

EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF COGENERATION SYSTEM

Süleyman Hakan SEVİLGEN*

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Geliş/Received: 04.05.2004 Kabul/Accepted: 12.10.2004

ABSTRACT

Exergy is defined as theoretical maximum work that can be acquired from a system. Technical parameters, obtained from exergy analysis which aims to maximize exergy efficiency or total exergy value, are usually either impossible to implement physically or economically unfeasible. Thus, economical factors, for instance cost, should be kept in consideration during evaluation of the results of exergy analysis. Such an analysis is known as exergoeconomic analysis. With using exergoeconomic analysis, it is determined unit exergetic cost of system and effecting parameters of system these cost.

In this study, Exergoeconomic analysis was applied the cogeneration system with selected parameters which were compressor pressure ratio, regeneretaion efficiency and pinch point of HRSG. For obtaining minimum specific exergetic cost of products, the system was analyzed. It was obtained optimum parameters of systems and compared with technical parameters which at maximum exergetic efficiency and total exergy states

Keywords: Exergy analysis, exergoeconomic analysis, exergetic cost, cogeneration system.

KOJENERASYON SİSTEMİNİN EKSERJOEKONOMİK ANALİZİ

ÖZET

Enerji üretim sistemleri için çok kullanışlı yöntemlerden biri ekserji analizidir. Ekserji analizinde salt termodinamik açıdan değerlendirme yapılmakta ve sonuçların ekonomik olup olmadığı dikkate alınmamaktadır. Bu yüzden elde edilen neticeler teorik olarak doğru olsa bile her zaman gerçeği yansıtmamaktadır. Dolayısıyla analizde maliyet faktörü de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu analiz yöntemi ekserjoekonomik analiz olarak tanımlanmaktadır. Ekserjoekonomik analizde, sistemde kullanılan komponentlere ekserji analizi yapıp daha sonra aynı komponentler için maliyet denklemleri kurularak herbirinin birim ürün ekserji maliyetleri belirlenir. En sonunda da sistemin birim ürün ekserji maliyeti bulunarak etki eden parametreler tespit edilir.

Bu çalışmada gaztürbin gruplu kojenerasyon tesisine ekserjoekonomik analiz uygulanmıştır. Analizde kompresör basınç oranı, rejeneratör verimi ve atık ısı kazanı minimum sıcaklık farkı parametre olarak alınmıştır. Parametrelerin, teknik performans kriterleri olarak seçilen ekserji verimi ve net iş ile buharın ekserji toplamı olarak tanımlanan toplam ekserji üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca parametrelerin tesisin birim ürün maliyetlerine etkileri incelenmiştir. Her bir teknik kriteri maksimum yapan parametre değerleri bulunmuş ve tesisin ürünleri olan elektrik ve ısının birim ekserji maliyetlerini minimum yapan parametre değerleri ile karşılaştırılarak farklılığı belirlenmiştir

Anahtar Sözcükler: Ekserji analizi, ekserjoekonomik analiz, ekserji maliyeti, kojenerasyon tesisi.

* e-mail:suleyman@yildiz.edu.tr, Tel: (0212) 259 70 70 / 2727

Simge		Alt indis	
Prc	basınç oranı	a	hava
\dot{E}^f	fiziksel ekserji (MW)	ü	ürün
nr	rejeneratör verimi	b	buhar
e^{kim}	standart kimyasal ekserji (MW)	y	yakıt
M	mol kütlesi	f	su
\dot{m}	kütleli debi (kg/s)	w	iş
x	mol fraksiyonu	o	ortalama
\dot{E}^{kim}	kimyasal ekserji (MW)	R	rejeneratör
Td	doyma sıcaklığı (K)	K	kompresör
DTp	minimum sıcaklık farkı	T	türbin
w_{net}	net iş (MW)	A	atık ısı kazanı
\dot{E}_{top}	toplam ekserji (MW)	Y	yanma odası
ϵ	ekserji verimi		
c	ekserji maliyeti (Mills/kWh)		
K	komponent maliyeti (Mills/MW)		
\dot{M}	maliyet akışı (Mills/h)		

1.GİRİŞ

Elektrik ve ısı enerjisinin hayatımızda önemli bir yeri vardır. Sınırlı doğal kaynaklardan elde edilen bu enerjiler, talep artışına bağlı olarak daha değerli hale gelmektedir. Bu enerjilerin değerlendirilmesinde son kullanım noktasındaki makinelerin verimi ne kadar önemli ise elde edilirken ki enerji dönüşümleri de o kadar önemlidir. Kullanılan yakıtın enerjisinin, elde edilmek istenen enerji türüne en yüksek oranda dönüştürülmesi istenir. Çevre faktörleri ve dönüşümü gerçekleştiren sistemlerin verimleri düşünüldüğünde yakıtın enerjisinin tamamının mekanik ya da ısı enerjisine dönüştürülmesi imkansızdır. Dolayısıyla enerji dönüşümünün % 100 olması mümkün değildir. Bu durumda yakıttan elde edilebilecek maksimum faydalı enerji (ekserji) sınırlıdır [1]. Bütün enerji dönüşümleri tersinmezliklerin sebep olduğu bu sınırlar dahilinde gerçekleşmektedir. Enerji üretim sistemlerinin ve bu sistemleri oluşturan komponentlerin (elemanların) bu sınırlara göre değerlendirilmesi yapılmalıdır. Bu şekilde yapılan analiz yöntemi ekserji analizi olarak adlandırılmıştır. Ekserji analizi ile sistem yada komponentlerin ekserji bozunumu ya da ekserji kaybindan kaynaklanan tersinmezliklerin miktarları ve yerleri tespit edilir [1]. Benzer sistemler karşılaştırılırken enerji yönünden karşılaştırma yeterli olmayacaktır. Çünkü enerji analizinde, çevre faktörleri tamamen göz ardı edilmektedir. Oysa sistemin etkileşimde olduğu çevre, çalışma şartlarını değiştirmektedir. Bu sebeple ekserji analizi neticesinde elde edilen ekserji verimi yönünden sistemlerin karşılaştırılması daha yerinde olacaktır. Ekserji analizinde sistem veriminin artırılması hedeflenir. Ekserji veriminin artırılabilmesi için tersinmezliklerin azaltılması gerekmektedir. Analiz neticesinde belirlenen tersinmezliklerin azaltılabilmesi için alınabilecek tedbirler belirlenir. Bu tedbirler çerçevesinde verim mümkün olan en yüksek değere çıkartılır.

