

Basit Brayton Çevriminde Elektrik Üretimi Maliyetinin Parametrik Analizi

Burhanettin Çetin

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, 34349 Beşiktaş / İstanbul
cetin@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received:28.06.2016; Kabul/Accepted: 06.07.2017)

Özet

Bu çalışmada, kompresör basınç oranı, çevre sıcaklığı, türbin izentropik verimi ve kompresör izentropik verimi değişken parametre olarak alınarak, basit Brayton çevrimi için elektrik enerjisi üretimi maliyetinin parametrik analizi yapılmıştır. İncelemelerde, diğer parametreler sabit kabul edilmiş ve bütün termodinamik ve ekonomik ifadeler bu karar değişkenlerinin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan model çözümlenmiş ve elektrik üretimi maliyetini minimum yapan optimum işletme şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Sadece performans dikkate alındığında her bir parametre için net gücü ve ısı verimi maksimum yapan iki farklı kompresör basınç oranı bulunmuştur. Isıl verim için bu oran daima daha yüksektir. Brayton çevriminin teknik açıdan optimum çalışma aralığı ise, bu iki değer arasında olmalıdır. Aynı parametreler için yapılan ekonomik analiz sonuçları ise, elektrik üretimi maliyetini minimum yapan basınç oranının, teknik çalışma aralığı içinde olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Brayton çevrimi, Gaz türbini, Elektrik üretimi maliyeti, Isıl verim

Parametric Analysis of Electricity Production Cost for Simple Brayton Cycle

Abstract

In this study, parametric analysis of electricity production cost for simple Brayton cycle is studied under different compressor pressure ratio, ambient temperature, gas turbine isentropic efficiency and compressor isentropic efficiency. The others variables are assumed constant. In the analysis, all thermodynamic and economic expressions are formulated as the function of these variables. Consequently, developed model is solved and the optimum conditions giving minimum electricity production cost are identified. It is determined that there are two optimum compressor pressure ratios for simple Brayton cycle: one maximizes the power, the other maximizes the efficiency, technically. The optimum compressor pressure ratio for efficiency is always higher than the optimum compressor pressure ratio for power. Optimum economic values that minimized electricity production cost are different from technic values. Therefore, optimum compressor pressure ratio should be chosen between these technic values, techno-economically.

Keywords: Brayton cycle, Gas turbine, Electricity production cost, Thermal efficiency

1. Giriş

Brayton çevrimi ilk olarak 1870'li yıllarda George Brayton tarafından geliştirilen yağ yakan pistonlu motorlarda kullanılmak üzere önerilmiştir. Günümüzde ise Brayton çevriminin kullanımı, sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin aksel kompresör ve türbinlerde gerçekleştirildiği gaz türbinleri ile sınırlıdır. 1930'larda ilk tasarlandıklarından günümüze kadar geçen süre

inde de gaz türbinlerinde çok önemli gelişmeler olmuştur. İlk tasarlanan gaz türbinleri, düşük izentropik verimler ve gaz türbin giriş sıcaklıklarından dolayı oldukça düşük (yaklaşık %17) ısı verime sahiptiler. Bundan dolayı da, birçok avantajı olmasına rağmen o dönemlerde kullanımı çok yaygınlaşmamıştır. Fakat, günümüzde gaz türbinleri yüksek güç/ağırlık oranı

sahip olmaları, az yer kaplamaları, basit ve hafif olmaları, kurulum sürelerinin kısa olması, hızlı devreye girip çıkabilmeleri, güvenilirlik ve kullanılabilirliklerinin yüksek olması, farklı yakıtları yakabilmeleri, çevre dostu olmaları, işletme&bakım ve yatırım maliyetlerin düşük olması vb özelliklerinden dolayı, kendisine oldukça fazla uygulama alanı bulmuştur [1-11]. Bu uygulama alanlarından bazıları şöyledir:

- Elektrik güç santralleri,
- Uçak ve helikopterler,
- Gaz nakil hatlarındaki pompalama istasyonları,
- Lokomotifler,
- Gemiler,
- Tank ve taşıma araçları (otomotiv gaz türbinleri),

