maliyetlerinin değerini artırmaktadır. En iyi sonuç ise hem verim değerinin yüksek basınç oranında elde edilen değerlere yakın olması hem de kapasite faktörü ile değerinin az değişmesinden dolayı ara basınçta elde edilmiştir.

Türbin giriş sıcaklığının artması sistemin kapasite faktörü ile termik verim değişimini ve dolayısı ile elektrik üretim maliyeti değişimini azaltmaktadır. Aynı zamanda türbin giriş sıcaklığının artması ile termik verim değerinin de artması üretim maliyetlerini de azaltmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Eyice S., “Gaz Türbinleri (Hesap ve Konstrüksiyonu)”, İstanbul, 1977.
- [2] Cohen H., Rogers G.F.C, Saravanamuttoo H.I.H, “Gas Turbine Theory”, 4th Edition, London, 1996.
- [3] Çengel A.Y., Boles A. Türkçesi Derbentli T., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, 1. Baskı, Literatür yayınları, İstanbul, 1996.
- [4] Badran O. O., “Gas Turbine Performance Improvements”, Applied Energy, 64, 263-273,1999.
- [5] Energy Nexus Group, “Technology Characterization: Gas Turbines”, Virginia, 2002.
- [6] Hall A.D., Stover J.C. ve Bersch R., “Gas Turbine Inlet Air Chilling at a Cogeneration Facility”, ASHRAE Transaction, 100, Part 1, 1994.
- [7] Aybers N.,Şahin B., “Enerji Maliyeti”,Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası,1995, İstanbul.
- [8] Şahin, B., Bekdemir Ş., “Kombine Çevrim Güç Tesislerinin Mukayeseli Ekonomik Etüdü ve Ekonomik Çalışma Bölgesinin Belirlenmesi”, Türkiye 6. Enerji Kongresi, İzmir ,95-116,1994.