



BİYOĞAZ BESLEMELİ GAZ MOTORLU BİR KOJENERASYON SİSTEMİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Ayşegül ABUŞOĞLU, Sinan DEMİR ve Mehmet KANOĞLU

Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 27310 Gaziantep
ayabusoglu@gantep.edu.tr, sinandemir@gantep.edu.tr, kanoglu@gantep.edu.tr

(Geliş Tarihi: 23. 01. 2012, Kabul Tarihi: 05. 03. 2012)

Özet: Bu makalede biyogaz beslemeli gaz motorlu bir kojenerasyon sisteminin termoeconomik analizi sunulmaktadır. Kojenerasyon sistemi detaylı bir şekilde tanıtılmış ve özgül ekserji maliyetlendirme (SPECO) yöntemi temelinde, sistem bileşenlerinin maliyet akışlarını ifade eden ilişkiler geliştirilmiştir. Kojenerasyon sisteminin yakıt kaynağı olan biyogaz, sisteme aynı kampus sınırları içinde bulunan atık su arıtma tesisinde üretilmektedir. Sistemde üretilen her 1 kW elektrik için 0.387 m³ biyogaz tüketilmektedir. Kojenerasyon sisteminin ekserji verimi %26.6 olarak bulunmuştur, bu da sisteme biyogazla giren ekserjinin %73.4'ünün yıkıma uğradığını göstermektedir. Gaz motorlu kojenerasyon sisteminde üretilen elektriğin ekserjiye bağlı maliyet oranı ve birim ekserji maliyeti sırasıyla, 90.0 \$/saat (159,3 TL/saat) ve 25.0 \$/GJ (44,25 TL/GJ) olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, Kojenerasyon, Ekserji, Eksergoekonomi, SPECO.

THERMOECONOMIC ANALYSIS OF A BIOGAS ENGINE POWERED COGENERATION SYSTEM

Abstract: This paper presents the thermoeconomic analysis of a biogas engine powered cogeneration system. Operation of an existing cogeneration system is described in detail and a methodology based on exergoeconomic relations and SPECO method is provided to allocate cost flows through subcomponents of the plant. Biogas is produced in the wastewater treatment plant, which remains within the boundaries of the same campus with cogeneration facility. For each 1 kW electricity produced, 0.387 m³ of biogas is consumed in the cogeneration plant. The exergetic efficiency of cogeneration plant is found to be 26.6%, which indicates that 73.4% of the total exergy input to the plant, mainly by biogas, is destroyed. The exergetic cost rate and the specific unit exergetic cost of the power produced in the cogeneration system are calculated to be 90.0 \$/h (159,3 TL/h) and 25 \$/GJ (44,25 TL/GJ), respectively.

Keywords: Biogas, Cogeneration, Exergy, Exergoeconomy, SPECO.

SEMBOLLER

\dot{E}_x	toplam ekserji (kW)	GASKI	Gaziantep Su ve Kanalizasyon İşletmesi
\dot{E}_{x_y}	ekserji yıkımı (kW)	EGHE	Egzoz gazı ısı değiştiricisi
\dot{E}_{x_F}	yakıt ekserjisi (kW)	BGHE	Biyogaz ısı değiştiricisi
\dot{E}_{x_p}	ürün ekserjisi (kW)	LOHE	Yağlama yağı ısı değiştiricisi
\dot{W}	elektrik (kW)	SPECO	Özgül ekserji maliyetlendirme metodu
c	birim ekserji maliyeti (\$/GJ)	α	sabit ekonomik katsayısı
\dot{C}	ekserjiye bağlı maliyet oranı (\$/saat)	ε	ekserji verimi
$\dot{Z}_k^{\text{Toplam}}$	toplam yatırım maliyeti (\$/saat)	ψ	özgül ekserji (kJ/kg)
\dot{Z}_k^{IY}	ilk yatırım maliyeti (\$/saat)	τ	yıllık kapasite faktörü
\dot{Z}_k^{IB}	işletme ve bakım maliyeti (\$/saat)	γ	sabit bakım faktörü
f	eksergoekonomik faktör	komp	kompresör
		F	yakıt
		P	ürün
		t	türbin
		y	yıkım
		kojen	kojenerasyon

GİRİŞ

Kentsel atık su arıtma tesisleri, atık kanalizasyon sularının çevresel etkilerini minimuma indirme amacının yanında, arıtma işleminin yan ürünü olan atık su çamurundan biyogaz üreterek hem sürdürülebilir bir enerji geri kazanım işlemi yapmakta ve hem de çok değerli bir ikincil yakıt kaynağı (çürütülmüş atık su çamuru) üretmektedir. Atık su çamurundan anaerobik (havasız) çürütme tanklarında mezofilik sıcaklık şartlarında üretilen biyogazın içeriğinde % 50-70 oranında metan gazı (CH_4), % 25-50 oranında karbon dioksit (CO_2), % 1-5 oranında hidrojen (H_2), % 0.3-3 oranında azot (N_2) ve eser miktarlarda amonyak (NH_3) ve hidrojen sülfür (H_2S) bulunmaktadır (McKendry, 2002).

Atık su arıtma tesisleri, çok yoğun enerji ihtiyacı olan proseslerden oluşmaktadır. Bu prosesler için gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla, atık suyun arıtılması işleminden sonra ortaya çıkan atık su çamurunun işlenmesiyle elde edilen biyogaz uygun bir birleşik ısı ve güç üretim sisteminde (kojenerasyon) yakıt olarak kullanılabilir ve bu sayede sistemin ihtiyacı olan elektrik ve ısı enerjisi sağlanabilir. Kojenerasyon, endüstriyel işletmelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamada ekonomik avantajlar taşımaya nedeniyle yirminci yüzyılın başından itibaren dünyanın dört bir yanında pek çok endüstriyel kuruluş tarafından tercih edilen bir teknoloji olagelmıştır. Kojenerasyon, ayrı ısı ve güç üretim tesislerine göre yakıt kullanımını azaltması ve buna bağlı olarak hava ve diğer çevre kirlilik değerlerini düşürmesi dolayısıyla toplam enerji kullanım verimini de arttırmaktadır. Biyogazın içten yanmalı gaz motorlarında yakıt olarak kullanımı hali hazırda gelişmiş bir teknolojidir ve genellikle elektrik ihtiyacı 45 kW ile 5 MW arasında değişen küçük üretim sistemlerinde tercih edilmektedir (Jenbacher, 2011). Gaz motorlu birleşik ısı ve güç üretim sistemleri, gaz türbinli sistemlerden daha yüksek elektrik verimine ve daha düşük yatırım maliyetine sahiptir. Gaz türbinli birleşik ısı ve güç üretim sistemleri çoğunlukla ısı ihtiyacının yüksek olduğu proseslerde ya da çok yüksek elektrik ihtiyacı olan işletmelerde ekonomik olmaktadır (Mueller, 1995).

Enerji üretim sistemlerinin verimlerinin artırılabilmesi için birçok faktörün göz önüne alınması gerekmektedir. Bu sistemlerin çalışma performanslarının artırılması problemi sadece teknik olmayıp temelde ekonomiktir. Çünkü problemin çözümünde tüketilen yakıt ve işletme maliyetlerinin doğrudan etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla bu tür analizlerde amaç, enerjinin kullanılabilirliğini ortaya koymaktır. Enerji üretim sistemlerinin maliyet akışlarının anlaşılabilmesi için geleneksel enerji analizi ve ekonomik değerlendirmeler kullanılabilir. Ancak sistemi oluşturan alt birimlerdeki tersinmezliklerden kaynaklanan parasal kaybı ve bu kayıpların maliyet akışlarıyla doğrudan ilişkisi bir anlamda sadece enerji giriş-çıkış kayıtlarının tutulduğu analizlerle anlaşılabilir. Bu amaçla, özelde

alt sistemlerde genelde ise sistemin bütününde meydana gelen tersinmezliklerin maliyet akışına etkisini ortaya koymak için çok daha yeterli ve metodolojik analiz ve değerlendirme yöntemlerine ihtiyaç vardır. Termodinamiğin ikinci kanununa bağlı olarak ifade edilen ekserji kavramı, üretim sistemlerinin gerçek maliyet akışlarını sistemlerdeki tersinmezliklere bağlı olarak ifade etmekte ve böylece rasyonel bir ekonomik değerlendirmeye yardımcı olabilmektedir.