Teknolojideki son gelişmeler gaz türbinlerinin güç kaynağı olarak, havacılık dışındaki farklı alanlarda kullanılan pistonlu motorlarla rekabet edebilir hale gelmesine neden olmuştur. Donanmaların büyük bir bölümünde gaz türbinleri hem gerekli itici gücü sağlamak, hem de elektrik üretmek için kullanılmaktadır. General Electric tarafından gemilerin tahrikinde kullanılmak üzere geliştirilen basit Brayton çevrimli LM2500 tipi gaz türbinleri yaklaşık %37 termik verime sahiptir. Yine General Electric tarafından üretilen ara soğutmalı ve rejeneratörlü WR-21 tipi gaz türbinleri, yaklaşık %43 termik verimle 21,6 MW güç üretmektedir. Buhar türbinleri ve dizel motorlarıyla kıyaslandığında gaz türbinleri daha güvenilir ve uzun ömürlü olup, daha yüksek güç/ağırlık ve güç/hacim oranına sahiptir. Ayrıca daha hızlı devreye girip çıkabilirler ve işletmeleri de daha kolaydır. Örneğin, bir buhar türbininin devreye girmesi yaklaşık dört saati bulurken, gaz türbinini iki dakika gibi kısa bir sürede devreye girebilmektedir. Günümüzde birçok gemide gaz türbinini ve dizel motor birlikte kullanılmaktadır. Dolayısıyla gemilerde düşük güçlerde ve seyrişer süresince yüksek verimli olduğu için dizel motorları kullanılmakta, basit çevrimli gaz türbinleri ise yüksek yakıt tüketimine

sahip olduğu için yüksek hız ve güç gerektiğinde devreye girmektedir [9].

Günümüzde gaz türbinleri yaygın olarak uçaklarda ve elektrik güç santrallerinde kullanılmaktadır. Uçaklarda kullanılan gaz türbinini, sadece kompresör ve yardımcı makinelerin ihtiyacı olan gücü üretir. Uçağı iten gücü ise yüksek hızla türbinden dışarı atılan gazlar sağlamaktadır [9]. Gaz türbinleri ayrıca kara tesislerinde güç üretmek için tek başına veya buharlı güç santralleriyle beraber kombine çevrim santralinde de kullanılmaktadır. Kombine çevrim santralleri, gaz türbinleri ile buhar türbinlerinin beraber kullanıldığı sistemlerdir. Günümüzde buharlı güç santrallerinde en yüksek türbin girişi sıcaklığı yaklaşık 700 °C mertebelerinde iken, bu sınır gaz türbin güç santrallerinde yaklaşık 1400 °C seviyelerine kadar ve uçaklarda kullanılan gaz türbinlerinde ise daha da yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir [9-10]. Gaz türbin çevriminde türbin kanatlarında havayla etkin soğutma yapılabilmesi ve kanatların seramik gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerle kaplanmasından dolayı yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesine rağmen, gazlar türbinini çok yüksek sıcaklıklarda terk ettikleri için, yüksek termik verimlere ulaşamamaktadır. [1, 9, 10, 12].

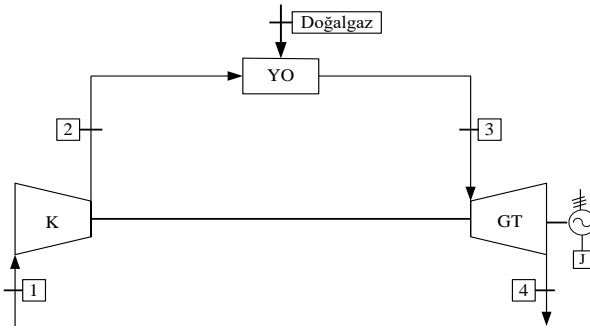
Birincil enerji kaynakları bakımından fakir olan ülkelerin dışa bağımlılığını azaltmak, emisyon tasarrufu sağlamak, yerli kaynakların kullanım ömrünü uzatmak ve enerji üretimi maliyetlerini düşürmek için enerji dönüşümlerini yüksek verimle ve düşük maliyetle gerçekleştirmeleri oldukça önemlidir. Bu nedenle güç çevrimlerinde termik verimi arttırmak üzere hem bilim hem de mühendislik çevrelerince yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

Bu çalışmada, basit Brayton çevrimi için birim elektrik enerjisi üretimi maliyeti üzerine çevre sıcaklığı ile türbin ve kompresör izentropik verimlerinin teorik olarak etkisi araştırılmıştır. Analizlerde elektrik enerjisi üretimi maliyeti basınç, sıcaklık, debi, yakıt fiyatı, faiz oranı ve iskonto oranı gibi teknik ve ekonomik büyüklükler cinsinden yazılmıştır. Ekipman yatırım maliyetleri de teknik

büyükliklere bağlı olarak ifade edilerek, teknik ve ekonomik çözümler birlikte ele alınmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model çözümlenmiş ve incelenen her bir parametre için minimum elektrik üretimi maliyetini veren en uygun çalışma koşulları bulunmuştur.

