



GAZ/BUHAR KOMBİNE ÇEVİRİM ENERJİ SANTRALLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Nurettin SAVRUK¹, Tülay YEŞİN²

¹EÜAŞ, Santrallar Proje ve Tesis Dairesi, 06490 Ankara

²ODTÜ, Makina Mühendisliği Bölümü, 06531 Ankara

²E-mail : yesin@metu.edu.tr

(Geliş Tarihi : 19.02.2002)

Özet: Elektrik üretiminde gaz türbini sistemleri için yüksek performans seviyeleri, gaz/buhar kombine çevrimi uygulanarak elde edilmektedir. Sistem, Joule ve Rankine çevrimlerinin birleştirilmesini içerdiğinden genel sistem performansı hem gaz türbini hem de buhar türbininin tasarım parametrelerinden etkilenecektir. Dolayısıyla, kombine çevrimin optimum performansı, ancak, gaz ve buhar türbin çevrimlerinin uygun bir şekilde bütünleştirilmesiyle elde edilebilir. Bu çalışmada, gaz türbini tek basıncılı buhar türbini ile birleştirilmiştir. Analizlerde soğutmalı gaz türbini modeli içerilmiştir. Kompresör basınç oranının ve gaz türbini giriş sıcaklığının kombine çevrimin genel performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Kombine çevrimin genel veriminin yükseltilmesinin gaz türbini giriş sıcaklığının artırılması ile sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, kombine çevrim uygulamalarında, tek başına bir gaz türbini sistemindekine nazaran daha düşük kompresör basınç oranlarının, hem maksimum genel verim hem de maksimum özgül iş üretimi açısından daha tercih edilir olduğu da görülmüştür. Bu sayede elektrik üretim maliyeti de azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kombine Çevrim, Atık Isı Buhar Üretici, Joule Çevrimi, Rankine Çevrimi.

PERFORMANCE ANALYSIS OF GAS / STEAM COMBINED CYCLE POWER PLANTS

Abstract: In power generation applications, high performance levels are achieved for gas-turbine systems by means of gas/steam combined cycle. Because the system involves the coupling of a topping Joule cycle to a bottoming Rankine cycle, the overall system performance will be influenced by the design parameters of both the gas turbine engine and steam power plant. Consequently, optimum performance of the combined cycle is achieved only if the gas turbine and steam turbine cycles are properly matched. In the present work, internal combustion gas turbine engine has been coupled with single pressure steam power plant. Cooled gas turbine model has been included in the analysis. The effects of compressor pressure ratio and gas turbine inlet temperature on overall performance of the combined cycle has been investigated. Results showed that, the increase in overall efficiency of combined cycle is achieved by increasing the gas turbine inlet temperature. In combined-cycle applications, lower compressor pressure ratio values compared to that for simple gas turbine systems would be more attractive where peak overall efficiency and specific work output of combined-cycle power plant are maximized, and cost of electricity generation is minimized.

Key Words: Combined Cycle, Heat Recovery Steam Generator, Joule Cycle, Rankine Cycle.

SEMBOLLER

AID	Alt ısııl değeri
AIBÜ	Atık ısı buhar üretici
$\dot{E}$	Enerji girdisi
h	Özgöl entalpi
$\dot{m}$	Kütle debisi
P	Basınç
r_p	Kompresör sıkıştırma oranı
T	Sıcaklık
TIT	Gaz türbini giriş sıcaklığı
w	Özgöl iş
$\dot{W}$	Çıkış gücü
η	Termik verim
η_{komp}, η_{GT}	Kompresör ve gaz türbininin izentropik verimi
η_{pompa}, η_{BT}	Pompa ve buhar türbininin izentropik verimi
η_{gen}	Jeneratör verimi

