

GAZ TÜRBİNLİ SANTRALLERDE ÇEVRE SICAKLIĞI VE BASINCININ SANTRAL PERFORMANSINA ETKİLERİ

M.Zeki YILMAZOĞLU, Murad A. RAHİM

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara
zekivilmazoglu@gazi.edu.tr, mrahim@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 13.07.2009 ; Kabul/Accepted: 03.11.2010)

ÖZET

Gaz türbinli santraller, diğer elektrik üretim tesislerine göre, düşük ilk yatırım maliyetleri, hızlı yük değiştirme özelliği, ilk kurulum süresinin kısa oluşu ve kömürlü santrallere göre daha az zararlı emisyon salınımı gibi üstünlükleri ile ülkemizde, özellikle özel sektör desteği ile birçok yerde kurulmuş ve halen işletilmektedir. 2030 yılı elektrik tüketimi projeksiyonlarına göre elektrik tüketimimiz 2008 yılı tüketimimizin yaklaşık iki katı olacaktır. Buna karşın, gaz türbinli santrallerde performans artırıcı bazı önlemler alınarak ve uygun santral kurulum yeri belirleyerek santral performansı artırılabilir. Çevre sıcaklığı, basıncı ve havadaki bağıl nem oranının santral performansına etkisi büyüktür. Bu nedenlerle gaz türbinli santrallerin kurulum yerlerinin, en verimli enerji dönüşümünün gerçekleştirilebileceği ve geri ödeme süresinin en az olacağı yerlerde seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, Adana ya da Ankara illerinde çalışması düşünülen, gaz türbinli bir santralde, çevre sıcaklığı, basıncı ve bağıl nem oranının santral performansına (santral verimi, elektrik üretimi ve yakıt tüketimi) etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte, kompresör giriş havasının nemlendirilerek soğutulmasının sistem performansına olan etkileri de incelenmiş ve geri ödeme süresi yöntemi kullanılarak, seçim yapılmıştır. Ekonomik analizler sonucunda nemlendirme ile giriş havası soğutmanın geri ödeme süresi Ankara şartlarında 257 gün ve Adana şartlarında 81 gün olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gaz türbinli santraller, santral kurulum yeri, kompresör giriş havası soğutma, santral optimizasyonu.

THE EFFECTS OF AMBIENT TEMPERATURE AND PRESSURE ON GAS TURBINE POWER PLANTS PERFORMANCE

ABSTRACT

Gas turbine power plants, when compared to other power plants, due to their low investment cost, fast load change characteristic, low installation time and releasing low harmful emissions with respect to coal fired power plants, in our country, especially with the support of private sector, were established and currently operate. According to 2030 electricity consumption projections, it is approximately twice of 2008 consumed electricity. On the other hand, power plants performance can be increased by taking some performance augments precautions and determine the best installation place for new ones. Ambient temperature, pressure and relative humidity in the air have a great effect on a plant performance. Therefore, the installation place of the gas turbine power plants should be chosen the most efficient energy conversion and the minimum payback time.

In this study, in a gas turbine power plant, which is thought to be installed in Adana or Ankara, the effects of the environmental temperature, pressure and relative humidity is examined. Also, the effects of inlet air cooling on system performance are examined and by using payback period the appropriate installation place is determined. As a result of economical analysis on the base of payback time evaporative inlet air cooling application takes 257 days for Ankara conditions and 81 days for Adana conditions.

Keywords: Gas turbine power plants, installation place of power plants, inlet air cooling, power plant optimization.

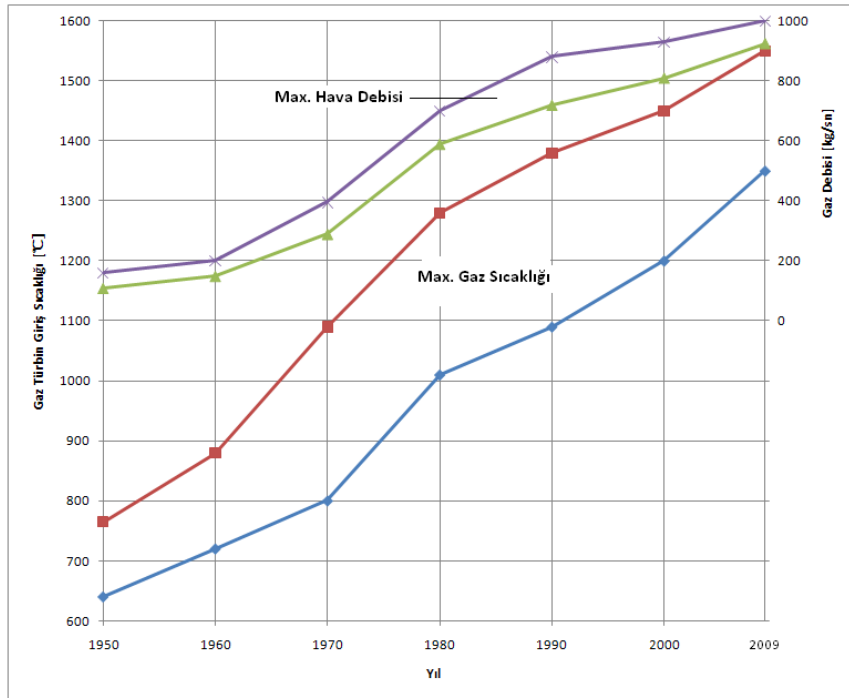
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gaz türbini (GT) basit sistem yapısı, düşük yatırım maliyeti, hızlı yük değişim özelliği, çevrim sıcaklığının artırılması sonucunda kanat soğutma uygulaması ile kazandığı yüksek ekserji düzeyi, hafifliği ve az yer kaplaması nedeniyle, Bileşik Isı – Güç (BIG) ve Kombine Çevrim (KÇ) uygulamaları ile de tüm ekonomik sektörlerde ekonomik ve çevresel yönden uygun biçimde kullanılabilen bir enerji dönüşüm sistemi haline gelmiştir.