2. Basit Brayton Çevriminin Sistem Yapısı

Şekil 1'de bu çalışmada incelenen basit Brayton çevriminin prensip şeması verilmiştir. Şekilde K kompresörü, YO yanma odasını, GT gaz türbinini ve J jeneratörü temsil etmektedir. Sistemin çalışma prensibi kısaca şu şekildedir:



Şekil 1. Basit Brayton çevriminin prensip şeması

Elektrik enerjisi üretimi sistemleri oldukça karmaşık yapıdır. Gerçek bir tesis ele alındığında irili ufaklı birçok ekipman vardır. Dolayısıyla bu sistemlerin analizleri yapılırken de bazı kabullerin yapılması gerekir. Kabul edilebilir hata sınırları içinde kalmak koşuluyla yapılan bu kabuller, analiz sonuçlarını doğal olarak etkilemekle birlikte, pratik bir değerlendirme yapılmasına da olanak sağlar. Bu çalışmada yapılan kabuller şöyledir:

- Hava ve yanma ürünlerine ideal gaz prensibi uygulanmıştır.
- Yakıt olarak doğalgaz alınmış ve yanmanın tam yanma olduğu kabul edilmiştir.
- Doğalgazın alt ısı değeri 8250 kcal/m^3 olarak alınmıştır.
- Sistemdeki ana elemanlar (kompresör, yanma odası ve gaz türbini) sürekli akışlı açık sistem olarak alınmıştır.

- Çevre sıcaklığı 298 K , çevre basıncı 1 bar alınmıştır.
- Çevrimde türbin izentropik verimi $\%87$, kompresör izentropik verimi $\%85$, yanma verimi $\%99$ ve mekanik verim $\%98$ alınmıştır.
- Çevrimdeki basınç kayıpları kompresör-türbin arasında $\%5$, çıkışta ise $\%3$ alınmıştır.
- Gaz türbin giriş sıcaklığı (TGS) 1400 K alınmıştır.

Kompresör izentropik verimi, ideal kompresör işinin gerçek kompresör işine oranıdır. Türbin izentropik verimi ise, gerçek türbin işinin ideal işe oranıdır. Dolayısıyla, tersinmezliklerden dolayı gerçekte kompresör ideale göre daha fazla enerji harcar, türbin ise daha az enerji üretir. Analizlerde bu tersinmezliklerin etkisini dikkate almak için izentropik verimler kullanılır. Yine akışın olduğu yerde sürtünme, dolayısıyla basınç kayıpları meydana gelir. Türbin çıkışında da gazların atmosfere atılabilmesi için çıkış basıncının atmosfer basıncından biraz büyük olması gerekir. Sistemdeki bağlantı elemanlarındaki (boru, dirsek, vana vb.) ve çıkıştaki bu basınç kayıplarının gerçek çözümlerde dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada tersinmezliklerin etkisi de dikkate alınarak, mümkün olduğunca gerçekçi çözümler bulunmaya çalışılmıştır.

3. Brayton Çevriminin Teknoekonomik Analizi

Literatürde basit Brayton çevriminin teknik ve ekonomik hesaplamalarıyla ilgili oldukça fazla çalışma vardır ve ilgili denklemlere kapsamlı olarak bu çalışmalardan ulaşılabilir [6, 7, 13-15]. Dolayısıyla bu çalışmada teknoekonomik analiz için temel denklemler üzerinden metodoloji açıklanmaya çalışılacaktır.