Enerji kullanımında birim fiyat oldukça önemlidir. Fiyatı belirleyen en önemli faktörler üretim tesisi ve kullanılan yakıttır. Üretim tesisinin verimi ne kadar yüksek olursa kullanılan yakıttan o kadar çok enerji üretilebilir. Dolayısıyla enerjinin birim maliyeti de o kadar azaltılabilir. Ekserji analizi sayesinde sistemdeki tersinmezliklerin yerleri belirlenip bunların azaltılması ile verimi artırmak mümkündür. Sisteme ilave edilecek yeni komponentlerle ya da mevcut komponentlerin ekserji verimleri artırılarak sistemin verimi artırılabilir. Fakat bu ilave komponentlerin veya modifiye edilen komponentlerin bir maliyeti vardır. Bu da birim enerji maliyetini etkiler. Birim ürün maliyetini artırmayacak veya azaltacak ilave tedbirler alınmalıdır. Bu şekilde belki maksimum ekserji verimi sağlanamaz, ama hem verimin mümkün olan en yüksek değeri, hem de maliyetin mümkün olan en düşük değeri belirlenir. Bu analiz yöntemi de

ekserjoekonomik analiz olarak adlandırılmıştır. Ayrıca enerji üretim tesisinden çift ürün elde ediliyorsa (elektrik ve ısı, bir başka deyişle kojenerasyon) bunların birim maliyetlerini belirlemek oldukça zor ve karmaşıktır [2]. Çünkü hem yakıt maliyetinin hem de komponent maliyetlerinin ürünlerin maliyetlerine dağıtılması gerekmektedir. Ekserjileri bakımından değerlendirilip buradan maliyete geçmek ve birim maliyetlerini hesaplamak daha kolaydır. Dolayısıyla özellikle kojenerasyon ve diğer enerji üretim tesislerinde de ekserjoekonomik analizle birim ürün maliyetini (ekserji maliyeti) belirlemek daha doğru olacaktır [3]. Ekserji maliyeti kavramı ilk olarak Valero tarafından ortaya atılmıştır [4]. Bu kavram içerisinde yakıt ile ekserji bozunumu ve ürün maliyeti ile ekserji bozunumu arasındaki ilişki irdelenmiştir [5]. Ekserji maliyet yöntemi kullanılarak sistem tersinmezlikleri ve miktarları ile bunların ürün maliyetine etkileri belirlenebilir [6]. Bu sayede yanlış çalışma şartlarının yakıt tüketimine etkisi analiz edilebilir [6].

Sevilgen, Basit gaz türbinli tesisten başlayarak çeşitli komponentler ilavesi ile kombine çevrim tesisi oluşturmuş ve bütün tesislerin ekserjoekonomik analizi ile optimum çalışma parametrelerini tesbit etmiştir [7]. Bu çalışmada ise ekserjoekonominin temelleri verilmiş, amaç fonksiyon olarak birim ekserji maliyet minimizasyonu alınarak ekserjoekonomik analiz yapılmıştır. Analiz için gaz türbinli kojenerasyon tesisinin matematik modeli oluşturulmuş, sistem elemanlarına ekserji analizi ve ekserjoekonomik analiz uygulanmıştır. Analizde kompresör basınç oranı, rejeneratör verimi, atık ısı kazanındaki minimum sıcaklık farkı (DTp) parametre alınmıştır. Kompresör basınç oranı 2'den 30'a, rejeneratör verimi 0.4 den 0.9'a, minimum sıcaklık farkı 10' dan 90'a kadar değiştirilerek, birim ürün ekserji maliyetine etkileri incelenmiştir. Birim ekserji maliyetini minimum yapan optimum parametre değerleri belirlenmiştir.

2. EKSERJOEKONOMİK ANALİZ

Kojenerasyon sistemleri egzoz gazlarının sahip olduğu ekserjiyi değerlendirerek elektiriğin yanında ikinci bir ürün olarak buhar elde etmektedir. Böylece tesisin ekserji verimi artmakta aynı zamanda ekonomik değeri olan buhar üretilmektedir. Fakat bu ikinci ürünün maliyetinin belirlenmesi oldukça zordur. Bu iki ürün arasında maliyet dağılımı yapabilmek için ekserji maliyet yöntemi kullanmak çok uygundur [8]. Çünkü her ikisine de ekserji açısından bakıldığında karşılaştırmak mümkündür. Bu bölümde, hem elektrik hem de buharın birim ekserji maliyetleri edilecektir. Ayrıca, ikisinin ağırlıklı ortalaması olacak şekilde ortalama maliyet tanımlanarak değeri bulunacaktır.

Kojenerasyon sistemi olarak rejeneratörlü gaz türbin grubu ve atık ısı kazanından oluşan bir sistem alınmıştır (Şekil 1). Tesisin maksimum sıcaklığı 1500 K, kompresör ve türbin izentropik verimleri 0.86 alınmıştır. Çevre sıcaklığı 298 K, basıncı 1.013 bar ve kimyasal kompozisyonu %77.48 N₂, %20.59 O₂, %0.03 CO₂, %1.19 H₂O alınmıştır. Sisteme önce ekserji analizi yapılarak akış esnasındaki her bir durumun ekserji değerleri belirlenmiş daha sonrada maliyet analizi yapılarak ekserjoekonomik analiz tamamlanmış ve birim ürün maliyetleri belirlenmiştir [7].

Sistemin ekserji analizi yapılırken, başlangıç noktasından itibaren basamak basamak akış esnasındaki her bir durum için sahip olduğu termodinamik özelliklerden (T, P, V) giderek entalpi ve entropi değerleri hesaplanmıştır. Sistemde iş akışkanı olarak hava, yanma ürünleri ve yakıt vardır. İdeal gaz kabulü yapılan hava, yanma ürünleri ve yakıt olarak kullanılan metan için sıcaklığa bağlı denklemlerle h, cp ve s değerleri hesaplanır [9]. Akışkanı oluşturan saf maddelerin bu değerleri mol fraksiyonları ile çarpılarak her bir durumun entalpi ve entropisi bulunur. İş yapan akışkan saf madde değilse, her durumun termodinamik özelliklerinin yanında kimyasal kompozisyonunun da tespit edilmesi gereklidir [9].

Hesaplanan ekserji değeri ile beraber ekonomik analiz yapıp ürün maliyet denklemleri elde edilir. Bu amaçla, sisteme ait her bir elemana ekserji maliyet denge denklemi uygulanmıştır. Sistemin ekserjoekonomik analizi yapılırken iş yapan akışkanın sisteme girdiği noktadan hesaplamalara başlanır. Çünkü, bir elemanın çıktısı diğer elemanın girdisidir. Her bir elemandaki

maliyet denge denkleminde, bilinmeyen sayısından bir eksik olacak şekilde gerekli kabuller yapılır. Böylece bir sonraki elemana giriş maliyeti de hesaplanmış olur. Sırayla bütün elemanlara bu hesap tarzı uygulanırsa en son ürüne ait maliyet de elde edilir [9].