Son yıllarda, mevcut endüstriyel gaz türbinlerinin performanslarının ve elektrik üretim verimlerinin artırılmasına yönelik rehabilitasyon ve modernizasyon çalışmalarına büyük önem verilmektedir. Bunların başında, yakma havasının soğutulmasıyla kompresör için, yakma havasının türbin eksoz gazları ile ön ısıtılmasıyla da yakıt tüketiminin azaltılması, kanat soğutulması ile gaz türbini ekserji düzeyinin artırılması, kullanılmayan yüksek ekserjili eksoz gazlarının uygun atık ısı kazanlarından geçirilerek sanayi bölgelerinde endüstriyel buhar üretimi veya bölgesel ısıtma ve soğutma uygulamaları için gerekli ısı üretimi gibi konular gelmektedir. Gaz türbinlerinde yakıt olarak doğalgaz ve sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Önümüzdeki 30–40 yıl içerisinde petrol ve doğalgaz fiyatlarının, rezervlerde öngörülen hızlı azalma nedeniyle, aşırı biçimde artması beklenmektedir. Bu dönemde kömür gazlaştırması ile çalışan yüksek ekserjili gaz türbinli bileşik ısı – güç çevrim santrallerinin, tercih edilen enerji dönüşüm sistemi olarak öne çıkması beklenmektedir. Söz konusu bu

gelişmeler ve projeksiyonlar göz önünde tutularak, basit çevrim gaz yakıtlı bir gaz türbini çevriminin analizi, optimizasyonu ve sistem yapısının oluşturulması ve tasarımındaki mühendislik yaklaşımının irdelenmesi enerji mühendisliği faaliyetleri yönünden büyük önem taşımaktadır. Gaz türbinlerinde yakma hava debisi ve gaz türbini giriş sıcaklığının yıllara göre değişimi Şekil 1’de verilmiştir. İlk yıllarda türbin giriş sıcaklıkları, alaşım kanat malzemesi dayanım sıcaklıklarında (650 – 800°C) tutulmuştur. Bu durumda türbinde üretilen gücün tamamına yakını kompresör tarafından kullanıldığından, geriye elektrik üretimi için fazla bir net iş kalmamaktadır. Bu nedenle elektrik üretiminde sadece acil durum sistemi veya küçük kapasiteli pik yük güç üretim sistemi olarak kullanılmıştır. 1970’lerden itibaren geliştirilen yüksek performanslı kompresörler ve türbin kanat soğutma teknolojileri, gaz türbini kapasitesi ve giriş ekserji düzeyini artırma olanağını doğurmuştur.

Şekil 1’de 1973’teki birinci enerji krizinin ve 1979’daki ikinci enerji krizinin gaz türbini teknolojisindeki etkisini göreceli bir biçimde ortaya koymaktadır. Günümüzde tek bir gaz türbini ünitesinin elektrik üretim kapasitesinin 250 MW’lara, bir gaz türbini ve atık ısı kazanından oluşan bir kombine çevrim santralının elektrik üretim kapasitesinin ise 350 MW’ın üzerine çıktığı, kombine çevrim santral verimlerinin ise %60’lara yaklaştığı görülmektedir. Günümüz termik santral verimlerinin % 30 – 44 arasında tutulursa, gaz türbini temelli kombine çevrim santrallerinin geldiği düzey ve elektrik üretimindeki önemi açıkça görülmektedir [1].



Şekil 1. Gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklığının yıllara göre değişimi [1] (Variation of turbine inlet temperature in gas turbines according to years)

Bu nedenlerle doğal gazlı kombine çevrim santralleri, elektrik üretim yük eğrilerinin, temel yük bölgesinde, özellikle ülkemizde sürekli çalıştırılır hale gelmiştir. Türkiye'deki kombine çevrim santralleri uygulamalarında genelde sistem performansları olması gerekenlerin altındadır. Bu nedenle bu santrallerde performans artırıcı rehabilitasyon ve modernizasyon çalışmalarının yapılması zorunludur.