Basit Brayton çevriminde performans açısından net güç ve ısı veriminin mümkün olduğunca yüksek olması beklenir. Çevrimin net

gücü (N_{net}), gaz türbin (N_{GT}) ve kompresör güçlerinin (N_K) farkına eşittir (Denklem 3). Çevrime giren ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşüm oranını gösteren ısı verim ise, net gücün yanma odasında verilen ısı güce (N_{YO}) oranından bulunabilir (Denklem 5).

$$N_{GT} = \dot{m}_g \cdot \left[C_{pg}(T_3) \cdot T_3 - C_{pg}(T_4) \cdot T_4 \right] \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

$$N_K = \dot{m}_h \cdot \left[C_{ph}(T_2) \cdot T_2 - C_{ph}(T_1) \cdot T_1 \right] \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

$$N_{net} = \eta_m \cdot N_{GT} - \frac{N_K}{\eta_m} \quad (\text{kW}) \quad (3)$$

$$N_{YO} = \dot{m}_y \cdot Hu \cdot \eta_y \quad (\text{kW}) \quad (4)$$

$$\eta_{Isıl} = \frac{N_{net}}{N_{YO}} \quad (5)$$

Denklemlerde, T_1 (KGS) kompresör giriş (çevre) sıcaklığını, T_2 kompresör çıkış sıcaklığını, T_3 türbin giriş sıcaklığını, T_4 türbin çıkış sıcaklığını, \dot{m}_h (kg/s) hava debisini, \dot{m}_g (kg/s) gaz debisini, \dot{m}_y (kg/s) yakıt debisini, Hu (kJ/kg) doğalgazın alt ısı değerini, η_y yanma verimini, η_m mekanik verimi, c_{ph} ve c_{pg} (kJ/kgK) ise sırasıyla havanın ve gazların sabit basınçta özgül ısı kapasitelerini göstermektedir. Analizlerde özgül ısılar sıcaklığın fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır [7, 14]. Kompresör çıkış sıcaklığı T_2 ve türbin çıkış sıcaklığı T_4 Denklem 6- 7'den bulunabilir.

$$T_2 = T_1 \cdot \left[1 + \frac{P_{rc}^{(k_h - 1)/k_h - 1}}{\eta_k} \right] \quad (\text{K}) \quad (6)$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left[1 - \eta_t \cdot \left(1 - \frac{1}{P_{rt}^{(k_g - 1)/k_g}} \right) \right] \quad (\text{K}) \quad (7)$$

$$P_{rc} = \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

$$P_3 = P_2 \cdot (1 - BK_{KT}) \quad (\text{bar}) \quad (9)$$

$$P_4 = P_1 \cdot (1 + BK_C) \quad (\text{bar}) \quad (10)$$

$$P_{rt} = \frac{P_3}{P_4} \quad (11)$$

Burada; P_{rc} kompresör basınç oranı, P_{rt} türbin basınç oranını, k_h havanın özgül ısı oranını, k_g gazların özgül ısı oranını, η_k kompresör izentropik verimini, η_t türbin izentropik verimini, BK_{KT} kompresör-türbin arası ve BK_C de çıkıştaki basınç kayıp oranını göstermektedir (Denklem 6-11).

3.1. Ekonomik analiz

Enerji üretimi sistemleri için belirlenecek birim elektrik enerjisi üretimi maliyetleri, sistemlerin değerlendirilmesinde ve birbiriyle karşılaştırılmasında kullanılabilir.

Elektrik enerjisi üretimi maliyeti ise yatırım, yakıt ve işletme&bakım olmak üzere üç ana masraf grubundan oluşur. Erdem ve Sevilgen [16] çalışmalarında, basit Brayton güç sistemlerinde işletme ve bakım masraflarının toplam maliyet içindeki payının, yatırım ve yakıt masraflarının payına göre oldukça düşük olduğunu ve optimum sonuçları değiştirmediklerini göstermişlerdir. Dolayısıyla, bu makalede işletme ve bakım masraflarının etkisi dikkate alınmamıştır.

Elektrik enerjisi üretimi maliyetini hesaplamak için farklı yöntemler vardır ve hepsinden benzer sonuçları bulmak mümkündür. Bu çalışmada bir değere getirilmiş yıllık maliyet yöntemi kullanılmıştır

[15]. Bu yöntemde sistemin ekonomik ömrü boyunca yapılan tüm masraflar yıllık masrafa dönüştürülür ve bu değer yıllık elektrik enerjisi üretimi miktarına bölünerek elektrik enerjisi üretimi maliyeti (g) bulunur.