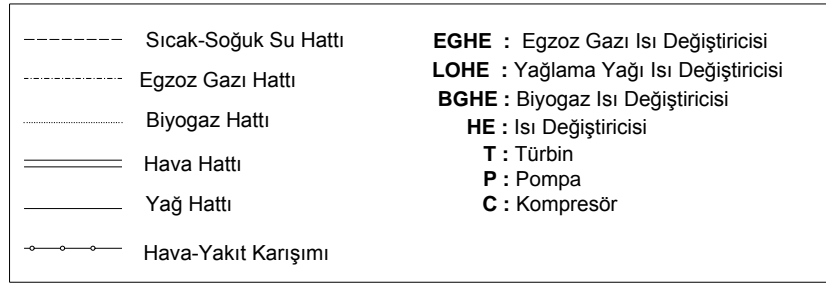
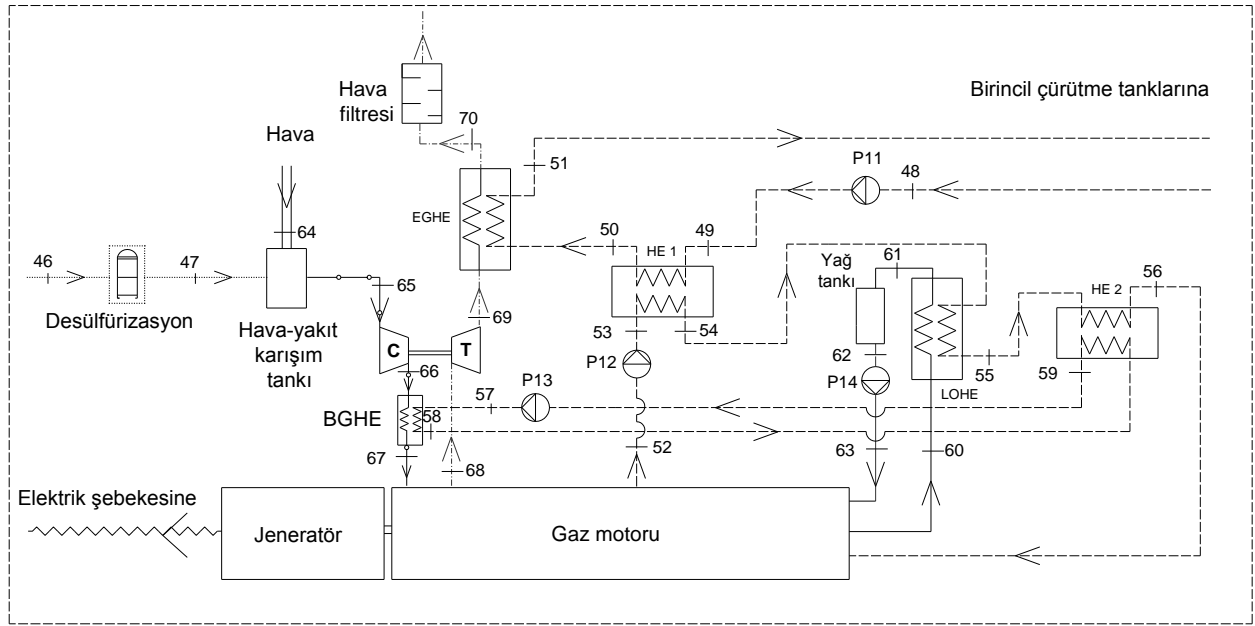
Abuşoğlu ve Kanoğlu (2009), birleşik ısı ve güç üretim sisteminin termoeconomik analiz ve optimizasyonu konusunda literatürde bulunan çalışmaların detaylı bir gözden geçirmesini yapmışlardır. Bu çalışma temel alınarak literatürde birleşik ısı ve güç üretim sistemlerinin termoeconomik analizi konusundaki çalışmaları ikiye ayırmak mümkündür: (1) Alt sistemlerdeki maliyet akış oranlarına odaklanan ve böylece alt sistemlerin her birinin üretim maliyetini hesaplamayı amaçlayan çalışmalar, (2) Sistemin üretim performansının artırılarak maliyet akışlarının iyileştirilmesine odaklanan optimizasyon çalışmaları. Atık su arıtma sistemlerinden elde edilen biyogazın tesisin elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamak amacıyla kojenerasyon sistemlerinde kullanılması gittikçe yaygınlaşmaktadır. Ancak bu sistemlerin enerji ve ekserjiye bağlı maliyet yapılarının ele alındığı termoeconomik analiz çalışmaları henüz çok azdır (Lamas vd, 2009).

Bu çalışmada gerçek bir atık su arıtma sisteminde, tamamen sürdürülebilir nitelikte bir prosesle üretilen biyogazın atık su arıtma tesisi içindeki gaz motorlu kojenerasyon sisteminde yakıt olarak kullanımı ve sistemin termoeconomik analizi ele alınmıştır. Bu amaçla, öncelikle gaz motorlu kojenerasyon sistemi tanıtılmış, ardından sistem için geliştirilen termodinamik ve termoeconomik analiz ilişkileri sunulmuştur. Sistemin ekserjiye bağlı maliyet akışının elde edilmesinde ise gerçek işletme verileri kullanılmıştır.

SİSTEM TANIMI

Bu çalışmada biyogazın enerjiye dönüştürülmesinde Gaziantep Su Kanalizasyon İşletmesi (GASKİ) biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi kullanılmaktadır. Sistem dört zamanlı, buji ateşlemeli, 12 silindirli, V konfigürasyonlu bir Deutz TCG 2020 marka motordan ve buna bağlı diğer ekipmanlardan oluşmaktadır (Şekil 1). Sistemde yakıt olarak, aynı tesis içindeki atık su arıtma tesisi çamurunun stabilizasyonu ile üretilen biyogaz kullanılmaktadır. Tesiste üretilen biyogazın içeriği Tablo 1'de verilmektedir.

Kojenerasyon tesisinin yıllık elektrik üretimi 8,760 GW-saattir ve bu üretime karşılık gelen biyogaz tüketimi ise yıllık 3.400.000 m³ olarak hesaplanmıştır. Kojenerasyon sistemi, havasız (anaerobik) çamur çürütme tanklarında bir yılda üretilen biyogazın -



Şekil 1. GASKI biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi akış şeması.

Tablo 1. GASKI atık su arıtma tesisinde üretilen biyogazın içeriği.^a

İçerik	Hacimsel değer (%)
CH ₄	60,0
CO ₂	35,0
N ₂	1,5
H ₂	0,3
O ₂	0,5
H ₂ S (2500-3000 ppm)	2,5-3,0
LHV (kJ/kg)	17.892
HHV (kJ/kg)	21.250

^aBu değerler GASKI atık su arıtma işletmesi yönetimi tarafından 2010 yılında hazırlanan resmi faaliyet raporundan alınmıştır.

%61'ini tüketmektedir. Biyogaz, gaz motorunun emme valflerine girmeden önce uygun oranda hava ile karıştırılmaktadır. Motor devreye alındığında, hava-yakıt (biyogaz) karışımı turboşarj ünitesinin kompresörüne girer (65). Turboşarj kompresörü, aynı shaftta bağlı bulunan türbinin egzoz gazından ürettiği işi kullanmaktadır. Bu sistemin avantajı, kompresörün motor shaftından üretilen gücü kullanmayıp, egzozdan geri kazanılan atık enerjisini değerlendirmesidir. Turboşarj ünitesine bağlı olan bir ara soğutucu ısı değiştiricisiyle, kompresörden çıkan yüksek basınçlı hava-yakıt karışımının sıcaklığı düşürülür (67).

Turboşarjın türbininden çıkan egzoz gazı ısısını, havasız türbininden çıkan egzoz gazının ihtiyacı olan ısıyı sağlayan kapalı devre su hattına transfer etmek amacıyla egzoz gazı ısı değiştiricisine (EGHE) girer (69). Bu ısı değiştirici ünitesinden ayrılan egzoz gazı bir filtreye gönderilerek karbon monoksit (CO) emisyonunun yasal sınırların altına düşmesi sağlanır. Gaz motorundan çıkan ceket soğutma suyu ısısını, önce havasız çamur çürütme tankından gelen su hattına transfer eder (HE1) (53), daha sonra motordan ısınarak çıkan yağlama yağının soğutulması işlemi için yağlama yağı ısı değiştiricisine (LOHE) girer (54). Son olarak, kapalı devre dolaşan hava-yakıt karışımı ara soğutucusu suyunu soğutarak (HE2) (55) tekrar motora döner (56). Yağlama yağı, motor bileşenlerinin yağlanması ve soğutulması amacıyla kullanılmaktadır (60-63).

TERMOEKONOMİK ANALİZ

Bu çalışmada, gaz motorlu kojenerasyon sisteminin termoeconomik analizi için ekserji akımı maliyetlendirmesi yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, söz konusu sistemin öncelikle alt bileşenlerine ayrılması ve her bir bileşenin maliyet değerlendirmesinin birbirini izleyen iki adımla gerçekleştirilmesini içermektedir. İlk adımda, sistemin detaylı bir termodinamik analizi yapılarak sistem bileşenlerinin enerji ve ekserji akışları ile her bir

bileşenin ekserji yıkımı ve ekserji verimi ile ifade edilen tersinmezlikleri ortaya konulmaktadır. Bu analizi, sistem bileşenlerinin detaylı maliyet dökümlerini içeren ekonomik analiz takip etmektedir. İkinci adımda, her bir sistem bileşenine bağlı akımların, cebirsel maliyet hesaplama yöntemleri içinde en fazla kullanılan özgül ekserji maliyetlendirme (SPECO) yöntemi (Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006) ile hesaplanması gerçekleştirilmektedir. SPECO yönteminde, her bir ekserji akımının ortalama birim maliyetini elde etmek amacıyla maliyet denge denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemlerdeki bilinmeyen maliyet değerlerinin hesaplanmasında, sistemin termodinamik ve ekonomik kısıtlamaları göz önüne alınarak yardımcı eşitlikler kullanılmaktadır.