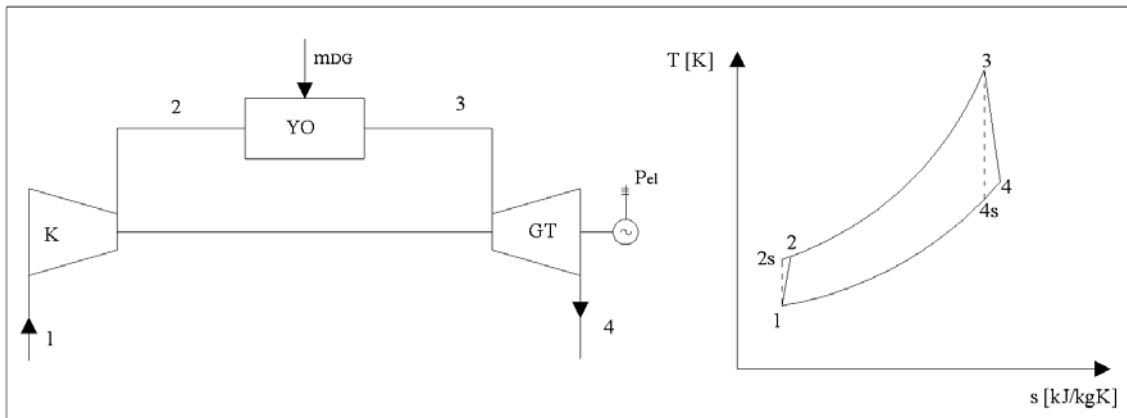
Alhazmy ve Najjar [2], çalışmalarında kompresör girişinden önce su spreyi ile soğutma bataryalarının performanslarını karşılaştırmıştır. Su spreyinin kuru ve sıcak iklimlerde daha etkili sonuçlar verdiğini ve daha ucuz olduğunu, soğutma bataryalarının ise daha pahalı olmasına karşın, yaş termometre sıcaklığına bağımlı olmadan, daha düşük sıcaklıklara havanın soğutulmasıyla daha fazla güç elde edilebildiğini göstermişlerdir. Ünver ve Kılıç [3], çalışmalarında doğal gaz yakıtlı bir kombine güç santralının çevre sıcaklığına bağlı olarak performans parametrelerinin değişimini ve değişim parametrelerinin birinci ve ikinci kanun kapsamında analizlerini yapmışlardır. Kakaras ve arkadaşları [4], çalışmalarında gaz türbinli santrallerde giriş havası soğutma metotlarını incelemişlerdir. Bhargava ve Meher-Homji [5], gaz türbinlerinde evaporatif soğutma ve sislendirme ile overspray çalışmalarının parametrik analizini yapmışlardır. Aeroderivative gaz türbinlerinde heavyduty gaz türbinlerine göre sislendirme de daha iyi performans artışı olduğunu belirtmişlerdir. Alhazmy ve arkadaşları [6], sıcak ve nemli iklimlerde giriş havasının soğutulmasının santral performansına etkilerini incelemişlerdir ve sonuç olarak farklı soğutma uygulamaları ile santral performansının değişimlerini belirtmişlerdir. Jones ve Jacobs [7], çalışmalarında kombine çevrim santrali performansının artırılmasında ekonomik ve teknik süreçleri ele almışlardır. Kim ve Blanco [8], rejeneratörlü gaz türbinlerinde sislendirme uygulanmasını incelemişlerdir. Zadpoor ve Golshan [9], çalışmalarında evaporatif soğutma sisteminden önce kurutucu yerleştirmişler ve çevre şartlarının değişimi ile NO_x emisyonlarındaki değişim ve santral performansının değişimini incelemişlerdir. Kakaras,

Doukelis ve Karaellas [10] çalışmalarında absorpsiyonlu soğutma sistemi ile giriş havasının soğutulmasını incelemişler ve soğutma yapılmayan bir durumla karşılaştırmışlardır. Dawaud, Zurigat ve Bortmany [11], çalışmalarında gaz türbinli giriş havasının soğutulmasının santral performansına etkilerini Umman'da üç farklı bölge için evaporatif soğutma, sislendirme, absorpsiyonlu soğutma ve buhar sıkıştırımlı soğutma sistemleri için incelemişlerdir.

Gaz türbinli santrallerde kompresör giriş havasının soğutulmasının santral performansına etkileri birçok çalışma ile incelenmiştir. Buna karşın, çevre şartlarına göre santral kurulum yerinin belirlenmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Ankara ve Adana ve illeri için uygun santral yeri belirlenmesi göz önüne alınmıştır. Bu iki ilin seçimindeki amaç, rakım ve sıcaklık değişiminin santral verimine, elektrik üretimine ve yakıt tüketimine olan etkilerinin incelenmesidir. Çalışmada, belirlenen dış ortam şartlarına göre santral performansı değişimi ve kompresör giriş havasının nemlendirme ile soğutulmasının santral performansına etkileri incelenmiştir. Kompresör giriş havasının soğutulmasının ekonomik analizi geri ödeme süresi yöntemi ile belirlenmiştir.

2. ISIL-GÜÇ SANTRALİNİN SİSTEM VE ÇEVİRİM YAPISI (SYSTEM AND CYCLE STRUCTURE OF THE POWERPLANT)

Basit çevrim gaz türbinli bir ısı - güç santrali; kompresör, yanma odası, gaz türbin, elektrik jeneratörü ve varsa yakma havası ön ısıtıcısından oluşur (Şekil 2). Kompresör tarafından belli bir sıkıştırma oranına kadar basınçlandırılan yakma havası, yanma odasına gönderilir. Gaz veya sıvı yakıt, yanma odası üzerindeki bir basınçla, yanma odasına püskürtülür. Yanma odası sıcaklığı; çeşitli yaklaşımlarla (fazla hava, kademeli yakma, su veya buhar püskürtme vb.) türbin giriş sıcaklığı, türbin ekserji potansiyeli, emisyon oluşumu koşulları vb. için uygun düzeylerde tutulur. Güç akışkanı işlevi



Şekil 2. (a) Basit bir gaz türbinli çevrimin sistem yapısı (b) Basit bir Brayton çevrimin T-s diyagramı (a) System structure of a simple gas turbine cycle (b) T-s diagram of simple Brayton cycle

gören yanma ürünleri, türbinde atmosfer basıncına kadar genişlerken, enerjisinin bir bölümü mekanik enerjiye dönüşür. Elektrik jeneratörünü çalıştıran mekanik enerji, jeneratör sisteminde gerçekleştirilen elektro – mekanik çevrimi ile elektrik enerjisine dönüşür. Üretilen elektrik enerjisi, trafo yardımı ile istenen gerilim düzeylerine getirilerek, elektrik iletim, dağıtım veya kullanım şebekelerine beslenir.

Basit bir gaz türbini ünitesinin sistem yapısı Şekil 3a’da, ilgili gaz ısı – güç çevriminin T – s diyagramı ise Şekil 3b’de gösterilmiştir. Gaz ısı – güç çevrimi; kompresördeki hava sıkıştırma sürecinden (Şekil 3b, 1–2s), yanma odasında iş (güç) akışkanına ısı ilavesi (Şekil 3b, 2s – 3), türbindeki genişleme (Şekil 3b, 3 – 4s) ve atık ısının çevreye atılması veya atık ısı kazanında kullanımı (Şekil 3b, 4s – 1) süreçlerinden oluşur. Çevrimsel özgül iş ve ısı aktarım eşitlikleri aşağıda verilmiştir [15].