Alt simgeler

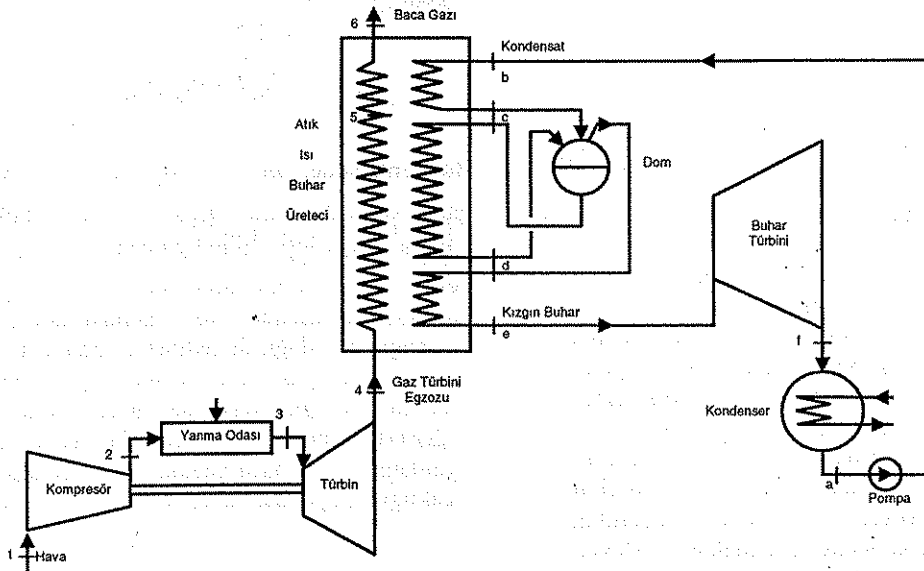
ζ	Çıkış
g	Gaz
i	Giriş
s	Buhar
y	Yakıt
el	Elektrik
BS	Buhar santrali
BT	Buhar türbini
GS	Gaz santrali
GT	Gaz türbini

GİRİş

Gaz türbinleri, aynı çıkış gücündeki bir buhar santraline nazaran daha az yer kaplayan ve yatırım maliyeti düşük tesislerdir. Jet motorları teknolojisindeki gelişmelerin aktarımıyla; 1960'lı yıllarda, 400-600 °C sıcaklıktaki değerli bir ısı kaynağı olan türbin egzozu atmosfere atılmasına rağmen, tek başına bir gaz türbininden buhar santrallerine yakın bir verim elde edilebilmekte ve düşük yakıt fiyatları dolayısıyla da ileri veya kombine çevrim tasarımlarına gereksinim duyulmamaktaydı.

Ancak, 1970'lerdeki petrol krizinden sonra, güç santrallerinde yüksek verim birinci öncelik haline gelmiş ve kombine çevrim uygulamaları ilk başlarda mevcut buhar santrallerine gaz türbini ilavesi ve onun egzozunun kazanda kullanılması (repowering uygulamaları) şeklinde ve sonraları özel tasarım gaz/buhar kombine çevrim santralleri şeklinde bugünkü alışıl gelmiş güç santrali biçimine gelmiştir.

Bir gaz/buhar (Joule/Rankine) kombine çevrimi, gaz türbini ile buhar türbinini bir atık ısı kazanı aracılığıyla birleştiren çevrimdir. Gaz/buhar kombine çevrim enerji santralının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Gaz türbininin sıcak egzozu bir atık ısı kazanı aracılığıyla buhar üretiminde kullanılır. Üretilen buhar daha sonra buhar türbininde ilave iş üretir. Kombine çevrimin açıklayıcı bir T-s diyagramı Şekil 2'de sunulmuştur. Sistem, üstte Joule çevrimi (1-2-3-4-5-6) ve altta Rankine çevriminin (a-b-c-d-e-f-a) birleştirilmesini içerdüğinden genel sistem performansı hem gaz

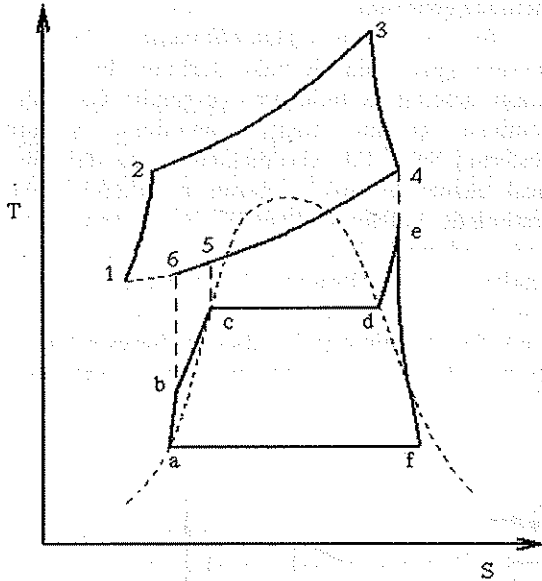


Şekil 1. Gaz/buhar kombine çevrim enerji santralının şematik gösterimi

türbininin, hem de buhar türbininin tasarım parametrelerinden etkilenecektir. Dolayısıyla, kombine çevrimin optimum performansı, ancak, gaz ve buhar türbin sistemlerinin uygun bir şekilde bütünleştirilmesiyle elde edilebilir.