2.1. Ekserji Analizi

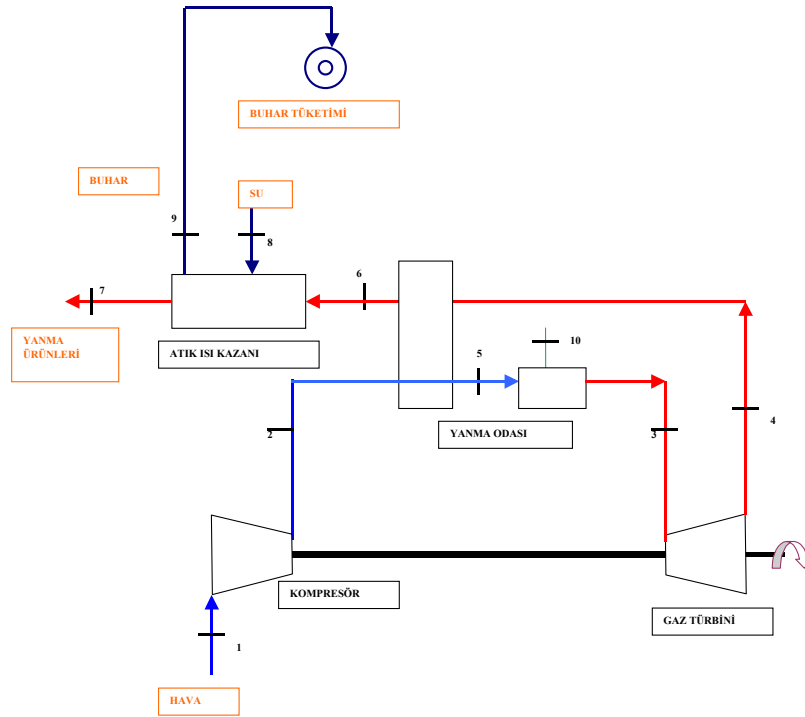
Analizde fiziksel ve kimyasal ekserjiler hesaplanmış, fiziksel ekserji içerisindeki kinetik ve potansiyel ekserji miktarları çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir.

Kompresöre girişten yanma odasına girişe kadar akışkan havadır (1 ve 2 durumları). Bu durumlarda havanın kimyasal kompozisyonu çevrenin kompozisyonuyla aynı olduğu için kimyasal ekserjileri sıfırdır. Giriş havası çevre şartlarında olduğundan fiziksel ekserjisi de sıfırdır. Kompresör çıkışında hava T_2 , P_2 şartlarında olup P_2 değeri kompresör basınç oranına (Prc) bağlı olarak hesaplanır.

$$Prc = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

2 numaralı denklem i gazına ait ve Pref =1 bar için entropi değerini vermektedir. Havayı oluşturan bütün gazlar için s değerleri hesaplanıp mol fraksiyonları ile çarpılırsa s_2 değeri elde edilir [9].

$$s_i(T_2, x_i, P_2) = s_i^0(T_2) - \bar{R} \cdot \ln \frac{x_i \cdot P_2}{P_{ref}} \quad (\text{kJ/kgK}) \quad (2)$$



Şekil 1. Kojenerasyon tesisi

s_2 değeri 3 numaralı denklemde yerine yazılarak 2 durumunun fiziksel ekserjisi hesaplanır.

$$\dot{E}_i^f = \dot{m}_i \frac{h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)}{M_a} \quad (\text{MW}) \quad (3)$$

Tesiste yanma odası giriş sıcaklığı rejeneratörden havanın çıkış sıcaklığıdır. Rejeneratör verimine bağlı olarak yanma odası giriş sıcaklığı artmakta olup h_5 'e bağlı olarak T_5 bulunabilir. Bu sıcaklık değerine olarak, 2 numaralı denklemden entropisi ve 3 numaralı denklemden de fiziksel ekserjisi hesaplanır.

$$nr = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad (4)$$

Yanma odası çıkışından atmosfere atılana kadar akışkan egzoz gazlarıdır. Bu noktalara ait h_0 ve s_0 değerleri hesaplanırken egzoz gazlarının çevre şartlarına getirilmesiyle bulunan mol fraksiyonları kullanılır.

3 durumu yanma odası çıkışı olup entropi değeri 2 numaralı denklemden hesaplanır ve bulunan s_3 değeri 3 numaralı denklemden yerine yazılarak fiziksel ekserjisi hesaplanır. Bu durumun kimyasal ekserjisi hesaplanırken egzoz gazlarının mol fraksiyonu ve bu gazların standart kimyasal ekserji değerleri bulunup 5 numaralı denklemden yerine yazılır [7]. Daha sonrada 6 numaralı denklem ile kimyasal ekserji değeri hesaplanır.

$$e_i^{\text{Kim}} = \sum x_k \cdot e_k^{\text{Kim}} + \bar{R}T_0 \sum x_k \cdot \ln x_k \quad (5)$$

$$\dot{E}_i^{\text{Kim}} = \dot{m}_i \cdot \frac{e_i^{\text{Kim}}}{M_{\bar{u}}} \quad (\text{MW}) \quad (6)$$

Türbin çıkışında (4 durumu) sıcaklık değerine bağlı olarak 3 durumu için yapılan hesap tarzı ile fiziksel ekserji değeri bulunur. Akışkanın mol fraksiyonu 3 durumu ile aynı olduğundan kimyasal ekserjileri de eşittir. Kompresör ve türbin çıkış şartları için hava ön ısıtıcısında enerji denklemleri yazılarak, hava ön ısıtıcısından egzoz gazlarının çıkış sıcaklığı (T_6) hesaplanabilir.

$$0 = Q - W + n_a(h_2 - h_5) + n_{\bar{u}}(h_4 - h_6) \quad (7)$$

T_6 sıcaklık değerine bağlı olarak 3 durumuna benzer şekilde fiziksel ve kimyasal ekserjisi hesaplanır.

Yakıtın tamamen metandan oluştuğu ve ideal gaz kabulü ile yakıt fiziksel ekserjisi hesaplanmıştır. $T_{10} = T_0$ olduğu için 8 numaralı denklem 9 numaralı denklem haline dönüşür. Yakıtın fiziksel ekserjisi bu denklem yardımı ile hesaplanır.

$$\dot{E}_{10}^f = \dot{m}_{10} [h_{10} - h_0 - T_0(s_{10} - s_0)] \quad (\text{MW}) \quad (8)$$

$$\dot{E}_{10}^f = \dot{m}_{10} R T_0 \ln \frac{P_{10}}{P_0} \quad (\text{MW}) \quad (9)$$

Bu durumun kimyasal ekserjisi için yakıtın standart kimyasal ekserjisi tablolardan alınmıştır [9].

$$\dot{E}_{10}^{\text{Kim}} = \dot{m}_{10} \frac{e_{10}^{\text{Kim}}}{M_{\bar{u}}} \quad (\text{MW}) \quad (10)$$

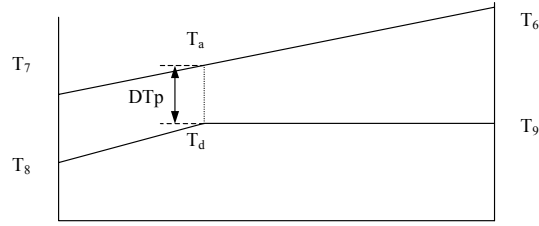
Atık ısı kazanına giren egzoz gazı şartları bilinmektedir. Kazanda %5 basınç kaybı kabul edilmiştir. Çevre şartlarında kazana giren sudan doymuş kuru buhar elde edilmektedir. Elde edilen buharın 20 bar basınçta olduğu kabul edildiğinde, bu basınca karşılık doyma sıcaklığı (T_d) bulunabilir. Minimum sıcaklık farkı (DTp) bu değere ilave edilerek T_a sıcaklığı hesaplanabilir.

$$T_a = T_d + DTp \quad (\text{K}) \quad (11)$$

Buhar kütlesi, T_a sıcaklığına bağlı olarak yazılan h_a için enerji dengesi ile bulunur.

$$m_b = \frac{(m_a + m_y)(h_6 - h_a)}{h_9 - h_f} \quad (\text{kg/s}) \quad (12)$$

9 durumu 20 bar basınçta doymuş kuru buhar ve 8 durumu çevre şartlarında suyun atık ısı kazanına giriş şartlarıdır. Atık ısı kazanında enerji dengesi yazılarak, egzoz gazlarının atık ısı kazanından çıkış şartları (7 durumu) bulunur.