3.1.1. Toplam yatırım maliyeti

Basit Brayton çevriminin direkt yatırım maliyeti (I) sırasıyla gaz türbini (I_{GT}), yanma odası (I_{YO}), kompresör (I_K), ve jeneratör (I_J) yatırım maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır (Denklem 12). Bu çalışmada, literatürde verilen ekipmanların geometrik ve termodinamik özelliklerine bağlı yatırım maliyet denklemleri kullanılmıştır [14].

$$I = I_{GT} + I_{YO} + I_K + I_J \quad (\$) \quad (12)$$

İnşaat süresince kullanılan malzeme, ekipman ve işçilik fiyatlarında artış olacaktır. Bu artışa fiyat güncellenmesi (eskalasyon) denir. Dolayısıyla, inşaat süresince yapılacak yatırımlar için önceden bir harcama dağılım modeli belirlenerek fiyat güncellenmesi yükünün bulunması gerekir. İnşaat süresince yapılan yıllık fiyat güncellenmiş (eskale edilmiş) harcama miktarının kredi olarak alındığı kabul edilerek, inşaat periyodunun bu miktarı ilave olarak da bir faiz yükünün geri ödenmesi gerekir. Fiyat güncellenmesi ve faiz yükü dikkate alındığında inşaatın bitimindeki toplam yatırım maliyeti (I_T) aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$I_T = I \cdot \sum_{t=1}^L y(t) \cdot (1+e)^t \cdot (1+i)^{L+1-t} \quad (\$) \quad (13)$$

Burada e fiyat güncellenmesi oranını, i faiz oranını, L inşaat süresini, y(t) herhangi bir t yılına ait yıllık harcama dağılım oranını göstermektedir. Bu çalışmada fiyat güncellenmesi oranı (e) %2, faiz oranı (i) %7, inşaat süresi (L) 3 yıl ve harcama dağılım oranı y(t) de birinci yıl için %25, ikinci yıl için %35 ve üçüncü yıl için %40 alınmıştır.

3.1.2. Yıllık sabit sermaye ve yakıt maliyeti

Toplam yatırım maliyeti (I_T), amortisman katsayısı (AK) kullanılarak yıllık sabit sermaye maliyetine (C_s) dönüştürülür (Denklem 14). Yıllık sabit yakıt maliyeti (C_y) ise Denklem 16'dan bulunabilir.

$$C_s = I_T \cdot AK \quad (\$/yıl) \quad (14)$$

$$AK = \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

(15)

$$C_y = \frac{3600 \cdot 8760 \cdot N_{net} \cdot YF \cdot F_y}{Hu \cdot \eta_{ısı}} \quad (\$/yıl) \quad (16)$$

(16)

Burada r iskonto oranını, n sistemin ekonomik ömrünü, N çevrimin net gücünü, YF yük faktörünü, F_y (\$/kg) yakıt fiyatını, Hu kullanılan yakıtın alt ısı değerini, $\eta_{ısı}$ çevrimin ısı verimini göstermektedir. Yük faktörü santralin bir yıl boyunca ürettiği elektriğin, o yıl içerisinde tam kapasite ile çalışması durumunda üreteceği elektriğe oranıdır. Bu çalışmada iskonto oranı %9, ekonomik ömür 20 yıl, yük faktörü %75, yakıt fiyatı 0,381823 \$/kg (0,805383 TL/m³) olarak alınmıştır. Analizlerde yakıt fiyatı olarak, KDV hariç 15 Haziran 2016 tarihli BOTAŞ sanayi fiyatı alınmıştır [17].

3.1.3. Elektrik üretimi maliyeti

Elektrik enerjisi üretimi maliyeti (g) Denklem 17 kullanılarak bulunabilir. Burada C_s ve C_y sırasıyla yıllık sabit sermaye ve yakıt maliyetini, E ise yıllık elektrik enerjisi üretimi miktarını temsil etmektedir.

$$g = \frac{C_s + C_y}{E} \quad (\$/kWh) \quad (17)$$

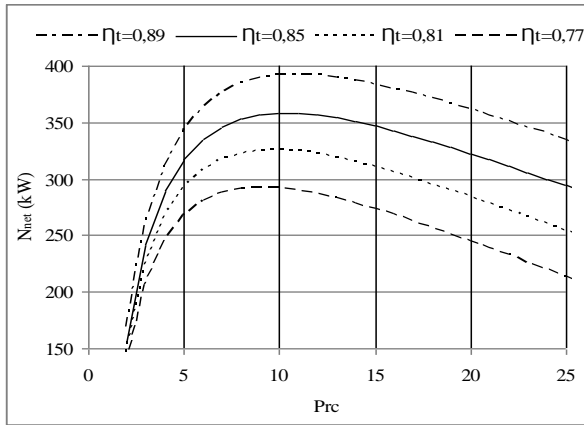
(17)