Termodinamik Analiz

Termodinamik analizlerde enerji ve ekserji dengeleri için birinci ve ikinci kanunlardan türetilerek geliştirilen genel eşitlikle kullanılmaktadır. Sonlu bir zaman aralığında, bir sistemdeki akış prosesi için kütle, enerji ve ekserji dengeleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{Kütle girişi} - \text{Kütle çıkışı} = \text{Sistemdeki kütle değişimi} \quad (1)$$

$$\text{Enerji girişi} - \text{Enerji çıkışı} = \text{Sistemdeki enerji değişimi} \quad (2)$$

$$\text{Ekserji girişi} - \text{Ekserji çıkışı} - \text{Ekserji yıkımı} = \text{Sistemdeki ekserji değişimi} \quad (3)$$

Yukarıdaki (2) ve (3) nolu eşitlikler, enerji ve ekserji arasında önemli bir fark olduğunu göstermektedir: Enerji herhangi bir proses boyunca daima korunurken, ekserji prosesteki tersinmezliklere bağlı olarak sürekli yıkıma uğrar veya tüketilir. Kısaca, ekserji, enerjinin kalitesini gösterir ve herhangi bir gerçek proses boyunca korunan bir özellik değildir (Wark, 1995). Bu çalışmada kullanılan kabuller aşağıda sıralanmaktadır:

- GASKİ Gaz Motorlu Kojenerasyon Sistemi'ndeki tüm alt sistemler sürekli akış şartında çalışmaktadırlar.
- Hava ve egzoz gazlarına ideal gaz prensipleri uygulanmıştır.
- Gaz motoru içindeki yanma reaksiyonu tam yanma olarak modellenmiştir.
- Bütün alt sistemlerde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Referans çevre sıcaklık ve basınç değerleri sırasıyla 25°C ve 1 atm olarak alınmıştır.
- Gaz motorundaki yanma reaksiyonu sonrası egzoz gazları içindeki su genellikle buhar fazında olduğundan yakıtın (biyogaz) alt ısı değeri (LHV) kullanılmıştır.

Herhangi bir sürekli akış sistemi için kütle, enerji ve ekserji dengeleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (4)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta - \sum \dot{m}_g h_g \quad (5)$$

$$\dot{E}x_{\text{ısı}} + \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta \psi_\zeta - \sum \dot{m}_g \psi_g + \dot{E}x_y \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, \dot{Q} ve \dot{W} net ısı ve iş girişleri, \dot{m} akışkanın kütle debisini, h entalpiyi, g ve ζ alt indisleri sisteme giriş ve çıkışı, $\dot{E}x_y$, ekserji yıkımını, $\dot{E}x_{\text{ısı}}$ ise T sınır sıcaklığına sahip bir sistemden ısıyla transfer edilen ekserjiyi göstermektedirler. ısıyla transfer edilen ekserji ve ekserji yıkımı aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\dot{E}x_{\text{ısı}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \dot{Q} \quad (7)$$

$$\dot{E}x_y = T_0 \dot{S}_a \quad (8)$$

(7) ve (8) nolu eşitliklerde verilen T_0 referans çevre sıcaklığını, \dot{S}_a ise bir sistem bileşenindeki prosese bağlı entropi artışını göstermektedir. Özgül ekserji ve toplam ekserji eşitlikleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (9)$$

$$\dot{E}x = \dot{m} \psi \quad (10)$$

Gaz motorlu kojenerasyon sisteminin termodinamik analizi, sistem bileşenlerinin ayrı ayrı performans değerlendirmelerini kapsamaktadır. Pompalar, türbinler, kompresörler, ısı değiştiricileri, ve gaz motoru bu sistemde kullanılan alt bileşenleri oluşturmaktadırlar. Adyabatik bir türbin ve kompresörün izentropik verimleri sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\eta_t = \frac{w_g}{w_{is}} = \frac{h_g - h_\zeta}{h_g - h_{\zeta, is}} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{komp}} = \frac{w_{is}}{w_g} = \frac{h_{\zeta, is} - h_g}{h_\zeta - h_g} \quad (12)$$

Yukarıdaki eşitliklerde w_g ve w_{is} sırasıyla gerçek ve izentropik özgül işi göstermektedirler ve alt indis "is" izentropik durumu gösterir. Adyabatik bir türbinin ikinci kanun (ekserji) verimi, türbin çalışma akışkanının akış ekserjisinin ne kadar verimli bir şekilde shaft işi çıkıtısına dönüştürülebildiğinin bir ölçüsü olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\varepsilon_t = \frac{w_g}{w_{\text{rev}}} = \frac{h_g - h_\zeta}{h_g - h_\zeta - T_0 (s_g - s_\zeta)} \quad (13)$$

(13) nolu eşitlikteki, w_{rev} , tersinir iş, türbinde üretilen gerçek iş ile ekserji yıkımının toplamıdır. Adyabatik bir kompresörün (veya pompanın) ikinci kanun (ekserji) verimi türbinin tam tersidir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\varepsilon_{komp} = \varepsilon_{pompa} = \frac{h_{\zeta} - h_g - T_0(s_{\zeta} - s_g)}{h_{\zeta} - h_g} \quad (14)$$

Bu durumda (14) nolu eşitlikteki tersinir iş, kompresör veya pompaya verilen gerçek iş ile ekserji yıkımının farkıdır. Kojenerasyon ünitesindeki ısı değiştiricilerin ikinci kanun (ekserji) verimleri soğuk akışkanın ekserjisindeki artışın sıcak akışkanın ekserjisindeki azalışa oranı olarak ölçülür.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{he} &= \frac{(\dot{E}x_{\zeta} - \dot{E}x_g)_{soguk}}{(\dot{E}x_g - \dot{E}x_{\zeta})_{sicak}} \\ &= \frac{\dot{m}_{soguk} [h_{\zeta} - h_g - T_0(s_{\zeta} - s_g)]_{soguk}}{\dot{m}_{sicak} [h_g - h_{\zeta} - T_0(s_g - s_{\zeta})]_{sicak}} \end{aligned} \quad (15)$$

\dot{m}_{soguk} ve \dot{m}_{sicak} sırasıyla, soğuk ve sıcak akışkanların kütle debileridir. Referans halde biyogazın özgül kimyasal ekserjisi karışımı oluşturan bileşenlerin mol oranları, y_f , göz önüne alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir (Wark, 1995),

$$\psi_{biyogaz}^{KIM} = \sum y_f \psi_f^{KIM} + R_f T_0 \sum (y_{ft} \ln y_f) \quad (16)$$

Gaz motorunun ve kojenerasyon sisteminin termal verimleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\eta_{biyogaz\ motoru} = \dot{W}_{net} / (\dot{m}_{biyogaz} \cdot LHV_{biyogaz}) \quad (17a)$$

$$\eta_{kojen} = \dot{W}_{net} + \dot{Q}_{isi} / (\dot{m}_{biyogaz} \cdot LHV_{biyogaz}) \quad (17b)$$

Yukarıdaki (17a) nolu eşitlikte gaz motorunun toplam verimi motorun ürettiği toplam gücün yakıt (biyogaz) enerjisine oranı olarak tanımlanırken, (17b) nolu eşitlikte kojenerasyon sistemi için bu verim motorun ürettiği toplam güce ilaveten ısı enerjisi de göz önüne alınarak ifade edilir. Biyogaz motorunun ekserji verimi, üç farklı yaklaşımla tanımlanabilir. İlk yaklaşımda, ekserji verimi, motorun ürettiği toplam gücün yakıtın toplam ekserjisine oranı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$\varepsilon_{biyogaz\ motoru}^1 = \dot{W}_{net} / (\dot{m}_{biyogaz} \cdot \psi_{biyogaz}^T) \quad (18)$$

İkinci yaklaşımda, gaz motoru egzoz gazının, atık su arıtma sistemindeki havasız çamur çürütme tankları kapalı devre ısıtma suyuna transfer ettiği ısı enerjisi de dikkate alınır. Bu durumda sistemin ekserji verimi kojenerasyon prensibine uygun olarak her iki sistem çıktısının göz önüne alındığı bir ilişki haline gelir,

$$\varepsilon_{biyogaz\ motoru}^2 = \varepsilon_{kojen} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{isi}}{\dot{m}_{biyogaz} \psi_{biyogaz}^T} \quad (19)$$

Üçüncü yaklaşımda ise, biyogaz motoruna giren ve çıkan bütün akışlar gözönüne alınarak, ekserji verimi, sistemden çıkan toplam ekserjinin, giren toplam ekserjiye oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir (bkz Şekil 1),

$$\varepsilon_{biyogaz\ motoru}^3 = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{52} + \dot{E}x_{60} + \dot{E}x_{68}}{(\dot{m}_{biyogaz} \psi_{biyogaz}^T) + \dot{E}x_{56} + \dot{E}x_{63}} \quad (20)$$