Şekil 2. Atık ısı kazanı sıcaklık diyagramı

$$0 = Q - W + n_{\dot{u}}(h_6 - h_7) + m_b(h_8 - h_9) \quad (13)$$

7 durumunda akışkan egzoz gazı ve sıcaklığı da bilindiği için ekserjisi 3 durumuna benzer şekilde hesaplanabilir.

Sistemden elde edilen buhar 20 bar basınçta. Bu basınç için doymuş kuru buhar tablolarından h_9 ve s_9 , çevre için ise h_0 ve s_0 değerleri alınmıştır.

$$\dot{E}_9^f = \dot{m}_9 [h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0)] \quad (\text{MW}) \quad (14)$$

9 durumunun kimyasal ekserjisi için suyun standart kimyasal ekserji değeri tablolardan alınır.

$$\dot{E}_9^{\text{Kim}} = \dot{m}_9 \frac{e_9^{\text{Kim}}}{M_s} \quad (\text{MW}) \quad (15)$$

8 durumu için de benzer hesap tarzı ile fiziksel ve kimyasal ekserji değerleri hesaplanır. Bu durumdaki entalpi değeri 16 numaralı denklemden bulunur.

$$h_8 = [h_{f_{298}} + v_{f_{298}}(P_{20} - P_{(T=298)})] \quad (16)$$

Sistemin bütün durumlarına ait ekserji değerleri hesaplandıktan sonra toplam ekserjisi ve ekserji verimi elde edilebilir. Tesiste çift ürün üretildiği için, ekserji verimi yazılırken buharın ekserjisi de toplam ekserjiye dahil edilmelidir.

$$\dot{E}_{\text{Top}} = \dot{W}_{\text{Net}} + (\dot{E}_9 - \dot{E}_8) \quad (\text{MW}) \quad (17)$$

Sistemin net gücü (W_{NET}) 18 numaralı denklemden elde edilebilir. Denklemden m_a hava m_f yakıtın kütleli debisidir.

$$\dot{W}_{\text{NET}} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_4 - h_3) - \dot{m}_a(h_2 - h_1) \quad (\text{MW}) \quad (18)$$

Sistemin ekserji verimi toplam ekserjinin yakıtın ekserjisine oranıdır.

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{\text{Top}}}{\dot{E}_{10}} \quad (19)$$

2.2. Maliyet Analizi

Bu bölümde, hesaplanan ekserji değerleri ile beraber ekonomik analiz yapıp ürün maliyet denklemleri elde edilecektir. Bu amaçla, sisteme ait her bir elemana ekserji maliyet denklemleri uygulanacaktır.

Bir sistemin ekserjoekonomik analizi yapılırken iş akışkanının sisteme girdiği noktadan hesaplamalara başlanır. Çünkü, bir elemanın çıktısı diğer elemanın girdisidir. Her bir elemandaki maliyet denge denkleminde, bilinmeyen sayısından bir eksik olacak şekilde gerekli kabuller yapılır. Böylece bir sonraki elemana giriş maliyeti de hesaplanmış olur. Sırayla bütün elemanlara bu hesap tarzı uygulanırsa en son ürüne ait maliyet de elde edilir [7].

Sisteme hava, su ve yakıt girer. Kompresöre giren havanın maliyeti sıfır alınmıştır. Yıllık bakım ve işletme masrafları sistem elemanlarına paylaştırılmıştır. Yatırım maliyeti hesaplarında geri dönüşüm süresi 10 yıl alınarak levelized-cost (bir değere getirilmiş maliyet)

yöntemiyle yatırım maliyeti hesaplanmıştır. Sürekli akış şartları alınıp, kompresörden başlanarak analiz yapılmıştır.

Bir elemana ait yatırım ve işletme bakım maliyeti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$K = ((\text{Yıllık yatırım maliyeti} + \text{İşletme bakım maliyeti}) / \text{Yıllık çalışma saati}) * (\text{Eleman maliyeti} / \text{Toplam maliyeti})$$

Bu hesap tarzıyla elemana o yıl için düşen maliyet payı belirlenir. Bu oran yıl boyunca sabittir [9].

Komponentlere ait yatırım maliyetleri, geometrik büyüklüklerine bağlı olarak literatürde mevcuttur [8,10].

2.2.1. Kompresör

Kompresörün girdisi hava ve iş olup ürün olarak basınçlı hava çıkmaktadır. Kompresöre maliyet denge denklemi yazılarak her durumda ekserji maliyeti (c) elde edilir. Hava atmosferden alındığı için maliyeti ihmal edilmiştir ($c_1=0$).

$$c_1\dot{E}_1 + c_w\dot{E}_K + K_k = c_2\dot{E}_2 \quad (20)$$

Kompresöre giren iş aynı zamanda ekserji olup ($w_k=E_k$) türbinde elde edilen işle aynı türden olduğu için maliyetleri (c_w) de birbirine eşittir.

$$\dot{M}_K = c_w\dot{E}_K \quad (21)$$

$$\frac{\dot{M}_K}{\dot{E}_K} = \frac{\dot{M}_T}{\dot{E}_T} \quad (22)$$

$$c_2 = \frac{K_k + \dot{M}_T \frac{\dot{E}_K}{\dot{E}_T}}{\dot{E}_2} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (23)$$

2.2.2. Rejeneratör

Rejeneratöre kompresörden çıkan hava ve türbinden çıkan egzoz gazları girmekte, 5 şartlarında hava ve 6 şartlarında egzoz gazları çıkmaktadır.

$$c_2\dot{E}_2 + c_4\dot{E}_4 + K_R = c_5\dot{E}_5 + c_6\dot{E}_6 \quad (24)$$

Burada egzoz gazlarının birim ekserji maliyeti eşit alınır.

$$\frac{\dot{M}_4}{\dot{E}_4} = \frac{\dot{M}_6}{\dot{E}_6} \quad (25)$$

$$c_5 = \frac{K_R + \dot{M}_6 \left(\frac{\dot{E}_4 - \dot{E}_6}{\dot{E}_6} \right)}{\dot{E}_5} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (26)$$

2.2.3. Yanma Odası

Yanma odasına basınçlı hava ve yakıt girmekte egzoz gazları ürün olarak çıkmaktadır. Yakıt sisteme dışarıdan alındığı için yakıt maliyeti bilinmemektedir.