$$E = 8760 \cdot YF \cdot N_{net} \quad (kWh/yıl) \quad (18)$$

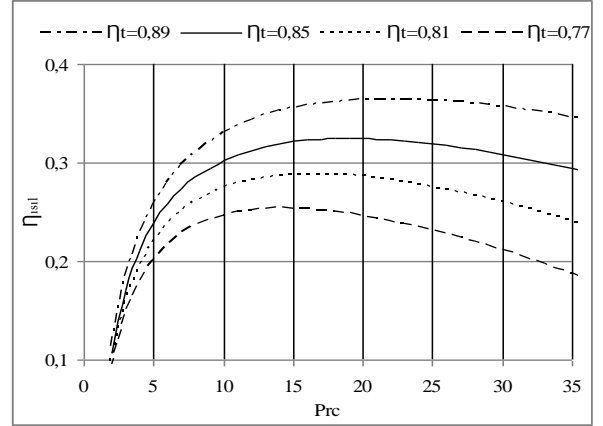
(18)

4. Uygulama ve Tartışma

Türbin izentropik verimi (η_t) %88 ile %89 arasında değiştirilerek, kompresör basınç oranının (Prc) net güç (N_{net}), ısıl verim (η_{isil}) ve elektrik üretimi maliyeti (g) ile değişimleri sırasıyla Şekil 2-4'de verilmiştir. Kompresör basınç oranı sabit tutulduğunda, türbin izentropik veriminin artmasıyla net güç ve ısıl verim yükselmekte, elektrik üretimi maliyeti ise azalmaktadır. Belirli bir türbin izentropik verimde ise, kompresör basınç oranının artması ile hem net güç hem de ısıl verim önce artmakta, bir maksimumdan geçip daha sonrada düşmektedir. Elektrik üretimi maliyeti ise kompresör basınç oranının artması ile önce azalmakta, daha sonra ise bir minimumdan geçip artmaktadır. Dolayısıyla, her türbin izentropik verimi için net gücü ve ısıl verimi maksimum yapan optimum bir kompresör basınç oranı vardır ve ısıl verim için bu oran net güç için olan değerden daima daha yüksektir (Tablo 1). Benzer şekilde, her türbin izentropik verimi için elektrik üretimi maliyetini minimum yapan optimum bir kompresör basınç oranı vardır ve aynı şartlarda ekonomik açıdan optimum kompresör basınç oranı ise net güç ve termik verimi maksimum yapan optimum değerler arasında kalmaktadır (Tablo 1). Farklı türbin izentropik verim değerleri için, hem performans (net güç ve ısıl verim) hem de ekonomik açıdan optimum noktalar Tablo 1'de verilmiştir.



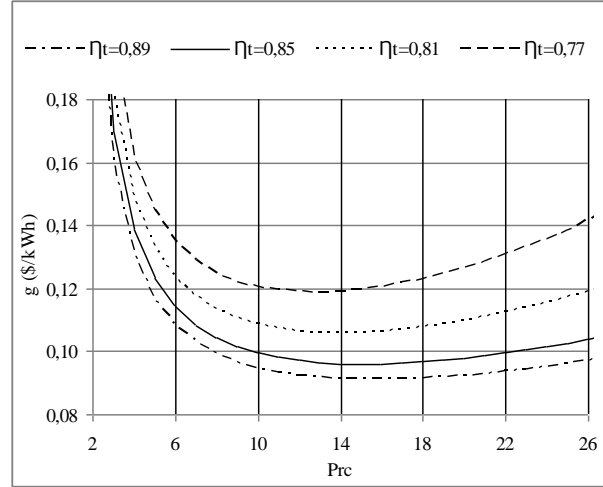
Şekil 2. Kompresör basınç oranı ile net gücün değişimi