Gaz Türbini (Üst Çevrim)

Gaz türbinine giriş sıcaklığının artırılması Joule çevriminin hem ısı verimini hem de özgül işini artırmakta ancak bu yüksek sıcaklıklara uygun malzemeye gerek duyulmaktadır. Malzeme alanında önemli gelişmeler kaydedilmekle birlikte, malzemelerin çalışma ortam sıcaklıkları düşük kalmakta ve dolayısıyla, mevcut teknolojiye bir çok gaz türbininde sıcak gaza maruz kalan kısımlar (rotor, hareketli ve sabit kanatlar, yanma odası duvarları, yanma odası - türbin ara geçiş bölmesi vb.) kompresör çıkışından veya ara bölmelerinden alınan hava ile soğutulmaktadır.



Şekil 2. Kombine çevrimin T-s diyagramı

Genleşme yolunda uygulanan soğutma sayesinde türbin giriş sıcaklığı (TIT), malzeme açısından müsaade edilebilir sıcaklıkların üstünde olabilmektedir. Ancak, uygulanan türbin soğutma teknolojisine bağlı olarak, belli bir sıcaklık değeri aşıldığında soğutma nedeniyle çevrimin ısı verimi düşmektedir. Bu nedenle; türbine giriş sıcaklığı artırılırken, gaz türbinli güç çevrimlerinin performans analizlerine türbinin soğutulma etkisinin de katılması önem kazanmaktadır. Mevcut çalışmada, Yeşin ve Savruk (2001) tarafından

geliştirilen, türbin genleşme yolunun soğutmalı ve soğutmasız bölümlere ayrıldığı bir "gaz türbini soğutma modeli"nden yararlanılmıştır.

Buhar Türbini Güç Çevrimi (Alt Çevrim)

Alt çevrimin önemli kısımları; atık ısı buhar üretici (AİBÜ), buhar türbini, pompa ve kondenserdir. Elektrik üretimi uygulamalarında en yaygın kullanılan atık ısı buhar üreticinde, alt çevrim için gerekli tüm ısı, besleme suyu ısıtması da dahil, gaz türbini egzoz gazından sağlanır. Neticede minimum baca gazı sıcaklığı ve maksimum genel verim elde edilebilir.

AİBÜ'nün buhar ve gaz güzergahlarındaki sıcaklık profili Şekil 3'te gösterilmektedir. Atık ısı buhar üreticinde, gaz ve buhar arasında minimum sıcaklık farkı, ΔT_{sc} , ekonomizer çıkışında gerçekleşir. Bu noktadaki "daralma noktası sıcaklık farkı" (pinch point temperature, T_{pp}) verimli bir AİBÜ tasarımı için temel faktörlerden birisidir (Tomlinson ve Lee, 1985).

Egzoz gazının AİBÜ girişindeki sıcaklığı ile AİBÜ'yü terkeden ana buharın sıcaklığı arasındaki fark (ΔT_{4e}) sabitlenirse; gaz türbini egzoz sıcaklığı (T_4) değerinden ana buharın sıcaklığı (T_c) elde edilebilir. Eğer buharlaşma basıncı (P_c) önceden seçilirse; bu sayede hem ana buharın özgül entalpisi (h_c), hem de doyma sıcaklığı (T_c) bilinir ve dolayısıyla farzedilen ΔT_{sc} (T_{pp}) değeri için gaz sıcaklığı T_5 saptanabilir. Atık ısı buhar üreticiden herhangi bir ısı kaybı olmadığı farzedilirse, kızdırıcı ve dom etrafındaki ısı dengesi şöyle olacaktır:

$$\dot{m}_s (h_e - h_c) = \dot{m}_g (h_4 - h_5) \quad (1)$$

Bu denklemde, $\dot{m}_s$ ve $\dot{m}_g$; sırasıyla, buhar ve gazın kütle debisidir. Denklem 1'deki bütün özgül entalpi değerleri bilindiğinden ($\dot{m}_s / \dot{m}_g$) kütle debisi oranı hesap edilebilir. İlaveten, yoğuşma basıncı sabitlenir ve kondensatın doyma sıcaklığında olduğu farzedilirse; özgül entalpi h_a ve besleme pompası çıkışındaki özgül entalpi h_b (verilen pompa verimine göre hesap edilir) değerleri bilinir. Isı dengesinin AİBÜ boyunca uygulanması ise baca gazının özgül entalpi (h_6) ve sıcaklığını (T_6) verir:

$$\dot{m}_s (h_e - h_b) = \dot{m}_g (h_4 - h_6) \quad (2)$$

Ayrıca, buhar çevrimi için, kabul edilen izentropik türbin veriminden türbin çıkışındaki buharın entalpi ve kalitesi hesaplanabilir.

PERFORMANS ANALİZİ

Bir kombine çevrim enerji santralının performansı; santralin çıkış gücünün yakıtın enerji girdisine oranı olarak ifade edilen genel verimdir:

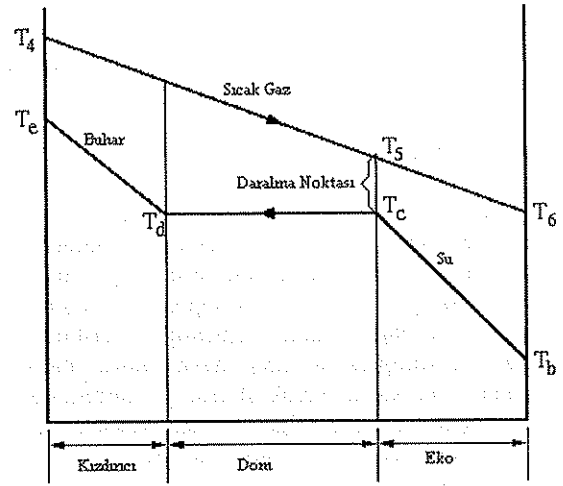
$$\eta = \frac{(\dot{W}_{el})_{GS} + (\dot{W}_{el})_{BS}}{\dot{E}_y} \quad (3)$$

Bu denklemde $(\dot{W}_{el})_{GS}$ ve $(\dot{W}_{el})_{BS}$, sırasıyla, gaz türbini ve buhar türbini santrallerinin çıkış güçleri olup, $\dot{E}_y$ ise yakıtın enerji girdisidir. Doğal gazın büyük bir çoğunluğunu metan gazı teşkil ettiğinden, yakıtın enerji girdisinin hesabında metanın Alt Isıl Değeri (AID) kullanılabilecek olunursa, genel verim:

$$\eta = \frac{(w_{el})_{GS} + (w_{el})_{BS}}{\frac{\dot{m}_y}{\dot{m}_{komp}} AID} \quad (4)$$

Burada, $(w_{el})_{GS}$ ve $(w_{el})_{BS}$, sırasıyla, gaz türbini ve buhar türbini santrallerinin özgül çıkış güçleridir (kompresörde sıkıştırılan hava kütlesi başına üretilen iş). Yakıtın kompresörde sıkıştırılan havanın kütle debisine oranı, $(\dot{m}_y / \dot{m}_{komp})$, Yeşin ve Savruk'un (2001) soğutmalı gaz türbini modelinden hesaplanmaktadır.

Kombine çevrim enerji santralının performans analizini gerçekleştirmek için gaz ve buhar türbinlerinin tasarımında kullanılan parametreler Tablo.1' de listelenmiştir. Tabloda, gaz türbini için belirtilen değerler; Trakya, Ambarlı ve Bursa kombine çevrim santrallerinin performans test raporları verileri ve bunların soğutmalı gaz türbini modelinde kullanımıyla hesaplanan değerlerdir. Buhar türbini için ise parametre değerleri; literatürdeki ilgili çalışmalardan derlenmiştir.



Şekil 3. AIBÜ'nün buhar ve gaz güzergahlarındaki sıcaklık profili.