$$c_5\dot{E}_5 + c_{10}\dot{E}_{10} + K_y = c_3\dot{E}_3 \quad (27)$$

$$c_3 = \frac{K_y + c_5\dot{E}_5 + c_{10}\dot{E}_{10}}{\dot{E}_3} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (28)$$

2.2.4. Türbin

Yanma odasından çıkan egzoz gazları türbinde genişleyerek iş elde edilmektedir. Bunun bir miktarı net iş olup geri kalanı ile kompresör tahrik edilmektedir ($E_T=W_{NET}$). Türbine giren ve çıkan egzoz gazlarının birim ekserji maliyetleri eşit alınmıştır. Ayrıca kompresörü tahrik eden iş ve net işin maliyeti de eşit alınmıştır.

$$\frac{\dot{M}_4}{\dot{E}_4} = \frac{\dot{M}_3}{\dot{E}_3} \quad (29)$$

$$\frac{\dot{M}_K}{\dot{E}_K} = \frac{\dot{M}_T}{\dot{E}_T} \quad (30)$$

$$c_3\dot{E}_3 + K_T = c_4\dot{E}_4 + c_W\dot{E}_K + c_W\dot{E}_T \quad (31)$$

$$c_4 = \frac{K_T + \dot{M}_5 \left(\frac{\dot{E}_4 - \dot{E}_5}{\dot{E}_5} \right)}{\left(\frac{\dot{E}_{11} + \dot{E}_{12}}{\dot{E}_{12}} \right)} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (32)$$

2.2.5. Atık Isı Kazanı

Atık ısı kazanına sıcak akışkan olarak egzoz gazları, soğuk akışkan olarak çevreden alınan su girip, buhar elde edilmektedir. Su, çevreden alındığı için maliyeti ihmal edilmiştir. Ayrıca giren ve çıkan egzoz gazlarının birim ekserji maliyeti de eşit alınmıştır.

$$c_8 = 0$$

$$\frac{\dot{M}_7}{\dot{E}_7} = \frac{\dot{M}_6}{\dot{E}_6} \quad (33)$$

$$c_6\dot{E}_6 + c_8\dot{E}_8 + K_A = c_7\dot{E}_7 + c_9\dot{E}_9 \quad (34)$$

$$c_9 = \frac{K_A + \dot{M}_6 \left(1 - \frac{\dot{E}_7}{\dot{E}_6} \right)}{\dot{E}_9} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (35)$$

2.3. Birim Ürün Maliyeti

Kojenerasyon tesisinde hem elektrik hem de buhar üretilmektedir. Bu iki ürünün maliyeti birbirinden farklıdır. Fakat ürünlerin maliyetinin nasıl olması gerektiğini belirlemek çok güçtür. Toplam maliyetin ürünlere dağıtılmasında ekserji maliyeti kavramı ön plana çıkmaktadır. Ekserji maliyeti açısından bakıldığında iki üründe aynı birime getirilmiş olur. Böylece, komponentler için yazılan denklem sistemlerinin çözülmesiyle, birim ürün maliyetleri belirlenir. Elektrik için birim ürün maliyeti 36 denkleminde, buhar için birim ürün maliyeti 37 denkleminde hesaplanabilir.

$$C_W = \frac{\left(\frac{1}{\dot{E}_T} \right) \left[K_R + K_C + K_Y + c_y\dot{E}_{10} + K_T \left(\frac{\dot{E}_6 + \dot{E}_3 - \dot{E}_4}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4} \right) \right]}{\left(\frac{\dot{E}_K + \dot{E}_T}{\dot{E}_T} \right) \left(\frac{\dot{E}_6 + \dot{E}_3 - \dot{E}_4}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4} \right)} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (36)$$

$$C_b = \frac{(C_w \dot{E}_T \left(\left[\frac{\dot{E}_T + \dot{E}_K}{\dot{E}_T} \right] - K_T \right) \left(\frac{\dot{E}_6 - \dot{E}_7}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4} \right) + K_A}{\dot{E}_9} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (37)$$

Ürünlerin sahip oldukları ekserjilere göre ağırlıklı ortalamaları alınarak ortalama birim ekserji maliyeti hesaplanabilir.

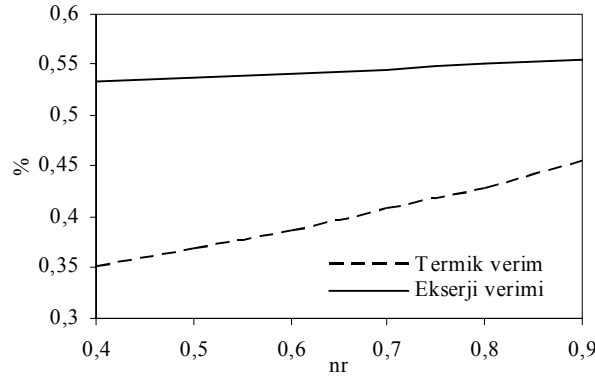
$$C_o = \frac{\dot{E}_T C_w + (\dot{E}_9 - \dot{E}_8) C_b}{\dot{E}_{Top}} \quad (\text{Mills/kWh}) \quad (38)$$

3. EKSERJOEKONOMİK ANALİZ UYGULAMASI

Kojenerasyon tesisine yapılan ekserjoekonomik analizde; basınç oranı ikiden otuza, rejeneratör verimi 0.4'den 0.9'a, minimum sıcaklık farkı 10'dan 90'a kadar değiştirilmiş ve tesisin toplam ekserjisi, ekserji verimi ve ürün maliyetleri üzerine etkileri incelenerek maliyeti minimum yapan optimum basınç oranı, rejeneratör verimi ve minimum sıcaklık farkı belirlenmiştir.

Analizde öncelikli olarak, sabit basınç oranında (Prc=10) ve sabit sıcaklık farkında (DTp=10) rejeneratör verimi ile termik ve ekserji verimlerinin, toplam ekserjinin ve güç/ısı oranının değişimleri incelenmiştir. Rejeneratör verimi arttıkça termik verim hızla artarken, ekserji verimindeki artış daha yavaş olmaktadır (Şekil 3). Dolayısıyla, rejeneratör veriminin ekserji verimine etkisi çok fazla olmamaktadır. Rejeneratör verimindeki artış, toplam ekserji değerini azaltmaktadır (Şekil 4 a). Bunun sebebi, egzoz gazlarının ekserjisinin rejeneratörde havayı ısıtmak için harcanmasıyla, atık ısı kazanına giren egzoz gazlarının ekserjisinin azalmasıdır. Dolayısıyla, rejeneratör verimi toplam ekserji değerine azaltıcı etki yapmaktadır.