Ekonomik Analiz

Gaz motorlu kojenerasyon sistemi için birincil maliyetler; yakıt maliyeti, ilk yatırım maliyeti ve işletme ve bakım maliyetleri olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada yapılan ekonomik analiz, toplam gelir arzı (total revenue requirement) yaklaşımının basitleştirilmiş bir şeklidir (Bejan vd, 1998). Bu yaklaşımda, bir sistemdeki toplam yatırım maliyeti (TYM), sistemdeki tüm bileşenlere harcanan ilk yatırımların toplamı (İYM) olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$TYM = \alpha \sum_k İYM_k \quad (21)$$

Yukarıdaki eşitlikte α , literatürde güç üretim sistemleri için tanımlanmış sabit bir ekonomik katsayıdır ve değeri, sistemin dizayn ve iyileştirme durumuna göre farklılık gösterir (Bejan vd, 1998). Sistem bileşenlerinin yatırım maliyet oranları, ana para geri kazanım faktörü (GKF) ve İYM arasındaki ilişkiye bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\dot{Z}_k^{YM} = İYM_k \cdot GKF / \tau \quad (22)$$

$$GKF = i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1] \quad (23)$$

(22) nolu eşitlikte verilen τ , işletmenin yıllık toplam çalışma saatlerini, i , yıllık faiz oranını ifade etmektedir. Sistem bileşenlerinin işletme ve bakım (İB) maliyet oranları ise

$$\dot{Z}_k^{IB} = \gamma GKF \cdot İYM_k / \tau \quad (24)$$

şeklinde ifade edilebilir. (24) nolu eşitlikte verilen γ , sabit bakım faktörüdür. Böylece, gaz motorlu kojenerasyon sistem bileşenlerinin her biri için toplam maliyet oranı

$$\begin{aligned} \dot{C}_{k,kojen}^{toplaml} &= \dot{Z}_{k,kojen}^{toplaml} + \dot{C}_{biyogaz} \\ &= \sum_k (\dot{Z}_k^{YM} + \dot{Z}_k^{IB})_{kojen} \\ &\quad + k_{biyogaz} \cdot \dot{m}_{biyogaz} \cdot LHV_{biyogaz} \end{aligned} \quad (25)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Yukarıdaki eşitlikte verilen $k_{biyogaz}$, kojenerasyon sistemi sahasında havasız atık

çamur çürütme reaktörlerinde üretilen biyogazın maliyetini, LHV_{biyogaz} ise biyogazın alt ısıl değerini ifade etmektedir.

Ekserjiye Bağlı Maliyet Denge Denklemleri ve Yardımcı Eşitlikler

Bir kütle ya da enerji akımının ekserjiye bağlı maliyeti bu akışı üretmek için kullanılan ekserji miktarına bağlı olarak hesaplanır. Şekil 1’de verilen gaz motorlu kojenerasyon sistemi için üretilen elektriğin ekserji maliyeti, atık su arıtma sistemi arıtma çamurundan üretilen biyogazın ekserjisine doğrudan bağlıdır. Sistemdeki herhangi bir ürün akışının ekserji oranını $\dot{E}x_k$, ekserji maliyetini \dot{C}_k ile ifade edersek, akışın birim ekserji maliyetini aşağıdaki gibi yazabiliriz,

$$c_k = \dot{C}_k / \dot{E}x_k \quad (26)$$

Bu şekilde bir sisteme giren ve çıkan madde akışı, güç ve ısı ile transfer edilen ekserji maliyetleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\begin{aligned} \dot{C}_i &= c_i \dot{E}x_i = c_i (\dot{m}_i \psi_i) \\ \dot{C}_e &= c_e \dot{E}x_e = c_e (\dot{m}_e \psi_e) \\ \dot{C}_w &= c_w \dot{W} \\ \dot{C}_q &= c_q \dot{E}x_q \end{aligned} \quad (27)$$

Sürekli akışlı biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi için ekserjiye bağlı maliyet denge denklemi ise aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\begin{aligned} \sum (\dot{C}_{P,\text{toplama}})_{\text{kojen}} &= \dot{C}_{P,\text{elektrik}} + \dot{C}_{P,\text{ısı}} \\ &= \dot{C}_{F,\text{biyogaz}} \\ &+ \sum (\dot{Z}_{\text{toplama}}^{\text{YM}} + \dot{Z}_{\text{toplama}}^{\text{IB}})_{\text{kojen}} \end{aligned} \quad (28)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\dot{C}_{P,\text{elektrik}}$ ve $\dot{C}_{P,\text{ısı}}$ kojenerasyon sisteminin ürün ekserji akışlarının maliyet oranlarını ifade etmektedir. (28) nolu eşitlik, gaz motorlu kojenerasyon sisteminin ürün ekserji akışlarının toplam maliyetini, bu ürünleri elde edebilmek için yapılan harcama akışlarının toplamı olarak tanımlamaktadır.

Matematiksel olarak, sistemin tüm alt bileşenlerinden çıkan ekserji akımlarının toplamına eşit sayıda (n) bilinmeyen vardır ve (28) nolu eşitlikte ifade edilen maliyet denge denklemi tek başına bu bilinmeyenleri hesaplamak için yeterli değildir. Dolayısıyla bilinmeyenlerin sayısından bir eksik ($n-1$) yardımcı eşitlik tanımlanmalıdır. Yardımcı eşitlikler özgül ekserji maliyetlendirme (SPECO) yönteminin, yakıt (F) ve ürün (P) prensiplerinden yararlanarak geliştirilebilir (Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006). Yakıt (F) prensibi, herhangi bir sistem alt bileşenine giren akışı, o bileşenin “yakıtı” olarak tanımlar ve bu akışın maliyetini bir önceki akışların ortalama ekserji maliyetlerine eşit olarak ifade eder. Diğer taraftan ürün (P) prensibi, herhangi bir sistem bileşeninin “ürün” akışını, sisteme giren yakıt akışının maliyetine eşit kabul eder. Bu çalışmada, SPECO yöntemi temel alınarak, gaz motorlu kojenerasyon sistemi için F ve P prensipleri yardımıyla her bir sistem bileşeni için yeterli sayıda yardımcı eşitlik geliştirilmiş, ve bu eşitlikler ile ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet denklemleri ve yardımcı eşitlikler.

Sistem bileşeni	Ekserjiye bağlı maliyet denge denklemleri	Yardımcı eşitlikler
Kompresör	$c_e \dot{W}_{\text{COMP}} + \dot{Z}_{\text{COMP}} = c_{66} \dot{E}x_{66} - c_{65} \dot{E}x_{65}$	$c_{65} = c_{47}$
Türbin	$c_{68} \dot{E}x_{68} + \dot{Z}_{\text{TURB}} = c_e \dot{W}_{\text{TURB}} + c_{69} \dot{E}x_{69}$	$c_{68} = c_{69}$
EGHE	$c_{69} \dot{E}x_{69} + c_{50} \dot{E}x_{50} + \dot{Z}_{\text{EGHE}} = c_{70} \dot{E}x_{70} + c_{51} \dot{E}x_{51}$	$c_{69} = c_{70}$
Pompa – P11	$c_e \dot{W}_{\text{P11}} + \dot{Z}_{\text{P11}} = c_{49} \dot{E}x_{49} - c_{48} \dot{E}x_{48}$	---
Pompa– P13	$c_e \dot{W}_{\text{P13}} + \dot{Z}_{\text{P13}} = c_{57} \dot{E}x_{57} - c_{59} \dot{E}x_{59}$	$c_{59} = c_{15}$
BGHE	$c_{66} \dot{E}x_{66} + c_{57} \dot{E}x_{57} + \dot{Z}_{\text{IC}} = c_{67} \dot{E}x_{67} + c_{58} \dot{E}x_{58}$	$c_{57} = c_{58}$
HE-2	$c_{55} \dot{E}x_{55} + c_{58} \dot{E}x_{58} + \dot{Z}_{\text{HE-2}} = c_{56} \dot{E}x_{56} + c_{59} \dot{E}x_{59}$	$c_{55} = c_{56}$
Pompa – P14	$c_e \dot{W}_{\text{P14}} + \dot{Z}_{\text{P14}} = c_{63} \dot{E}x_{63} - c_{62} \dot{E}x_{62}$	---
LOHE	$c_{60} \dot{E}x_{60} + c_{54} \dot{E}x_{54} + \dot{Z}_{\text{LOHE}} = c_{61} \dot{E}x_{61} + c_{55} \dot{E}x_{55}$	$c_{61} = c_{62}$ $c_{54} = c_{55}$
HE-1	$c_{53} \dot{E}x_{53} + c_{49} \dot{E}x_{49} + \dot{Z}_{\text{HE-1}} = c_{54} \dot{E}x_{54} + c_{50} \dot{E}x_{50}$	---
Pompa – P12	$c_e \dot{W}_{\text{P12}} + \dot{Z}_{\text{P12}} = c_{53} \dot{E}x_{53} - c_{52} \dot{E}x_{52}$	---
Gaz motoru	$c_{67} \dot{E}x_{67} + c_{63} \dot{E}x_{63} + c_{56} \dot{E}x_{56} + \dot{Z}_{\text{GE}}$ $= c_{68} \dot{E}x_{68} + c_{60} \dot{E}x_{60} + c_{52} \dot{E}x_{52} + c_{GE} \dot{W}_{\text{GE}}$	$\dot{W}_{\text{net}} = 1000 \text{ kW}$