Tablo 1. Gaz ve buhar türbinleri için tasarım değerleri

Gaz Türbini	
η_{komp}	91.0 %
η_{GT}	86.0 %
η_{gen}	98.5 %
$\Delta P_{komp,\dot{c} - GT,i}$	1.2 %
$\Delta P_{GT,\dot{c} - baca,\dot{c}}$	2.3 %
Buhar Türbini	
ΔT_{4e}	25.0 °C
ΔT_{5c}	20.0 °C
η_{pompa}	75.0 %
η_{BT}	85.0 %
BT egzoz basıncı, P_f	5.0 kPa
BT egzozundaki min. buhar kalitesi	90.0 %
BT maksimum giriş sıcaklığı, $T_{e,max}$	540 °C
BT maksimum giriş basıncı, $P_{e,max}$	10.0 MPa

Bu çalışmada; AIBÜ tasarımı için, T_{pp} ve buhar üreticine giren egzoz gazı ile buhar üreticini terkeden kızgın buhar arasındaki sıcaklık farkı (ΔT_{4e}) için birer değer atanmıştır. Buhar türbini santrali için ise, kombine çevrimin genel verimini maksimum yapacak optimum ana buhar basıncı hesap edilmiştir. Bu tasarım yaklaşımı Huang

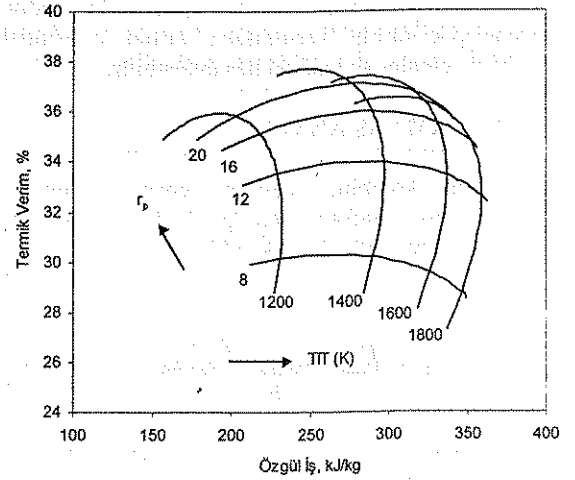
(1989), Ruffli (1987), Tomlinson ve Lee (1985), Jordal (1999) ve Mathieu vd. (1995) gibi birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır.

SONUÇLAR

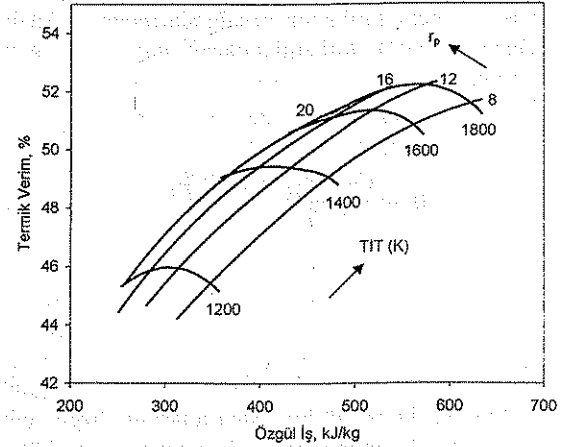
Şekil 4'te tek başına bir gaz türbini ve Şekil 5'te ise onun kombine çevrim uygulaması durumunda özgül iş ve termik verimin gaz türbini giriş sıcaklığı (TIT) ve kompresör sıkıştırma oranına (r_p) bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Özgül iş (kompresöre giren hava kütlesi başına üretilen iş) ne kadar büyük olursa, gaz türbini de o kadar küçük olacaktır. Diğer taraftan, yüksek verim elde edilmesi de birim yakıt maliyetini azaltmak açısından önemlidir.

Şekil 4'te görüleceği üzere; belli TIT değeri için, gaz türbininden elde edilecek maksimum özgül işe karşılık gelen kompresör sıkıştırma oranı, maksimum termik verimin elde edildiği kompresör sıkıştırma oranına nazaran oldukça düşüktür. Belli bir kompresör sıkıştırma oranı için, türbin giriş sıcaklığındaki artış özgül işi artırmakta, ancak belli bir TIT değerinden sonra, gaz türbininin soğutulmasının negatif etkisi dolayısıyla termik verim düşmektedir.