Kompresör özgül izentropik (teorik) sıkıştırma işi,

$$w_{k,s} = c_{p1} \cdot T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1)$$

Kompresör özgül gerçek sıkıştırma işi,

$$w_k = \frac{w_{k,s}}{\eta_k} = \frac{1}{\eta_k} \cdot c_{p1} \cdot T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2)$$

Yanma odasında iş akışkanına özgül ısı aktarımı,

$$q_{yo} = C_p \cdot 2-3 (T_3 - T_2) \quad (3)$$

Türbin özgül izentropik (teorik) genişleme işi,

$$w_{t,s} = c_{p3} \cdot T_3 \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (4)$$

Türbinin özgül gerçek genişleme işi,

$$w_t = w_{t,s} \cdot \eta_t = \eta_t \cdot c_{p3} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (5)$$

Isıl – güç çevriminde üretilen özgül net iş,

$$w_{net} = w_t - w_k \quad (6)$$

Çevrim verimi,

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{yo}} \quad (7)$$

Yukarıda verilen özgül iş ve ısı transferiyle ilgili eşitliklerin birimleri [kJ/kg]’dir. İlgili sıcaklıklardaki ortalama özgül ısı, C_p [kJ/kg.K], ilgili gaz hacimsel karışım oranları, sıcaklık aralığı, gaz türleri vb. dikkate alınarak termodinamik gaz karışım eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir. İlgili özgül iş ve ısı

aktarımları ile verimler kullanılarak enerji kullanımı toplam verimi yakıt ısısının net elektriğe dönüşen verimi veya net gaz türbin verimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\eta_{GT-net} = \frac{w_{net}}{q_{yo}} \eta_{yo} \eta_m \eta_j \eta_{it} \eta_{tr} \quad (8)$$

Genel yapıdaki bir gaz türbin sisteminin net elektrik verimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\eta_{GT} = \frac{\sum_{i=1}^i w_{net}}{\sum_{j=1}^j q_{yo}} \cdot \eta_m \cdot \eta_j \cdot \eta_{it} \cdot \eta_{tr} \quad (9)$$

Burada, η_{GT} ; gaz türbin net verimini (yakıtın kimyasal enerjisinin, trafo çıkışındaki elektriğe dönüşüm verimini), η_{yo} ; yanma verimini, η_m ; mekanik verimi, η_j ; jeneratör verimini, η_{it} ; iç elektrik tüketimi nedeniyle tanımlanan verimi, η_{tr} ; trafo verimini göstermektedir.

Eş.5’e bakıldığında kompresör özgül sıkıştırma işi T_1 sıcaklığına (çevre sıcaklığına) bağıllık göstermektedir. Çevre havası sıcaklığının arttığı yaz aylarında kompresör işi de artacağından elde edilen net işte bir düşme meydana gelmektedir. Bu ise çevrim veriminin azalmasına neden olmaktadır. Kompresör giriş havasının evaporatif yollarla, sislendirme uygulaması ile, buhar sıkıştırma soğutma sistemleri ile, absorpsiyonlu soğutma sistemleri ya da LNG (Liquified Natural Gas) kullanan tesislerde iş akışkanının LNG buharlaşma ızgarası üzerinden geçirilmesi ile soğutulması sonucu kompresör giriş havası sıcaklığı düşürülür ve kompresör özgül işi bu şekilde azaltılabilir. Bu ise, Eş. 6’ dan da görüldüğü gibi net elektrik üretimini arttıracaktır.

3. GAZ TÜRBİNİ ÇEVİRİM YAPISI, TASARIMI VE OPTİMİZASYONU (CYCLE STRUCTURE, DESIGN AND OPTIMIZATION OF A GAS TURBINE)

Gaz türbinlerinde çevrim yapısının tasarım ve optimizasyonunla ilgili başlıca tasarım ve işletme parametreleri, yakma havası kompresör giriş sıcaklığı (T_1), kompresör verimi (η_k), yanma verimi (η_{yo}), türbin giriş sıcaklığı (T_3), yakma havası ön ısıtma atık ısı değiştirgeci verimleri ve iş akışkanı debileridir. Bu çalışmada, ISO koşullarında (15°C ortam sıcaklığı ve %65 bağıl nem) 180 MW_{el} net güçte elektrik üreten, basit çevrimli bir gaz türbini ele alınmıştır. Çevrim sisteminin oluşturulması, tasarımı ve ilgili optimizasyonu için havanın kompresör girişinde sıcaklığı, nemi ve basıncı, gaz debileri, kompresör verimi (η_k), yanma verimi (η_{yo}), gaz türbinine giriş sıcaklığı (T_3), türbin verimi (η_t), türbin – jeneratör

çifti mekanik verimi (η_m), iç tüketim verimi (η_{it}), trafo verimi (η_{tr}) vb. verilerin belirlenmesi gerekmektedir.