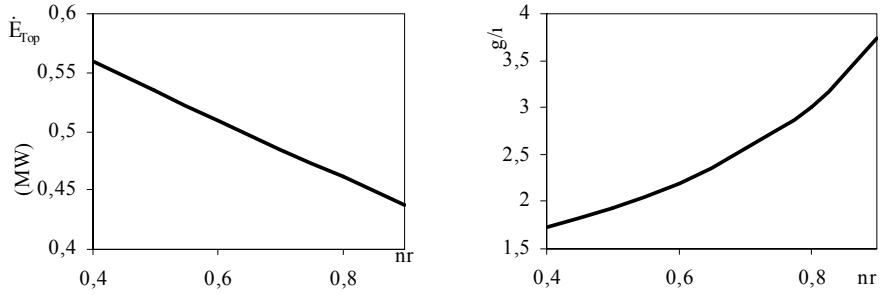
Rejeneratör verimi arttıkça güç/ısı oranı da hızla artmaktadır (Şekil 4 b). Bunun sebebi, egzoz gazlarının ekserjisinin rejeneratörde kullanımının artması ve dolayısıyla daha az buhar üretilmesidir. Sonuç olarak tesisden elde edilen güç sabit olmasına rağmen, ısıdaki azalma güç/ısı oranını artırmaktadır.



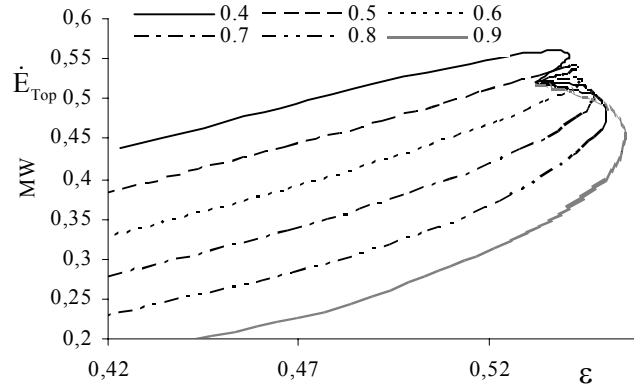
Şekil 3. Rejeneratör verimi ile termik ve ekserji verimleri değişimi

Minimum sıcaklık farkı (DTp=10) sabit ve basınç oranı değiştirilerek, çeşitli rejeneratör verimleri için ekserji verimi- toplam ekserji ilişkisi incelenmiştir (Şekil 5). Rejeneratör verimi artarken toplam ekserji azalmakta ve ekserji verimi artmakta olduğu için, aynı noktada kesişen eğriler elde edilmiştir. Kesiştikleri nokta basınç oranının 30 olduğu noktadır. Dolayısıyla, basınç oranı 30 olduğunda rejeneratörün sisteme hiç etkisi kalmamaktadır. Bunun sebebi basınç oranı artışına bağlı olarak artan rejeneratör hava tarafı giriş sıcaklığının, egzoz tarafı giriş sıcaklığının

üzerine çıkmasıdır. Ayrıca, bu eğrilerde toplam ekserjiyi maksimum yapan basınç oranı ile ekserji verimini maksimum yapan basınç oranı değeri birbirinden farklıdır. Çalışma şartlarında veya dizaynda amaca göre bu değerlerden biri alınabilir.



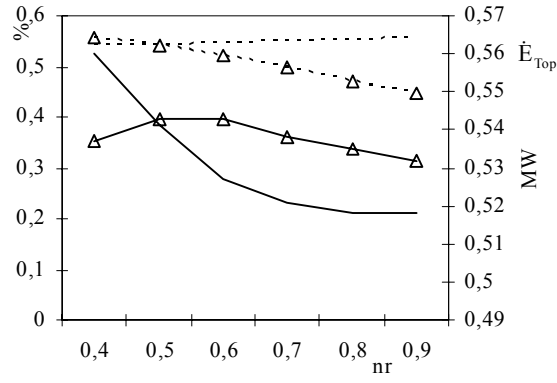
Şekil 4. a) Rejeneratör verimi ile toplam ekserji değişimi b) Rejeneratör verimi ile güç/ısı oranı değişimi



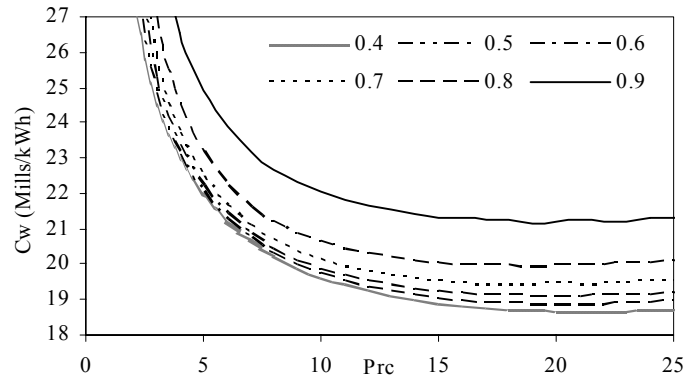
Şekil 5. Çeşitli rejeneratör verimleri için ekserji verimi ile toplam ekserji değişimi

Değişik rejeneratör verimleri için, ekserji veriminin maksimum olduğu basınç oranındaki toplam ekserji (\dot{E}_{mev}) değerleri elde edilerek, Şekil 6 çizilmiştir. Şekilde kesikli çizgiler ekserji verimini, düz çizgiler toplam ekserji değerini ifade etmektedir. Böylece, rejeneratör verimi için maksimum ekserji veriminde elde edilebilecek toplam ekserji okunabilmektedir. Aynı Şekilde, maksimum toplam ekserji için elde edilebilecek ekserji verimleri bulunmuş ve üzerinde üçgen olan eğrilerle bu ifade edilmiştir. Bu sayede, üzeri üçgenli düz çizgi ile ifade edilen maksimum toplam ekserji için elde edilebilecek ekserji verimi, her rejeneratör verimi için belirlenebilmektedir.

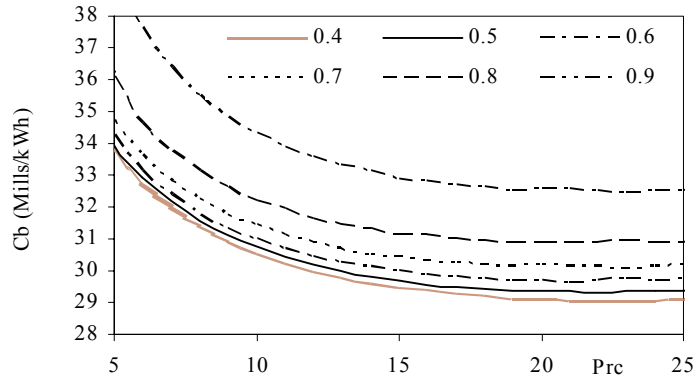
Maliyet açısından bakıldığında, ürünlerin birim ekserji maliyetlerini minimum yapan basınç oranı ekserji verimini ve toplam ekserjiyi maksimum yapan değerden daha farklıdır. $DTp = 10$ alınarak, çeşitli rejeneratör verimleri için ürünlerin birim ekserji maliyetleri incelenmiştir. Rejeneratör verimi arttıkça birim elektrik ekserji maliyeti artmaktadır (Şekil 7). Fakat, bütün rejeneratör verimleri için belirli bir basınç oranında birim maliyet minimumdan geçmektedir.