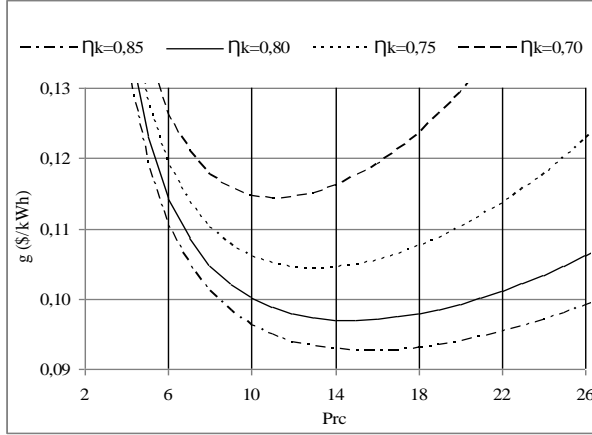
Şekil 3. Kompresör basınç oranı ile termik verimin değişimi

Tablo 1. Türbin izentropik verimi için optimum değerler

η_t (%)	$N_{net,max}$ (kW); $P_{rc,opt}$	$\eta_{isil,max}$; $P_{rc,opt}$	g_{min} (\$/kWh); $P_{rc,opt}$
77	292,9; 9	0,2538; 14	0,1187; 13
81	325,3; 10	0,2881; 16	0,1059; 14
85	358,3; 10	0,3250; 19	0,0960; 15
89	391,8; 11	0,3641; 22	0,0910; 16



Şekil 4. Kompresör basınç oranı ile elektrik üretimi maliyetinin değişimi



Şekil 5. Kompresör basınç oranı ile elektrik üretimi maliyetinin değişimi

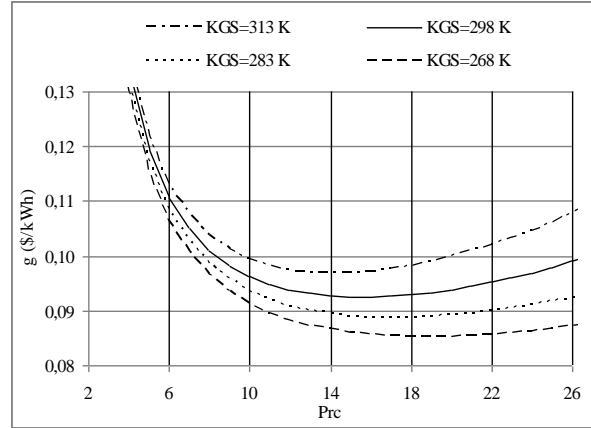
Şekil 5’de kompresör izentropik veriminin (η_k), elektrik üretimi maliyetine (g) etkisi gösterilmiştir. Tablo 2’de ise elektrik üretimi maliyetini minimum yapan optimum değerler verilmiştir. Türbin izentropik veriminde olduğu gibi, kompresör izentropik verimi ve kompresör basınç oranının (Prc) artmasıyla maliyet de düşmekte, optimum kompresör basınç oranı ise yükselmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Kompresör izentropik verimi için ekonomik açıdan optimum değerler

η_k (%)	g_{\min} (\$/kWh); $P_{rc, \text{opt}}$
70	0,1142 ; 11
75	0,1043 ; 13
80	0,0970 ; 15
85	0,0925 ; 16

Şekil 6’da farklı kompresör giriş (çevre) sıcaklığında, kompresör basınç oranının (Prc) elektrik üretimi maliyetiyle (g) değişimi verilmiştir. Çevre sıcaklığı azaldıkça elektrik üretimi maliyeti düşmektedir. Dolayısıyla sıcak bölgelerde gaz türbinlerinin çalıştırılması gerekiyorsa, kompresör girişinde havanın soğutulmasıyla ilgili yatırımların dikkate alınması anlamlı olabilir. Çünkü kompresör

girişinde havanın soğutulmasıyla havanın özgül hacmi düşmekte ve kompresörün harcadığı enerji azalmaktadır. Sonuçta elektrik üretimi maliyeti düşmektedir. Dolayısıyla soğutma için yapılan yatırımın geri dönüşü de daha kısa sürede gerçekleşebilir.