Türbin giriş sıcaklığı, günümüz kanat soğutma teknolojisi dikkate alınarak, 1370°C, santralin kurulacağı bölgedeki hava sıcaklığı, basıncı ve nemi ise Ankara ili için sırasıyla 15°C, 0.904 bar ve %60 olarak alınmıştır. Kompresör, yanma ve çevrim ısı verimleri sırasıyla $\eta_k = \%86$, $\eta_{VO} = \%99$, $\eta = \%37$ olarak seçilmiştir. Optimum kompresör sıkıştırma oranının belirlenebilmesi için, izentropik kompresör sıkıştırma ve türbin genleşme işleri, kompresör ve türbin giriş sıcaklıkları üzerinden kompresör sıkıştırma oranının fonksiyonu olarak belirlenip, bunların çevrim verimi eşitliğine (Eş. 7) konulmasıyla, çevrim verimini maksimum düzeye çıkaracak sıkıştırma oranının ($r_{p,opt}$) hesaplanması gerekir [12-14]. Bunun için T_1 , T_3 ve r_p ye bağlı olarak belirlenen çevrim verim kolerasyonunun (Eş. 4) r_p 'ye göre türevi alınıp, bunun sıfıra eşit olduğu (maksimum verim, optimum sıkıştırma oranı) koşulundan, optimum sıkıştırma oranı eşitliği aşağıdaki gibi elde edilir [14]. Bu çalışmada sıkıştırma oranı 18 olarak alınmıştır.

$$r_{p,opt} = \left(\frac{C_{p,h} T_1 \left(\frac{k_h - 1}{k_h} \right)}{C_{p,g} \eta_{mek,k} \eta_k \eta_t T_3 \left(\frac{(1 + \beta_1)^{\frac{k_g - 1}{k_g}}}{(1 - \beta_2)^{\frac{k_g - 1}{k_g}}} \right)} \right)^{\frac{1}{\frac{1 - 2k_g - 1}{k_g} \frac{1}{k_h}}} \quad (10)$$

Tasarlanacak sistemin Ankara ve Adana iklim koşullarındaki dinamikleri belirlenecek ve aynı zamanda tasarlanan sistemin Ankara iklim koşullarında ve Adana topografisi varsayımı ile karşılaştırılması yapılacaktır. Kompresör girişinde nemlendirme uygulaması ile çevre sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına düşürülerek, santralin toplam verimine etkisi incelenecektir. Sistemin kurulmasının ön görüldüğü Ankara ve Adana yöreleri ile ilgili, metrolojik ve topografik koşullar Tablo 1'de verilmiştir.

Sistem tasarımında kullanılacak olan yanma gazı türbin sıcaklığı, kompresör adyabatik verimi, türbin adyabatik verimi ve mekanik verimler Tablo 2'de verilmiştir.

Toplam yakıt tüketimi, çevrimin net veriminin ve net elektrik üretiminin bulunması ile Eş.11 kullanılarak hesaplanabilir. Burada m_y [kg/s] birimiyle yakıtın kütleli debisini, H_u [kJ/kg], yakıtın alt ısı değerini ve P_{el-net} [kW] birimiyle net elektrik üretimini ifade etmektedir.

$$P_{el-net} = \dot{m}_y \cdot H_u \cdot \eta_{GT} \quad (11)$$

Tablo 1. Ankara ve Adana bölgeleri için ortalama çevre sıcaklığı ve basınç değerleri (Average ambient temperature and pressure values for Ankara and Adana regions)

Veriler	Sembol	Birim	Değer
Ankara'da kompresör hava giriş sıcaklığı	$T_{1Ankara}$	°C	15
Ankara'da kompresör hava giriş basıncı	$P_{1Ankara}$	bar	0.9044
Adana'da kompresör hava giriş sıcaklığı	T_{1Adana}	°C	30
Adana'da kompresör hava giriş basıncı	P_{1Adana}	bar	1.005

Kurulması düşünülen santralin, kompresör girişine su püskürtülerek nemlendirilme sistemi uygulanmaması durumunda, her iki bölge için ısı performans hesapları (ısı verim, elektrik üretim kapasitesi, yakıt tüketimi vb.) yukarıdaki eşitlikler kullanılarak yapılmış ve yük faktörünün, $F_y = 0.8$ olması durumu için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 2. Sistem yapısı ve ilgili diğer veriler (System structure and other related inputs)

Veriler	Sembol	Birim	Değer
Yanma gazı türbin giriş sıcaklığı	T_3	°C	1370
Kompresör adyabatik verimi	η_k	-	0,86
Türbin adyabatik verimi	η_t	-	0,89
Kompresör- türbin ikilisi mekanik verimi	$\eta_{mek,k}$	-	0,99

Tablo 3'te Ankara'da kurulacak sistem için nemlendirici uygulanması ve uygulanmaması durumlarında verim, yıllık elektrik üretimi ve yıllık yakıt tüketimi değerleri gösterilmiştir. Nemlendirici uygulamasıyla elektrik üretimindeki net artış 14.72 GWh/yıl, yakıt tüketimindeki net artış ise 3689.7 t/yıl olarak bulunmuştur. Tablo 4'te ise, Ankara meteorolojik koşullarında ve Adana topografisi varsayımı ile nemlendirici ve nemlendiricisiz uygulamaların sonuçları gösterilmiştir. Buna göre, nemlendirici uygulaması ile net elektrik üretimindeki artış 16.12 GWh/yıl ve yakıt tüketimindeki net artış ise 3973.5 t/yıl olarak bulunmuştur. Tablo 5'te ise tasarlanan sistemin Adana'da uygulanması ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre, elektrik üretimindeki net artış 30.84 GWh/yıl ve yakıt tüketimindeki net artış, 5763.2 t/yıl olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Tasarlanan sistemin Ankara’da uygulanması (Application of the designed system in Ankara)

Nemlendiricili				Nemlendiricisiz			
Veri	Sembol	Birim	Değer	Veri	Sembol	Birim	Değer
Net gaz türbini verimi	η_{GT-net}	%	36.49	Net gaz türbini verimi	η_{GT-net}	%	36.5
Net yıllık elektrik üretimi	P_{el-net}	GWh/yıl	1147.91	Net yıllık elektrik üretimi	P_{el-net}	GWh/yıl	1133.19
Yıllık yakıt tüketimi	YYT	t/yıl	275309.2	Yıllık yakıt tüketimi	YYT	t/yıl	271619.5