Ekserjiye bağılı maliyetlendirme yönteminin en önemli katkısı, sistem bileşenlerinin tersinmezliklerine bağılı olarak meydana gelen maliyet kaybını hesaplayabilmektir. Sistemin alt bileşenlerinin ekserji yıkımı, o bileşene gelen “yakıt” akışının maliyeti ile ters orantılıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\dot{C}_{y,k} = c_{F,k} \dot{E}x_{y,k} \quad (29)$$

Böylece her bir sistem alt bileşeninde ekserji yıkımına bağılı maliyet kaybı da hesaplanabilir ki bu değerler, sistemin maliyet yapısını şekillendirmede çok önemli bir rol oynarlar. Eksergoekonomik analiz çalışmalarında, bir sistem alt bileşeninin maliyet performansı hem ilk yatırım ve işletme ve bakım maliyetleri toplamına ve hem de sistemin ekserji yıkım maliyetine bağılı olarak değişir. Bu maliyet performans ifadesi, eksergoekonomik faktör (Bejan vd, 1996) olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}x_{y,k}} \quad (30)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

Biyogaz Beslemeli Gaz Motorlu Kojenerasyon Sisteminin Termodinamik Analizi

Şekil 1’de verilen gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenlerine ayrılmış ve sistemin kojenerasyon işletmesinden alınan gerçek sıcaklık, basınç, kütle akış debisi verileri ile, enerji ve ekserji değerleri Şekil 1’de verilen hal numaraları dikkate alınarak Tablo 3’te verilmiştir. Gaz motorunda üretilen her 1 kW elektrik için, %60 metan içerikli 0.387 m³ biyogaz tüketilmektedir. Gaz motoruna giren yakıt ve havanın toplam ekserjisi 4054 kW olarak bulunmuştur. Tablo 4’te gaz motorlu kojenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analiz sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlardan hareketle aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

Tablo 3. Biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi işletme verileri, termodinamik özellikler, enerji ve ekserji değerleri (Hal numaraları Şekil 1 dikkate alınarak verilmiştir).

No	Akışkan	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Kütle debisi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg°C)	Toplam özgül ekserji (kJ/kg)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
0	Hava	1.00	25.00	-	298.40	5.6990	0.00	0.00	0.00
0'	Su	1.00	25.00	-	104.20	0.3648	0.00	0.00	0.00
0''	Çamur	1.00	25.00	-	104.20	0.3648	---	---	---
0'''	Biyogaz	1.00	25.00	-	-4650	11.620	---	---	---
0''''	Lub oil	1.00	25.00	-	-	-	0.00	-	0.00
46	Biyogaz	1.10	42.00	0.129	-4612.0	11.69	31383.21	4.96	4048.43
47	Biyogaz	1.10	42.00	0.129	-4612.0	11.69	31383.21	4.96	4048.43
48	Su	5.25	75.80	6.96	317.10	1.023	16.71	4444	349.0
49	Su	6.20	75.80	20.88	317.20	1.023	16.81	4447	351.1
50	Su	6.10	82.80	20.88	346.40	1.106	21.31	5057	444.9
51	Su	3.40	88.0	20.88	368.10	1.167	24.73	5510	516.4
52	Su	2.80	88.40	15.61	369.70	1.172	24.97	4145	389.7
53	Su	7.60	88.50	15.61	370.40	1.173	25.49	4155	397.9
54	Su	7.50	72.40	15.61	302.90	0.9815	14.90	3101	232.7
55	Su	7.30	77.90	15.61	325.90	1.048	18.20	3461	284.2
56	Su	7.20	78.50	15.61	328.50	1.055	18.59	3502	290.2
57	Su	4.55	50.00	11.28	209.20	0.7021	4.523	1185	51.02
58	Su	4.50	52.10	11.28	218.10	0.7293	5.228	1284	58.97
59	Su	1.10	50.00	11.28	208.80	0.7017	4.165	1180	46.98
60	Luboil	4.69	100.6	20.0	166.30	0.4974	18.09	3326	361.9
61	Luboil	4.50	89.00	20.0	140.80	0.428	13.25	2816	265.1
62	Luboil	1.00	85.00	20.0	132.00	0.4036	11.74	2640	234.7
63	Luboil	6.90	87.00	20.0	132.90	0.4158	12.48	2659	249.7
64	Hava	1.00	25.00	1.387	298.40	5.699	0.00	0.00	0.00
65	Hava-yakıt	1.00	25.00	1.50	298.40	5.699	31367.43	0.00	4046.40
66	Hava-yakıt	1.90	116.9	1.50	391.00	5.785	31434.21	138.9	4055.01
67	Hava-yakıt	1.90	51.00	1.50	324.60	5.599	31423.38	39.21	4053.62
68	Egzoz	2.40	460.0	1.50	749.20	6.374	249.4	676.1	374.1
69	Egzoz	1.17	360.6	1.50	642.70	6.424	128.1	516.5	192.1
70	Egzoz	1.00	65.00	1.50	353.80	5.869	4.518	60.34	3.661

- Gaz motoruna giren hava-yakıt karışımının toplam ekserjisi, (5) nolu eşitlikte geliştirilen yaklaşımdan hareketle, yağlama yağı ve motor soğutma suyunun ekserjilerinin de eklenmesiyle 4054 kW’tan 4594

kW’a yükselmektedir. Gaz motorunun ekserji verimi (3) nolu eşitlikte ifade edilen yaklaşımla %24.9 bulunurken, (4) nolu eşitlikte geliştirilen ve aynı zamanda kojenerasyon sisteminin ekserji verimini ifade eden yaklaşımla %26.6 olarak

bulunmuştur. (4) nolu eşitlikle ifade edilen yaklaşım ekserji değerlendirme kriteri açısından bakıldığında kojenerasyon sistemi için daha anlamlı bir verim ifadesidir.

- Gaz motorlu kojenerasyon sistemine giren toplam ekserjinin %24.9'u (1000 kW) elektrige çevrilmiştir. Kojenerasyon sisteminin toplam sıcak su üretimi toplam ekserji girişinin sadece %1.8'ini (71.5 kW) oluşturmaktadır. Sisteme giren toplam ekserjinin %73.6'lık (2982 kW) kısmı ise yıkıma uğramaktadır.
- Gaz motorlu kojenerasyon sisteminin ekserji verimi %26.6 olarak bulunmuştur. Gaz motorunun ekserji yıkımı, sisteme giren toplam ekserjinin %73.6'sını, sistemin toplam ekserji yıkımının ise %94.6'sını oluşturmaktadır. Gaz motorunun ekserji yıkımı, tersinmezliği yüksek yanma prosesinden, ısı kayıplarından ve sürtünmeden kaynaklanmaktadır.

- Turboşarj ünitesinin kompresör ve türbininin ekserji verimleri sırasıyla %72.1 ve %87.7 olarak bulunmuştur. P11, P12, P13 ve P14 pompalarının ekserji verimleri de sırasıyla %78, %79, %76.9 ve %80.6 olarak bulunmuştur. Egzoz gazı ısı değiştiricisi (EGHE) ve ara soğutucunun (BGHE) ekserji verimleri sırasıyla %37.9 ve %48.8 olarak bulunmuştur. Sistemdeki ısı değiştirici ünitelerdeki ekserji yıkımı, birbirine karışmayan iki akışkanın arasındaki yüksek sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Kojenerasyon sistemindeki diğer ısı değiştiricilerin (HE-1 ve HE-2) ekserji kayıp yüzdeleri çok fazla değildir. Bunun temel nedeni, bu proseslerde düşük sıcaklıkta su kullanımındır.
- Kojenerasyon sisteminin termal verimi, (17b) nolu eşitlikten hareketle %63 olarak bulunmuştur. Gaz motorunun termal verimi ise (17a) nolu eşitlikten %43.3 olarak bulunmuştur. Bu değer, üretici firma tarafından verilen motor verim değer aralığıyla uyumludur (Deutz, 2011).

Tablo 4. Biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analiz sonuçları (Hal numaraları Şekil 1 ve Tablo 3 dikkate alınarak verilmiştir).