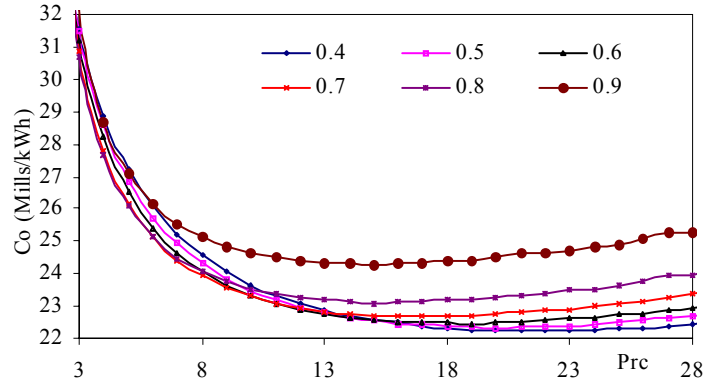
Şekil 6. Çeşitli rejeneratör verimleri için maksimum ekserji-toplam ekserji ve maksimum toplam ekserji-ekserji verimi değişimi



Şekil 7. Çeşitli rejeneratör verimleri için basınç oranı ile birim elektrik ekserji maliyeti



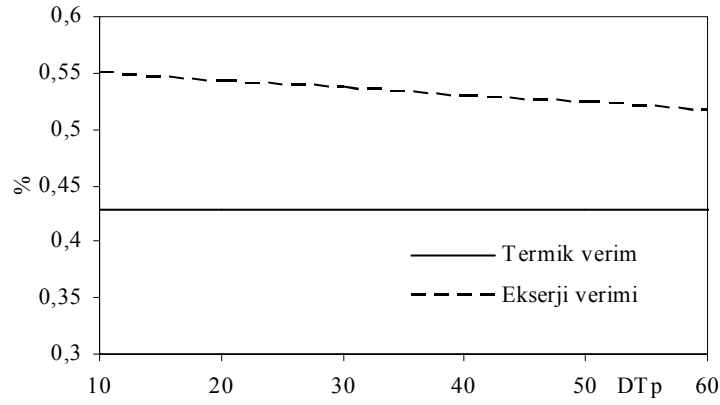
Şekil 8. Çeşitli rejeneratör verimleri için basınç oranı ile birim buhar ekserji maliyeti değişimi



Şekil 9. Çeşitli rejeneratör verimi için basınç oranı ile ortalama birim maliyet değişimi

Rejeneratör verimi arttıkça, birim buhar ekserji maliyeti artmaktadır (Şekil 8). Bütün rejeneratör verimleri için birim buhar ekserji maliyetini minimum yapan basınç oranı belirlenebilir. Ortalama maliyet ise, rejeneratör verimi ile değişmekte ve belirli bir basınç oranında bütün rejeneratör verimleri için minimum noktadan geçmektedir (Şekil 9).

Rejeneratör verimi 0.8 ve basınç oranı 10 alınarak çeşitli minimum sıcaklık farkları için inceleme yapılmıştır.

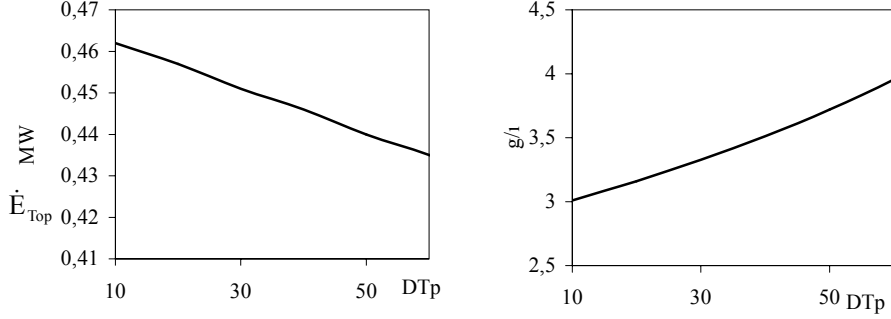


Şekil 10. DTp ile termik ve ekserji verimleri değişimi

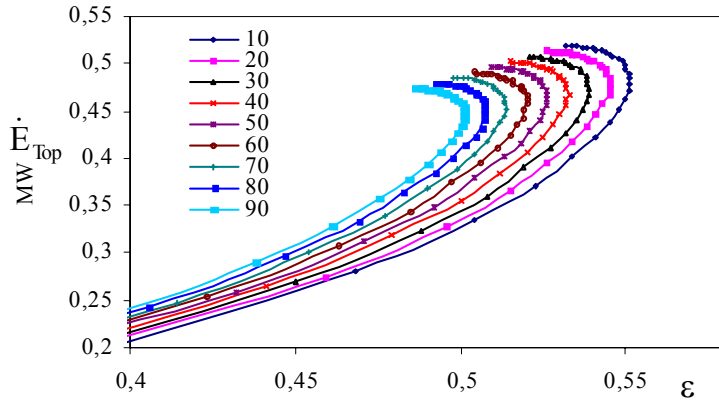
Minimum sıcaklık farkının artışı ile termik verim değişmezken ekserji verimi azalmaktadır (Şekil 10). Bunun sebebi DTp artışına bağlı olarak atık ısı kazanından egzoz gazlarının çıkış sıcaklığı yükselmekte dolayısıyla çevreye atılan ekserji artmaktadır.

DTp' nin artışı ile toplam ekserji azalmaktadır (Şekil 11 a). Atık ısı kazanında transfer olan enerji azaldığı için egzoz gazları kazanı daha sıcak terk etmekte, dolayısıyla ekserji çevreye atılmaktadır. Tesisin ürettiği buhar azaldığı için, güç/ısı oranı da artmaktadır (Şekil 11 b).

Rejeneratör verimi 0.8 alınıp, basınç oranı ikiden altmışa kadar değiştirilerek çeşitli DTp değerleri için ekserji verimi toplam ekserji ilişkisi incelenmiş ve buna göre Şekil 14 çizilmiştir. DTp değeri arttıkça içiçe eğriler elde edilmiştir. Toplam ekserjiyi maksimum yapan basınç oranı ile ekserji verimini maksimum yapan basınç oranının farklı olduğu bu eğrilerde görülmektedir. Maliyet açısından bakıldığında ise, farklı basınç oranı elde edilmektedir.