Tablo 4. Tasarlanan sistemin Ankara meteorolojik koşullarında ve Adana topografisi varsayımı ile uygulanması (Application of the designed system with the meteorologic conditions of Ankara and assumption of the topographic conditions of Adana)

Nemlendiricili				Nemlendiricisiz			
Veri	Sembol	Birim	Değer	Veri	Sembol	Birim	Değer
Net gaz türbini verimi	η_{GT-net}	%	36.56	Net gaz türbini verimi	η_{GT-net}	%	36.57
Net yıllık elektrik üretimi	P_{el-net}	GWh/yıl	1278.96	Net yıllık elektrik üretimi	P_{el-net}	GWh/yıl	1262.84
Yıllık yakıt tüketimi	YYT	t/yıl	306246	Yıllık yakıt tüketimi	YYT	t/yıl	302272.5

Kompresör girişinde yakma havasına su püskürtülmüştür. Püskürtülen su ile yakma havasının sıcaklığı, yaş termometre sıcaklığına kadar soğutulmuş, diğer taraftan ise ilave olan su buharı ile iş akışkanın havanın kütleli debisi artmıştır (Tablo 6,7). Kompresör hava giriş sıcaklığının azalması ile özgül kompresör işi (kJ/kg) azalmakta (Eş.2), diğer taraftan artan debi nedeni ile toplam kompresör işi ise artmaktadır. Ortam sıcaklığı ve basıncının değiştiği üç duruma göre nemlendiricisiz ve nemlendiricili uygulama sonuçları Tablo 6 ve 7’de verilmiştir.

Şekil 4’te nemlendiricisiz uygulamanın Adana, varsayılan Ankara ve Ankara’da uygulanması ile elde edilen sonuçların grafiksel gösterimi verilmiştir.

Şekil 5’te nemlendiricili uygulamanın Adana, varsayılan Ankara ve Ankara’da uygulanması ile elde edilen sonuçların grafiksel gösterimi verilmiştir.

Aynı gaz çevrim ısıl – güç santralının Ankara koşullarında, Ankara metrolojik koşulları ve varsayılan Adana topografik koşullarında ve Adana koşullarında kurulup işletilmesi durumunda elektrik

üretiminde, santral veriminde ve yakıt tüketimindeki artışlar, yıllık elektrik üretimleri ve yakıt tüketimleri ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir. Birim elektrik satış fiyatı 0.228 [TL/kWh], birim doğalgaz alım fiyatı ise 0.71 [TL/kg. DG] alınmıştır. Nemlendirme sisteminin ilk yatırım maliyeti 0.9×10^6 TL olarak hesaplanmıştır. Sistemin geri ödeme süresinin çok kısa çıkacağı öngörüsü ile nemlendirme sistemine ait işletme ve bakım giderleri bu kapsamda ele alınmamıştır. Geri ödeme süresi, bir yatırımın değerlendirilmesinde en basit yol olup paranın zaman değerini göz önüne almayan ekonomik analiz yöntemidir. Buna karşın bu çalışmada sadece geri ödeme süresinin bulunması ile yatırımın genel durumu hakkında bilgi edinilecektir. Geri ödeme süresi,

$$GÖS = \text{yatırım maliyeti} / \text{yıllık fayda} \quad (12)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Yatırım maliyeti TL olarak yapılacak sistem maliyetini, yıllık fayda ise TL/yıl olarak bu yatırım ile yılda yapılacak faydayı göstermektedir. Nemlendirici uygulaması ile illere göre elektrik üretimi ve yakıt tüketiminde artış

Tablo 5. Tasarlanan sistemin Adana’da uygulanması (Application of the designed system in Adana)

Nemlendiricili				Nemlendiricisiz			
Veri	Sembol	Birim	Değer	Veri	Sembol	Birim	Değer
Net gaz türbini verimi	η_{GT-net}	%	35.92	Net gaz türbini verimi	η_{GT-net}	%	35.7
Net yıllık elektrik üretimi	P_{el-net}	GWh/yıl	1168.23	Net yıllık elektrik üretimi	P_{el-net}	GWh/yıl	1137.39
Yıllık yakıt tüketimi	YYT	t/yıl	284675.4	Yıllık yakıt tüketimi	YYT	t/yıl	278912,2

Tablo 6. Nemlendiricisiz gaz türbininin Ankara ve Adana koşullarındaki performansı (The performance of the gas turbine in the conditions of Ankara and Adana without fogging)

Seçilen Yer	Rakım [m]	Dış hava sıcaklığı [°C]	Hava Bağlı Nem [%]	Hava basıncı [bar]	Nemlendiricisiz			
					Komp. Giriş Sıcaklığı [°C]	η_{GT-net} [%]	P_{el-net} [GWh/yıl]	M_Y [kg/h]
Ankara	949	15	60	0.904	15	36.5	1133.19	34452
Varsayılan Ankara	66	15	60	1.005	15	36.57	1262.84	38340
Adana	66	30	75	1.005	30	35.7	1137.39	35377

Tablo 7. Nemlendiricili gaz türbini sisteminin Ankara ve Adana koşullarındaki performansı (The performance of the gas turbine in the conditions of Ankara and Adana with fogging)