Sistem bileşeni	Hal no	\dot{Q} (kW)	\dot{W} (kW)	$\dot{E}x_F$ (kW)	$\dot{E}x_P$ (kW)	$\dot{E}x_y$ (kW)	ε (%)
Türbin (T)	68-69	-	159.6	182.0	159.6	22.40	87.7
Kompresör (T)	65-66	-	138.9	138.9	100.2	38.70	72.1
Pompalar							
P11	48-49	-	2.714	2.714	2.134	0.580	78.6
P12	52-53	-	10.34	10.34	8.205	2.135	79.1
P13	59-57	-	5.247	5.247	4.036	1.211	76.9
P14	62-63	-	18.55	18.55	14.95	3.597	80.6
Ara soğutucu							
Su hattı	57-58	99.45	-	16.28	7.95	8.33	48.8
Hava-yakıt hattı	66-67	-99.66	-				
EGHE							
Su hattı	50-51	453.2	-	188.4	71.5	116.9	37.9
Egzoz hattı	69-70	-456.1	-				
HE-1							
Soğuk su hattı	49-50	609.7	-	165.2	93.8	71.4	56.8
Sıcak su hattı	53-54	-1054	-				
HE-2							
Soğuk su hattı	55-56	41.09	-	12.00	6.0	6.0	50.0
Sıcak su hattı	58-59	-104.7	-				
LOHE							
Yağ hattı	60-61	510.4	-	96.8	51.5	45.3	53.2
Su hattı	54-55	-359.4	-				
Gaz motoru	-	-	1000	4053.62 ¹	1000 ¹	3053.62 ¹	24.87 ¹
					1071.5 ²	2982.12 ²	26.65 ²
				4593.52 ³	2125.7 ³	1927.92 ³	46.61 ³
Kojenerasyon	-	1713.8 -2073.9	1000	4053.62	1071.5	2982.12	26.65

^{1,2,3}Değerler sırasıyla, biyogaz motoru ekserji verimi için (18), (19), ve (20) numaralı eşitlikler kullanılarak bulunmuştur.

Biyogaz Beslemeli Gaz Motorlu Kojenerasyon Sisteminin Termoeconomik Analizi

GASKI Biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi projelendirme ve inşaat çalışmaları 2005 yılında başlamış ve bir yıl içinde tamamlanarak 2006 yılında devreye alınmıştır. Kojenerasyon sistemi işletme müdürlüğünden alınan bilgiler doğrultusunda sistemin

toplam ilk yatırım ve kurulum maliyeti 1.237.063 Amerikan doları (\$) olarak belirlenmiştir. Sistemin ekonomik ömrü işletmeye alındığı tarihten itibaren 25 yıl olarak düşünülmüştür (Bejan vd, 1996). Kojenerasyon sistemi için ortalama kapasite faktörü (τ), sistemin toplam yıllık 8760 çalışma saati üzerinden, 8030 saat çalıştığı hesaplanarak 0.917 bulunmuştur. Tablo 5'te kojenerasyon sistemi alt bileşenleri için ilk

yatırım ve işletme ve bakım maliyetleri ilişkili maliyet oranları detaylı olarak verilmiştir. Şekil 1’de verilen gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenlerinin ekserji ve maliyet akımları, ve sistemdeki temel kütle akışlarının birim ekserji maliyetleri, Tablo 2’de verilen ekserjiye bağlı maliyet denklemlerinin çözülmesi sonucu bulunmuş ve Tablo 6’da verilmiştir.

Gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı maliyet parametreleri ise Tablo 7’de verilmektedir. Bu tabloda her bir bileşenin ekserjiye bağlı yakıt (F) ve ürün (P) maliyetleri Tablo 6’da verilen akım maliyet değerleri ve Tablo 5’te verilen toplam yatırım maliyetleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenleri için ilk yatırım (İY) ve işletme ve bakım maliyetleriyle (İB) ilişkili maliyet oranları (Maliyet değerleri 2006 yılı ortası Amerikan Doları (\$) ortalama değeri esas alınarak çıkarılmıştır).

Sistem bileşeni	İYM (\$)	\dot{Z}_k^{IY} (\$/saat)	\dot{Z}_k^{IB} (\$/saat)	\dot{Z}_k^{Toplam} (\$/saat)
Kompresör (T)	38.461,5	0.09	0.005	0.095
Türbin(T)	38.461,5	0.09	0.005	0.095
P11	2.412,6	0.006	0.0002	0.0062
P12	1.853,1	0.0043	0.0009	0.0052
P13	1.573,4	0.0036	0.0007	0.0043
P14	2.237,81	0.005	0.0001	0.0051
Ara soğutucu	17.482,5	0.04	0.008	0.048
EGHE	19.580,4	0.05	0.001	0.051
HE-1	8.898,6	0.02	0.0004	0.0204
HE-2	8.898,6	0.02	0.0004	0.0204
LOHE	6.993,0	0.02	0.0004	0.0204
Gaz motoru	419.580,4	0.96	0.1	1.06
Diğer sistem bileşenleri	3.496,5	0.0084	0.0006	0.0091
Toplam sistem bileşenleri İYM	569.930,1			
Kurulum maliyeti	184.615,4	-	-	-
Boru tesisatı ve döşeme maliyeti	195.804,2	-	-	-
Kontrol sistemi	67.132,9	-	-	-
Elektrik tesisatı toplam maliyeti	72.727,3	-	-	-
Toplam saha içi maliyet	1.079.720,3	-	-	-
Toplam saha dışı maliyet	69.930,1	-	-	-
Toplam maliyet	1.149.650,4	-	-	-
Toplam dolaylı maliyet	69.930,1	-	-	-
Toplam sabit sermaye yatırımı	1.219.580,5	-	-	-
Diğer giderler	17.482,5	-	-	-
Toplam yatırım maliyeti	1.237.062,9	-	-	-

Tablo 6. Biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenleri için ekserji ve maliyet akımları ve temel kütle akışlarının birim ekserji maliyetleri.

Akış no	\dot{E}_x (kW)	c (€/m ³)	\dot{C} (\$/saat)
Biyogaz ve hava karışımı (kompresör ünitesi girişi)	4046.40	13.627	92.451
Biyogaz ve hava karışımı (motor girişi)	4053.62	15.560	105.769
Sıcak su (Egzoz gazı ısı değiştiricisi çıkışı)	516.40	3.804	16.917
Egzoz gazı (Motor çıkışı)	374.10	0.003	31.690
Egzoz gazı (Türbin çıkışı)	192.10	0.003	16.273
Sistem alt bileşeni	\dot{E}_x (kW)	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/saat)
Kompresör (Turboşarj)	138.9	25.0	12.390
Türbin (Turboşarj)	159.6	23.53	14.236
Gaz motoru (Elektrik)	1000.0	25.0	90.00
\dot{W}_{P11}	2.714	25.0	0.2443
\dot{W}_{P12}	10.34	25.0	0.9306
\dot{W}_{P13}	5.247	25.0	0.4722
\dot{W}_{P14}	18.55	25.0	1.6695

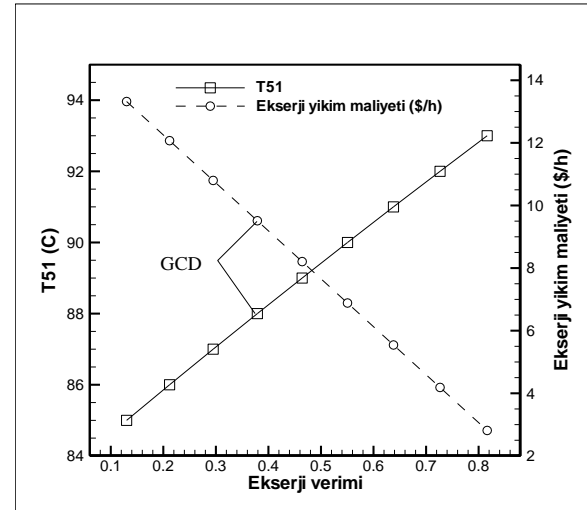
Tablo 7. Gaz motorlu kojenerasyon sistemi alt bileşenlerinin ekserjiye bağlı yakıt (F) ve ürün (P) maliyetleri, ekserji yıkım maliyetleri, eksergoekonomik faktörleri ve toplam yatırım maliyetleri.

Sistem alt bileşeni	$c_{f,k}$ (\$/GJ)	$c_{p,k}$ (\$/GJ)	$\dot{E}_{x,y}$ (kW)	\dot{C}_y (\$/saat)	$\dot{Z}_k^{\text{Toplam}}$ (\$/saat)	f (%)
Kompresör (T)	25.00	30.80	38.70	3.76	0.095	2.46
Türbin (T)	23.53	27.0	22.40	1.90	0.095	4.77
Ara soğutucu	11.05	47.8	8.33	0.33	0.0062	1.43
EGHE	23.53	62.24	116.94	9.91	0.0052	0.51
LOHE	38.28	58.60	45.30	6.24	0.0043	0.33
HE-1	9.28	18.25	71.40	2.39	0.0051	0.85
HE-2	38.28	49.50	6.00	0.83	0.048	2.41
P11	25.00	39.19	0.58	0.05	0.051	10.70
P12	25.00	32.87	2.14	0.19	0.0204	2.65
P13	25.00	33.73	1.21	0.11	0.0204	3.83
P14	25.00	34.22	3.60	0.32	0.0204	1.56
Gaz motoru	7.25	25.00	2982.12	77.83	1.06	1.34