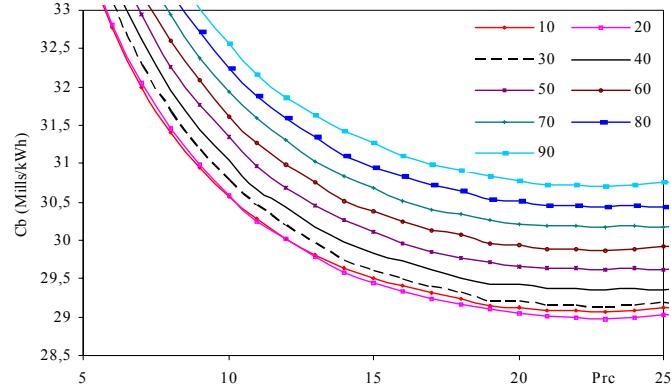


Şekil 11. a) DTp ile toplam ekserji değişimi b) DTp ile güç/ısı oranı değişimi

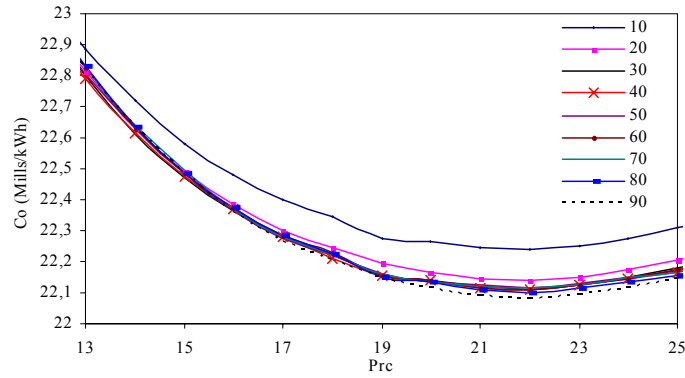


Şekil 12. Çeşitli DTp değerleri için ekserji verimi ile toplam ekserji değişimi

Analizde rejeneratör verimi 0.4 alınmış ve çeşitli DTp değerleri için basınç oranı 2'den 25'e kadar değiştirilerek, ürün maliyet değişimleri incelenmiştir. DTp değeri elektrige ait birim ekserji maliyetini değiştirmemektedir. Buhara ait birim ekserji maliyeti ise DTp arttıkça artmakta olup, belli bir basınç oranında minimum değerini almaktadır (Şekil 13). Birim buhar ekserji maliyetini minimum yapan DTp değerinin 20, buna karşılık gelen basınç oranının ise 23 olduğu görülmüştür. Ortalama maliyet minimum değerini DTp nin 90 ve basınç oranının 22 olduğu noktada almaktadır (Şekil 14).



Şekil 13. Çeşitli DTp değerleri için basınç oranı ile birim buhar ekserji maliyeti değişimi



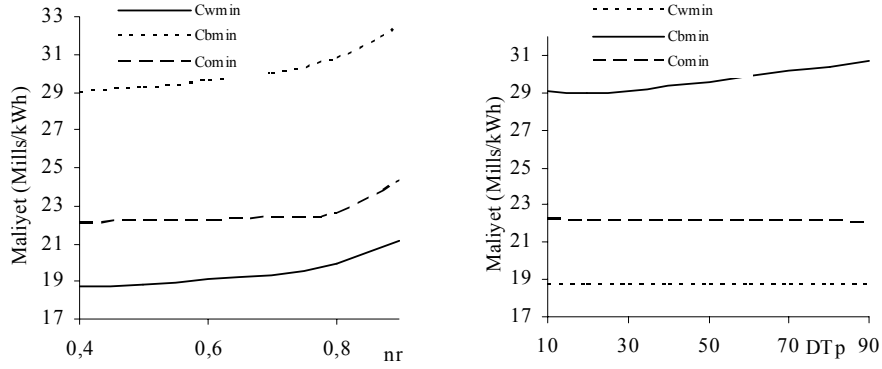
Şekil 14. Çeşitli DTp değerleri için basınç oranı ile ortalama birim ekserji maliyeti değişimi

4. SONUÇLAR

Analizler sonucunda bütün rejeneratör verimleri ve DTp değerleri değerlendirilip, her birinin minimum maliyet şartını sağlayan değerleri bir eğri üzerine taşınarak rejeneratör veriminin ve DTp 'nin maliyetleri nasıl değiştirdikleri incelenmiştir. Böylece minimum değerlerin minimumları da elde edilmiştir.

Maliyetlerin minimum değerlerinin rejeneratör verimi ile değişimi incelendiğinde, rejeneratör verimindeki artışın bütün maliyetleri artırdığı görülmektedir (Şekil 15 a). Dolayısıyla, rejeneratör verimi mümkün olduğu kadar küçük alınmalıdır. DTp ile değişim incelendiğinde, birim elektrik ekserji maliyetinin değişmediği, birim buhar ekserji maliyetinin 20' de minimum olup daha sonra arttığı, ortalama maliyetin ise devamlı azaldığı görülmüştür (Şekil 15 b).

Sonuç olarak ekserji verimini maksimum yapan şartlar, toplam ekserjiyi maksimum yapan şartlar, birim elektrik ekserji maliyetini minimum yapan şartlar, birim buhar ekserji maliyetini minimum yapan şartlar ve ortalama ekserji maliyetini minimum yapan şartlarda parametre değerlerinin değişimi çizelge 1 de verilmiştir. Buna göre kojenerasyon sistemi dizayn edilirken yada işletilirken bulunan optimum şartlar dikkate alınmalı ve buna göre maliyet değişimi değerlendirilmelidir.



Şekil 15. a) Rejeneratör verimi ile maliyetlerin minimum değerlerinin değişimi b) DTp ile maliyetlerin minimum değerlerinin değişimi

Çizelge 1. Optimum değerler

	Prc	nr	DTp	ε	\dot{E}_{Topmax}	g/l	Güç	Cw	Cb	Co
ε_{max}	11	0.9	10	0.556	0.449	3.539	0.35	21.833	33.89	24.489
\dot{E}_{Topmax}	11	0.4	10	0.537	0.56	1.776	0.358	19.446	30.28	23.349
Cwmin	22	0.4	10	0.539	0.54	1.925	0.356	18.682	29.083	22.238
Cbmin	23	0.4	20	0.532	0.532	1.977	0.353	18.698	28.98	22.151
Comin	22	0.4	90	0.494	0.496	2.539	0.356	18.682	30.717	22.082

KAYNAKLAR

- [1] Kotas T., "The exergy method of thermal plant analysis", John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [2] Kwon Y., Kwak H., Oh S., "Exergoeconomic analysis of gas turbines cogeneration systems", Exergy, Vol 1, 31-40, 2001.
- [3] Valero A., Munoz M., Lozano A., "A general theory of exergy saving part 1. On the exergetic cost", Computer aided engineering and energy systems, Vol 3, 1986.
- [4] Valero A., Munoz M., Lozano A., "A general theory of exergy saving part 2. On the thermoeconomic cost", Computer aided engineering and energy systems, Vol 3, 1986.
- [5] Valero A., Munoz M., Lozano A., "A general theory of exergy saving part 3. Energy saving and thermoeconomics", Computer aided engineering and energy systems, Vol 3, 1986.
- [6] Valero A., Lozano M., Serra L., Torres C., "Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem", Energy, Vol 19, 365-372, 1994.
- [7] Sevilgen S.H., "Enerji Üretim Sistemlerinin Exergoekonomik Analizi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2002.
- [8] Lozano M.A., Valero A., "Theory of the exergetic cost", Energy, Vol 18, No 9, 939-960, 1993.
- [9] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., "Thermal Design and Optimization", Wiley-Interscience Publication, New York, 1995.
- [10] Tsatsaronis G., Pisa J., "Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems application to the CGAM problem", Energy, Vol 19, 287-321, 1994.
- [11] William R. ve Park P.E., "Cost Engineering Analysis", John Wiley & Sons, New York, 1973.