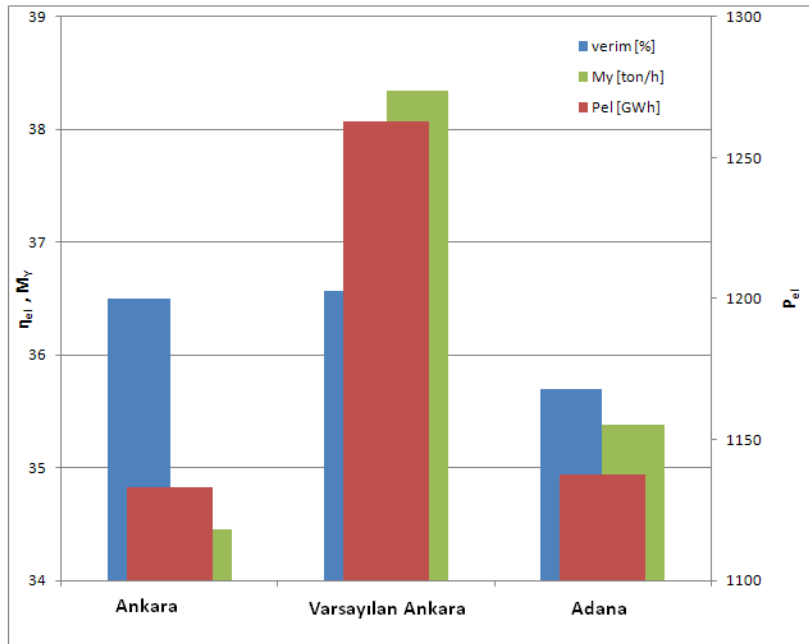
Seçilen Yer	Rakım [m]	Dış hava sıcaklığı [°C]	Hava Bağlı Nem [%]	Hava basıncı [bar]	Nemlendiricili				
					Doyma oranı [%]	Komp Giriş Sıcaklığı [°C]	η_{GT-net} [%]	P_{el-net} [GWh/yıl]	M_Y [kg/h]
Ankara	949	15	60	0.904	95	11	36.49	1148.33	34920
Varsayılan Ankara	66	15	60	1.005	95	11	36.56	1278.96	38844
Adana	66	30	75	1.005	95	26.5	35.92	1168.79	36108

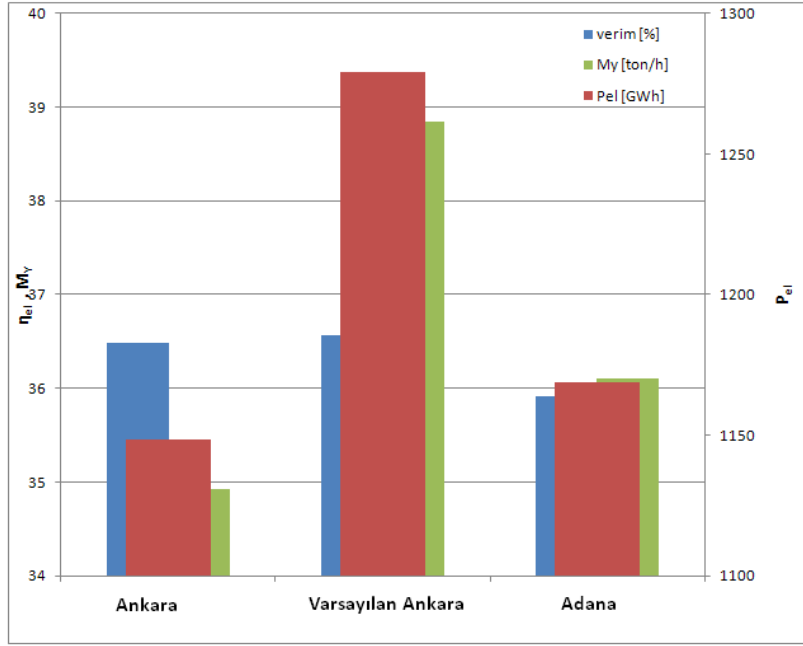
olmuştur (Tablo 6-7.). Elektrik üretimindeki artış gelir, yakıt tüketimindeki artış ise gider olarak alınarak ve yük faktörü de hesaba katılarak illere göre yıllık faydalar Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8’den de görüleceği gibi nemlendirici uygulamasıyla elde edilecek en büyük kazanç Adana ilinde olmaktadır. Ankara için geri ödeme süresi 257 gün iken Varsayılan Ankara ve Adana için geri ödeme süreleri sırasıyla 248 gün ve 81 gün olarak bulunmuştur.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada 180 MW_{el}, net elektrik üreten bir gaz çevrim santralının optimum çevrim ve sistem yapısının oluşturulması ve çevrim tasarım analizleri incelenmiştir. Söz konusu santralin Ankara metrolojik ve topografik koşullarında, Ankara metrolojik ve Adana topografik koşullarında işletmesi varsayımı ve Adana metrolojik ve topografik koşullarda, kompresör girişinde nemlendirici uygulamasız ve uygulamalı işletme senaryoları analiz edilmiş hesaplanan teknik ve ekonomik veriler

**Şekil 4.** Nemlendiricisiz gaz türbininin Ankara ve Adana koşullarındaki performansı (The performance of the gas turbine in the conditions of Ankara and Adana without fogging)



Şekil 5. Nemlendiricili gaz türbini sisteminin Ankara ve Adana koşullarındaki performansı (The performance of the gas turbine in the conditions of Ankara and Adana with fogging)

karşılaştırılmıştır. Santrale nemlendirici uygulamasıyla elde edilecek en büyük kazanç Adana ilinde olmaktadır. Ankara için geri ödeme süresi 257 gün iken Varsayılan Ankara ve Adana için geri ödeme süreleri sırasıyla 248 gün ve 81 gün olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, kompresör havası giriş neminin daha yüksek olduğu işletme koşullarında nemlendirici uygulamanın daha ekonomik olduğunu görülmektedir. Yaklaşık olarak giriş havasındaki her 10 °C'lik artış %8'lik ve rakımda her 300 m'lik artış % 3.5 güç kaybına neden olmaktadır, Adana ve Ankara illerinin sadece bu iki faktörle eşit güç üretebileceği öngörülebilir. Buna karşın, nemlendirme sistemi santral iç tüketimine büyük etki yapmaktadır ve Ankara'da düşük olan bağıl nem oranı, hava doyma noktasına gelinceye kadar sistem çalışacaktır. Adana'da nemlendirme sisteminden oluşan iç tüketimin az çıkması ile ve elektrik üretiminin yakıt sarfiyatına oranının Ankaraya göre daha fazla çıkması ile sistemin geri ödeme süresi Adana şartlarında daha az bulunmuştur.