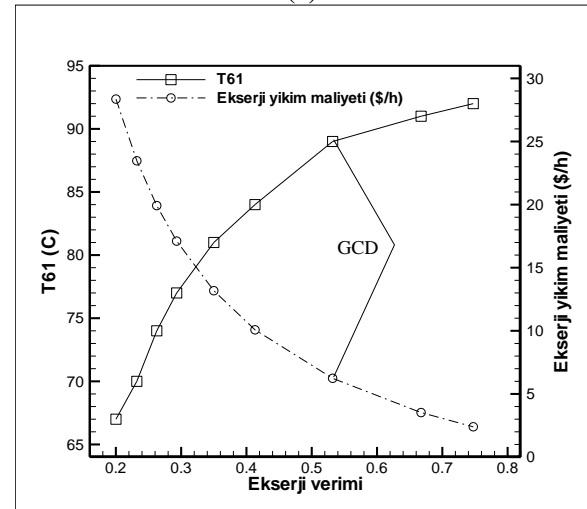
Gaz motorlu kojenerasyon sisteminin termoekonomik analiz sonuçlarına göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Biyogazın kojenerasyon sistemine girişteki birim maliyeti 13.63 ¢/m^3 (24.13 krş/m^3)'tür. Yakıt-hava karışımındaki havanın maliyeti ihmal edildiğinden bu değer biyogazın sisteme girişteki birim maliyeti olarak kabul edilebilir.
- Gaz motoruna girişte biyogazın birim maliyeti 15.56 ¢/m^3 (27.54 krş/m^3)'e yükselmektedir. Sistemde üretilen her 1 kW elektrik için, %60 metan içerikli 0.387 m^3 biyogaz tüketildiğinden, 1000 kW-saat elektrik üretimi için biyogazın toplam tüketim maliyeti 60.22 \$ (106,6 TL) olarak bulunmuştur. Türkiye'de 1 kW-saat elektrik üretimi için doğal gaz maliyeti ortalama 9.04 ¢ (16.0 krş) olarak belirlenmiştir (Enerji Enstitüsü, 2012). Doğal gaz beslemeli bir kojenerasyon tesisinde üretilen 1000 kW-saat elektrik için toplam yakıt maliyeti 90.40 \$ (160,0 TL) olarak alınabilir. Ancak, biyogaz, kojenerasyon sisteminin de içinde bulunduğu atık su arıtma tesisinde, tamamen yararlı ve sürdürülebilir bir sistem çıktısı olarak üretildiğinden, biyogazın yakıt olarak tüketim bedeli gerçekte atık su çamurunun stabilizasyon maliyetini içermektedir.
- Kojenerasyon sisteminde üretilen elektriğin 1 kW-saat'i 9.0 ¢ (15.9 krş)'e üretilmektedir. Toplam 1000 kW-saat elektrik üretim bedeli 90 \$ (159,3 TL) olarak bulunmuştur. TEDAŞ'ın sanayi işletmelerine uyguladığı tarifinin $0.103 \text{ $/kW-saat}$ ($17,55 \text{ kr/kW-saat}$) (TEDAŞ, 2011) olduğu düşünülürse, atık su arıtma tesisi içindeki kojenerasyon sisteminde biyogazdan üretilen elektriğin daha ucuza mal edildiği açıkça görülebilir.
- Kojenerasyon sisteminde ekserji yıkım maliyeti en yüksek bileşenin gaz motoru olduğu görülmektedir ($77.83 \text{ $/saat}$). Diğer sistem bileşenleri göz önüne alındığında gaz motorunun nispeten düşük eksergoekonomik faktörü ($\%1.34$), (16) nolu

eşitlikteki ifadeden hareketle, ekserji yıkım maliyetinin çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



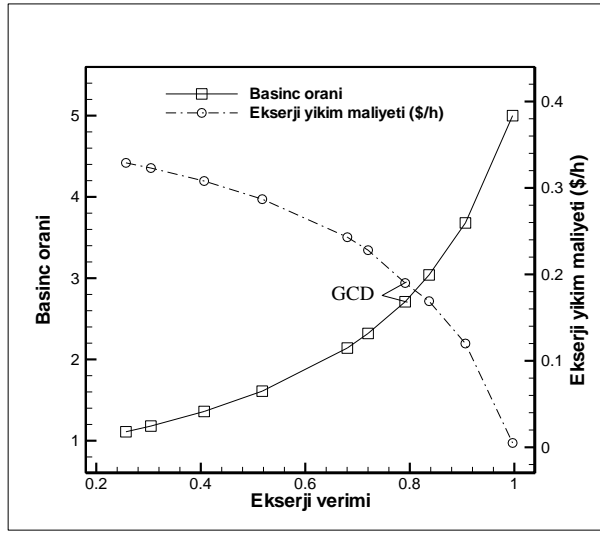
(a)



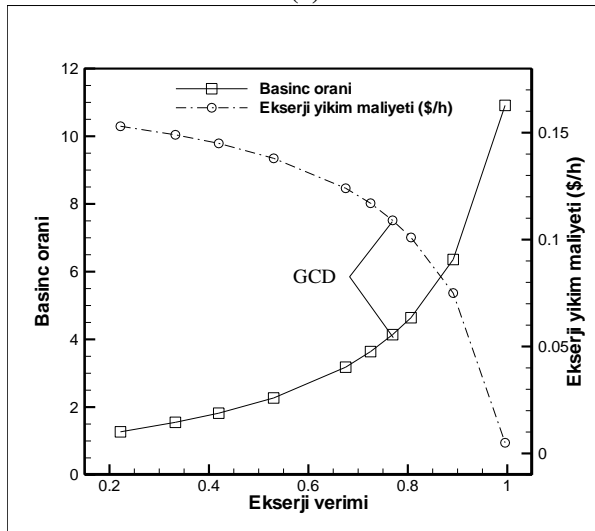
(b)

Şekil 2. (a) Proses suyu çıkış sıcaklığına göre EGHE, (b) Yağlama yağı çıkış sıcaklığına göre LOHE, ekserji verimleri ve ekserji yıkım maliyetlerinin karşılaştırılması.

- Sistemde ekserji yıkım maliyetleri, gaz motorundan sonra, diğer sistem bileşenlerine nazaran daha yüksek olan bileşenlerin egzoz gazı ısı değiştiricisi (EGHE) (9.91 \$/saat) ile yağlama yağı ısı değiştiricisi (LOHE) (6.24 \$/saat) olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin ekserji yıkım oranlarıyla doğru orantılı olarak yüksek yıkım maliyetlerine sahip oldukları görülebilir. Şekil 2’de temel üretim akışları göz önüne alınarak, (a) EGHE için proses suyu çıkış sıcaklığına, (b) LOHE için ise yağlama yağı çıkış sıcaklığına göre ekserji verim değerleri ile ekserji yıkım maliyetleri karşılaştırılmaktadır.



(a)



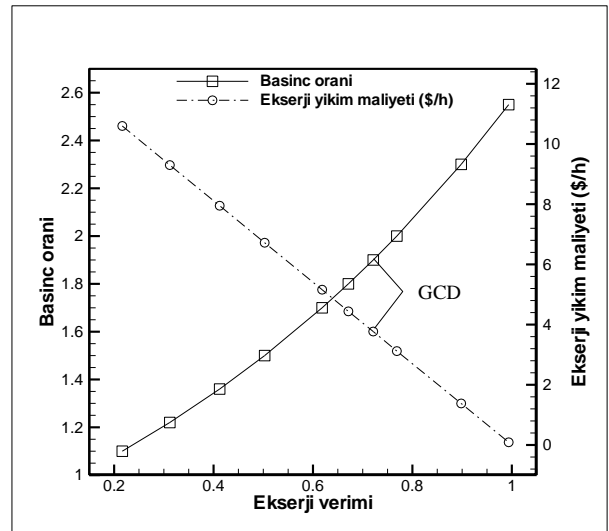
(b)

Şekil 3. (a) P12, (b) P13 pompalarının çıkış/giriş basınç oranları değişimine göre ekserji verimleri ve ekserji yıkım maliyetlerinin karşılaştırılması.

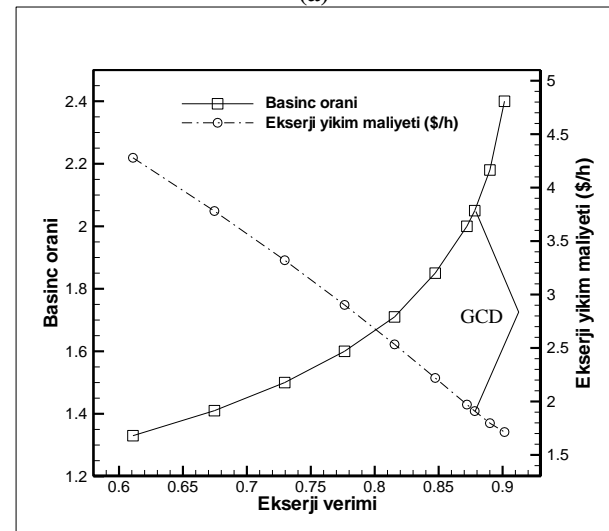
- Sistemin en düşük ekserji yıkım maliyetlerine sahip bileşenleri olan P12 (0.19 \$/saat), P13 (0.11 \$/saat) ve P14 (0.32 \$/saat) pompalarının, bu değerlerle ters orantılı olarak diğer sistem bileşenlerine nazaran yüksek eksergoekonomik faktör değerleri (bkz. Tablo 7), bu bileşenlerin işletme ve bakım masraflarının yüksek olmasından

kaynaklanmaktadır. Şekil 3’te (a) P12 ve (b) P13 pompalarının çıkış/giriş basınç oranları değişimi dikkate alınarak ekserji verimleri ve ekserji yıkım maliyetleri karşılaştırılmaktadır. Şekilden de görülebileceği üzere, P12 ve P13 pompalarının çıkış basınçları arttıkça ekserji verimleri artmakta, ekserji yıkım maliyetleri ise azalmaktadır. Ekserji yıkım maliyetlerinde oluşan azalma, basıncı artan akışkanın ekserjiye bağlı üretim maliyetini azaltırken, genel sistem verimini de arttırmaktadır.