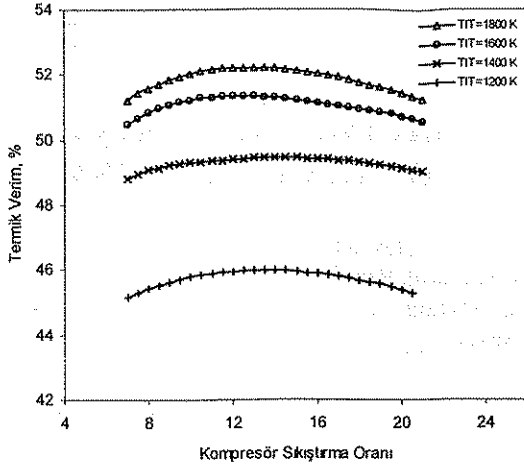
Kombine çevrim uygulamalarında (Şekil 5), gaz türbini giriş sıcaklığının artırılması genel verim ve özgül işi artırmaktadır. Belli bir TIT değeri için, kompresör sıkıştırma oranının genel verim üzerinde etkisi oldukça az olmasına rağmen, kombine çevrimin genel veriminin maksimum olduğu bir optimum r_p değeri mevcuttur (Şekil 6). Bu değer, gaz türbinin özgül işinin maksimum olduğu r_p değerine yakındır. Diğer taraftan, kombine çevrimin özgül işi, incelemenin yapıldığı aralıkta, r_p 'nin artışıyla azalmaktadır (Şekil 7). Dolayısıyla, genel verimin maksimize edildiği düşük kompresör sıkıştırma oranları tercih edilirse; kombine çevrimin hem verim hem de özgül işi maksimize edilecek ve elektrik üretim maliyeti minimuma inecektir.



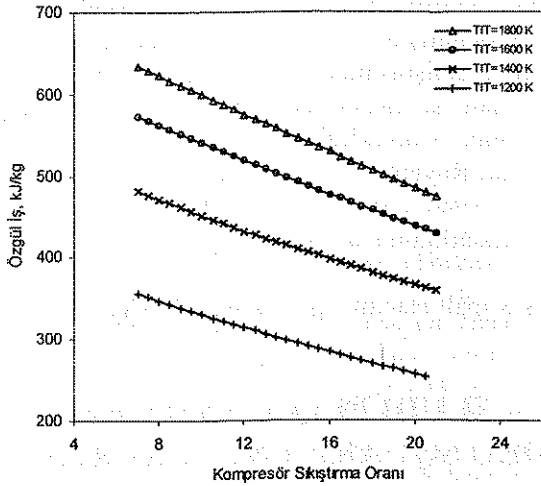
Şekil 4. Gaz türbininin performans eğrileri



Şekil 5. Kombine çevrimin performans eğrileri



Şekil 6. Kombine çevrimin genel veriminin kompresör sıkıştırma oranı ile değişimi.



Şekil 7. Kombine çevrim için özgül işin kompresör sıkıştırma oranı ile değişimi.

KAYNAKLAR

Huang, F.F., A Methodology for Overall Performance Evaluation of Combined Gas-Steam Power Plants Based on Energy As Well As Exergy Consideration, *Proceedings of ASME COGEN-TURBO*, Nice, 1989.

Rufli, P., A Systematic Analysis of The Combined Gas/Steam Cycle, *Proceedings of ASME COGEN-TURBO*, 1987.

Bolland, O. and Stadaas J.F., Comparative Evaluation of Combined Cycles and Gas Turbine Systems With Water Injection, Steam Injection, and Recuperation, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.117, 1995.

Tomlinson, L.O. and Lee, D.T., Sawyer's Gas Turbine Engineering Handbook, *Turbomachinery International Publications*, 1985.

Jordal, K., Gas Turbine Cooling Modelling – Thermodynamic Analysis and Cycle Simulations, *Lund Institute of Technology*, Lund, 1999.

Mathieu, Ph., Chefneux, E., and Dechamps, P.J., Energy and Exergy Analysis of CO₂ Based Combined Cycle Plants, *CIRCUS*, Roma, 1995.

Yeşin, T. and Savruk, N., A Thermodynamic Model for Gas Turbine Cooling, *Proceedings of ECOS'01*, İstanbul, 2001.