Tablo 8. Aynı ısıl – güç santralinin Ankara ve Adana'da kurulup işletilmesi durumunda sağlanan performans iyileşmeleri ve geri ödeme süreleri (GÖS) (Performance enhancement of installation of same gas turbine powerplant in Adana and Ankara and payback periods)

	Nemlendiricili Kazanç [TL/yıl]	Nemlendiricili Geri Ödeme Süresi [gün]
Ankara	1.12x10 ⁶	257
Varsayılan Ankara	1.16x10 ⁶	248
Adana	3.52x10 ⁶	81

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

GT	Gaz türbini
BIG	Bileşik-ısı güç
KÇ	Kombine çevrim
K	Kompresör
T	Türbin
YO	Yanma odası
HÖİ	Hava ön ısıtıcı
YYT	Yıllık yakıt tüketimi
GGO	Gelir-gider karşılaştırma oranı
YEÜ	Yıllık Elektrik Üretimi
$w_{k,s}$	Kompresör özgül işi, [kJ/kg]
w_k	Kompresör işi
$w_{t,s}$	Türbin özgül işi
w_t	Türbin işi
q_{yo}	Yanma odası özgül ısı aktarımı [kJ/kg]
η_k	Kompresör verimi
η_t	Türbin verimi
η	Çevrim verimi
w_{net}	Net iş
η_{GT-net}	Gaz türbin net verimi
η_j	Jeneratör verimi
η_{yo}	Yanma odası verimi
η_{it}	İç tüketim verimi
η_{tr}	Trafo verimi
η_m	Mekanik verimi
r_p	Sıkıştırma oranı
r_{p-opt}	Optimum sıkıştırma oranı
k	İncelenen gaz türbini sistemi için
ısıl değer oranı	
H_u	Yakıtın alt ısı değeri [kcal/kg]
\dot{m}_y	Yakıt debisi [kg/s]
P_{el-net}	Net elektrik üretimi

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kehlhofer, R., ‘‘ Combined-Cycle Gas & Steam Power Plants’’, *Penn Well Publishing Company* (1997).
2. Alhazmy, M.M., Najjar, Y.S.H., ‘‘ Augmentation of Gas Turbine Performance Using Air Coolers’’, *Applied Thermal Engineering*, 24:415-429 (2004).
3. Ünver, Ü., Kılıç, M., ‘‘ Çevre Sıcaklığının Bir Kombine Çevrim Güç Santralinin Performansına Etkisi’’, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 10, Sayı 1 (2005).
4. Kakaras, E., Doukelis, A., Karellas, S., ‘‘ Compressor Intake-Air Cooling in Gas Turbine Plants’’, *Energy*, 29:2347-2358 (2004).
5. Bhargava, R., Meher-Homji, C.B., ‘‘ Parametric Analysis of Existing Gas Turbines With Inlet Evaporative and Overspray Fogging’’, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127 / 157 (2005).
6. Alhazmy, M.M., Jassim, R.K., Zaki, G.M., ‘‘ Performance Enhancement of Gas Turbine by Inlet Air-cooling in Hot and Humid Climates’’, *International Journal of Energy Research*, 30:777-797 (2006).
7. Jones, C., Jacobs, J.A., ‘‘ Economic and Technical Considerations for Combined – Cycle Performance-Enhancement Options’’, *GE Power Systems*, GER-4200 (2006).
8. Kim, K.H., Perez-Blanco, H., ‘‘ Potential of Regenerative Gas- turbine Systems with High Fogging Compression’’, *Applied Energy*, 84:16-28 (2007).
9. Zadpoor, A.A., Golshan, A.H., ‘‘ Performance Improvement of a Gas Turbine Cycle by Using a Desiccant-Based Evaporative Cooling System’’, *Energy*, 31:2652-2664 (2006).
10. Kakaras, E., Doukelis, A., ‘‘ Inlet Air Cooling Methods for Gas Turbine Based Power Plants’’, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 128 / 317 (2006).
11. Dawoud, B., Zurigat, Y.H., E., Bortmany, J., ‘‘ Thermodynamic Assessment of Power Requirements and Impact of Different Gas-Turbine Inlet Air Cooling Techniques at Two Different Locations in Oman’’, *Applied Thermal Engineering*, 25:1579-1598 (2005).
12. Durmaz A., Türkiye’de Enerji ve Ar-Ge Çalışmaları, www.gecer.gazi.edu.tr, 2008.
13. Rahim, M., Durmaz, A., ‘‘Doğalgaz ile Çalışan Bir Kombine Çevrim Santralının Tasarımı, Optimizasyonu ve Enerji Verimliliği’’, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara (2008)
14. Ayşegül A., Durmaz, A., ‘‘Hidrojen Yakıtlı, Çok Amaçlı bir Bileşik ısı-Güç Santrali Tasarımı Teknik ve Ekonomik Analizleri’’, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara (2006).
15. Çengel, A.Y., Boles, M.A., ‘‘Thermodynamics: An Engineering Approach’’, *Mc GrawHill*, 2006.