- Turboşarj ünitesinin kompresör ve türbin bileşenleri, sistemde yüksek ekserji verimiyle çalışan bileşenler olmakla beraber, nispeten yüksek eksergoekonomik faktörleri, bu bileşenlerin işletme ve bakım masraflarından kaynaklanmaktadır. Şekil 4’te (a) turboşarj kompresörünün hava-yakıt karışımı çıkış/giriş, (b) turboşarj türbininin ise egzoz gazı giriş/çıkış basınç oranları değişimine göre ekserji verimleri ile ekserji yıkım maliyetleri karşılaştırılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4. (a) Turboşarj kompresörünün hava-yakıt karışımı çıkış/giriş, (b) Turboşarj türbininin egzoz gazı giriş/çıkış basınç oranları değişimine göre ekserji verimleri ve ekserji yıkım maliyetlerinin karşılaştırılması.

Şekilden de görüleceği üzere, turboşarj kompresöründe hava-yakıt karışımı çıkış basıncı arttırıldıkça, kompresörün ekserji verimi artmakta ve ekserji yıkım maliyeti azalmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, hava-yakıt karışımı için kompresör çıkış basıncının ve dolayısıyla sıcaklığının (motora giriş şartları) erken motorda müsaade edilen değer üstüne çıkmasını önlemektir. Turboşarj türbini egzoz gazı giriş basıncı arttıkça, Şekil 4'den görüleceği üzere sistemin ekserji verimi artmakta ve buna bağlı olarak ekserji yıkım maliyeti azalmaktadır. Bu azalma, türbinin ürettiği işin maliyetini de düşürecektir.

Termoekonomik analiz ve değerlendirme çalışmasından açıkça görülebileceği üzere, hali hazırda çalışan bir kojenerasyon sistemini oluşturan bileşenlerin maliyet akışları iki temel unsur üzerine yapılmaktadır: 1. İşletme ve bakım maliyetleri, 2. Ekserji analizine bağlı olarak elde edilen ekserji yıkım oranlarının maliyetleri. İşletme ve bakım maliyetleri, bu çalışmada ele alınan biyogaz beslemeli gaz motorlu kojenerasyon sisteminde olduğu gibi, temel ekonomik kabuller gereği (Bejan vd., 1996), sabit bir bakım faktörü ile belirlenebilir. Ancak ekserjiye bağlı yıkım oranları belirlenmedikçe, sistemin gerçek maliyet performansını belirleyen etkenler, yani sistem tersinmezliklerinden kaynaklanan giderlere ödenen para sadece enerji analiziyle hesaplanamaz. Bu noktada ekserji analizine bağlı olarak geliştirilen ekonomik yaklaşımların değeri açıkça ortaya çıkmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, Gaziantep GASKİ atık su arıtma tesisinde üretilen biyogazı yakıt olarak kullanan biyogaz beslemeli gaz motorlu bir kojenerasyon sistemi, gerçek işletme verileri kullanılarak SPECO metodu temelinde geliştirilen eksergoekonomik ilişkiler yardımıyla analiz edilmiştir. Gaz motorlu kojenerasyon sistemine giren toplam ekserjinin %24.9'u (1000 kW) elektriğe çevrilmiştir. Kojenerasyon sisteminin toplam sıcak su üretimi toplam ekserji girişinin sadece %1.8'ini (71.5 kW) oluşturmaktadır. Sistemde üretilen her 1 kW-saat elektrik için, %60 metan içerikli 0.387 m³ biyogaz tüketildiğinden, 1000 kW-saat elektrik üretimi için biyogazın toplam tüketim maliyeti 60.22 \$ (106,6 TL) olarak bulunmuştur. Sistemde üretilen 1000 kW-saat elektrik üretim bedeli 90.0 \$ (159,3 TL) olarak bulunmuştur. TEDAŞ'ın sanayi işletmelerine uyguladığı tarifenin 0.103 \$/kW-saat (17,55 kr/kW-saat) olduğu düşünülürse, atık su arıtma tesisi içindeki kojenerasyon sisteminde biyogazdan üretilen elektriğin daha ucuza mal edildiği açıkça görülebilir. Yapılan termoekonomik analiz çerçevesinde, sistem alt bileşenlerinde meydana gelen ekserji yıkımlarının maliyeti açıkça hesaplanabilmekte ve böylece her bir sistem bileşeninin yakıt (F) – ürün (P) ilişkisi temelinde gerçek maliyet

akışları ortaya konulabilmektedir. Bu maliyet akışları sistemin iyileştirilmesi için gerekli alt yapıyı hazırlaması bakımından son derece önemlidir.

TEŞEKKÜR

110M053 nolu TUBITAK projesi kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmaya katkılarından ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na ve çalışma için gerekli verilerin alınmasında yardımlarını esirgemeyen Gaziantep GASKİ'ye teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR

Abusoglu A., and Kanoglu M., Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2295-2308, 2009.

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., *Thermal design and optimization*, 1st ed., John Wiley & Sons, 1996.

Deutz, TCG 2020 – The Gas Engine, www.deutz.de (Erişim tarihi: 15 Ekim 2011).

Enerji Enstitüsü, 2012, <http://enerjiensitüsü.com/2012/02/14/> (Erişim tarihi: 17 Şubat 2012).

Jenbacher, 2011, <http://www.jenbacher.com> (Erişim tarihi: 14 Eylül 2011).

Lamas, W. Q., Silveira, J. L., Giacaglia, G. E. O., and Reis, L. O. M., Development of a methodology for cost determination of wastewater treatment based on functional diagram, *Applied Thermal Engineering* 29, 2061-2071, 2009.

Lazzaretto A., and Tsatsaronis G., SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy* 31, 1257-1289, 2006.

McKendry, P., Review Paper – Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, *Bioresource Technology* 83, 47-54, 2002.

Mueller, G. P., Landfill gas application development of the caterpillar G3600 spark-ignited gas engine, *Trans. ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power* 117 (4), 820-825, 1995.

TEDAŞ, 2011, www.tedas.gov.tr (Erişim tarihi: 20 Aralık 2011).

Wark, K.J., *Advanced Thermodynamics for Engineers*, 1st ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1995.



Ayşegül ABUŞOĞLU, Malatya’da doğdu. 1994 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 1994-2000 yılları arasında sanayide proses suyu hazırlanması, evsel ve endüstriyel su ve atık su arıtımı projelendirilmesi ve marketing işinde çalıştı. 2000 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Ana bilim dalında yüksek lisans çalışmasına başladı ve 2002 yılında yüksek lisansını tamamladı. Aynı yıl Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2008 yılında doktora çalışmasını tamamlayan araştırmacı 2010 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne yardımcı doçent olarak atanmıştır ve halen bu görevini sürdürmektedir. Çalışma alanları; termodinamik, ısı transferi, enerji dönüşüm ve güç üretim sistemleri, kojenerasyon, ekserji analiz ve uygulamaları, eksergoekonomi, atıktan enerji ve hidrojen eldesi çalışmaları.



Sinan Demir, Gaziantep’te doğdu. 2010 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Aynı yıl Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Ana bilim dalında başladığı yüksek lisans çalışmasına halen devam etmektedir.



Mehmet KANOĞLU, Gaziantep’te doğdu. 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 1993-2000 yılları arasında Manisa, Celal Bayar Üniversitesi’nde araştırma görevlisi olarak çalıştı, bu arada 1996 yılında yüksek lisansını ve 1999 yılında doktora çalışmasını Amerika Birleşik Devletleri’nde bulunan University of Nevada, Reno’da tamamladı. 2000 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne yardımcı doçent olarak atandı. 2002 yılında doçent ünvanını aldı, 2006-2007 yılları arasında Kanada’da University of Ontario, Institute of Technology’de misafir öğretim üyesi olarak bulundu. 2008 yılında profesör ünvanını aldı ve halen Gaziantep Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesi olarak çalışmaya devam etmektedir. Çalışma alanları; termodinamik, ısı transferi, içten yanmalı motorlar, yenilenebilir enerji, ekserji analizi, güç üretim tesisleri, kojenerasyon, enerji korunumu ve mühendislik eğitimi.