Şekil 6. Kompresör basınç oranı ile elektrik üretimi maliyetinin değişimi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada basit Brayton çevriminin analizden elde edilen sonuçlar şöyledir:

1. Kompresör ve türbin izentropik verimleri imalat şekline yani üreticinin hassasiyetine ve üretimi kalitesine bağlıdır. Bu değerlerin mümkün olduğunca büyük olması istenir. Fakat izentropik verimler artınca hem performans hem de masraflar yükselmektedir. Dolayısıyla çözüm için hem performansı hem de maliyeti dikkate alan yöntemlerin (teknöekonomik analiz vb) kullanılması daha anlamlı olur.
2. Bu çalışmada, sadece performans dikkate alındığında her bir parametre için net gücü ve ısıl verimi maksimum yapan iki farklı kompresör basınç oranı bulunmuştur. Isıl verim için bu oran daima daha yüksektir. Brayton çevriminin teknik açıdan optimum çalışma aralığı ise, bu iki değer arasında olmalıdır. Aynı parametreler için yapılan ekonomik analiz sonuçları ise, elektrik üretimi maliyetini

minimum yapan basınç oranının, teknik çalışma aralığı içinde olduğunu göstermiştir. Örneğin $\eta_t=0,89$ için net gücü ve termik verimi maksimum yapan optimum kompresör basınç oranı sırasıyla 11 ve 22, elektrik enerjisi üretimi maliyetini minimum yapan optimum kompresör basınç oranı ise 16 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, maliyet etkisi dikkate alınmadan sadece performansa göre yapılacak bir seçim çok doğru olmayabilir. Çünkü bu durumda maliyet çok artabilir. Dolayısıyla hem performansı hem de maliyeti dikkate alarak optimum çalışma noktasının belirlenmesi gerekir.

3. Kompresör giriş (çevre) sıcaklığı azaldığında elektrik üretimi maliyeti düşmektedir. Dolayısıyla sıcak bölgelerde, kompresör girişinde havanın soğutulması önemli avantajlar sağlayabilir. Bu ise beraberinde ilave bir yatırım ve işletme masrafı getirecektir. Sonraki çalışmalarda bu ilave masrafları dikkate alan yeni çözümler bulunabilir. Dolayısıyla bu çalışma diğer çalışmalar için referans bir kaynak olarak kullanılabilir.

6. Kaynaklar

1. Noroozian, A., Bidi, M. (2016). An Applicable Method for Gas Turbine Efficiency Improvement. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 95-105.
2. Al-Attar, K., Zainal, Z., (2015). Externally Fired Gas Turbine Technology. *Applied Energy*, 138, 474-87.
3. Benaboud, A., Rufer, A. (2016). Gas Turbine: Optimization of Energy Production and High Efficiency by Using Power Electronics. *Procedia Engineering*, 138, 337-346.
4. Küçükşahin, F. (2007). Buhar ve Gaz Türbinleri. Birsen Yayınevi, İstanbul.
5. Polyzakis, A.L., Koroneos, C., Xydis, G (2008). Optimum Gas Turbine Cycle for Combined Cycle Power Plant. *Energy Conversion and Management*, 49, 551-563.
6. Çetinkaya, S. (1999). Gaz Türbinleri. Nobel Yayınları, Ankara.
7. Çetin, B. (2006). Gaz Türbinlerinin Optimum Performans Analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 7, 59-71.
8. Teppenstall, T. (1998). Advanced Gas Turbine Cycles for Power Generation: A Critical Review. *Applied Thermal Engineering*, 18, 837-846.
9. Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2008). Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla. Güven Kitabevi, İzmir.
10. Horlock, J.H. (1997). Aero-engine Derivative Gas Turbines for Power Generation: Thermodynamic and Economic Perspectives. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 119, 119-123.
11. Büyüktür, A.R. (1995). Termodinamik:Cilt:2, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.
12. Woudstra, N., Woudstra, T., Pirone, A., Stelt, T. (2010). Thermodynamic Evaluation of Combined Cycle Plants. *Energy Conversion and Management*, 51, 1099-1110.
13. Bejan, A., Tsatsoranis, G, Moran, M. (1995). Thermal Design and Optimization. New York.
14. Silveira, J.L., Tuna, C.E. (2003). Thermoeconomic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 479-485.
15. Aybers, N., Şahin, B. (1995). Enerji Maliyeti. YTÜ Matbaası, İstanbul.
16. Erdem H.H., Sevilgen S.H. (2002). Maliyet Bölümlerinin Ağırlıkları ile Elektrik Üretim Teknolojilerinin Yük-Süre Eğrisindeki Sıralamanın Belirlenmesi. 7. *Uluslararası Yanma Sempozyumu*, Ankara, 503-515.
17. <http://www.thesisat.com.tr/yayin/yakit-fiyatlari>