



DİZEL MOTORLU KOJENERASYON SİSTEMLERİNİN EMİSYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ayşegül ABUŞOĞLU*, Mehmet KANOĞLU*

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

(Geliş Tarihi: 25. 09. 2008, Kabul Tarihi: 18. 11. 2008)

Özet: Endüstriyel işletmeler üretimde kullanılan yakıtların yanma sonrası çevreye yaydıkları zehirli gazlar ve diğer zehirli bileşikler nedeniyle insan ve çevre sağlığı açısından son derece zararlı etkiler taşımaktadırlar. Dizel motorlu kojenerasyon sistemleri, elde edilme ve taşınma kolaylıkları nedeniyle ağır yakıt (fuel oil) kullanmaktadır ve buna bağlı olarak egzoz gazları istenmeyen bir şekilde katı partiküller, kükürt oksit (SO_x) ve azot oksit (NO_x) bileşikleri gibi zararlı emisyonları çevreye bırakmaktadır. Bu emisyonlar resmi yönetimlerce uluslararası çevre protokollerinde izin verilen maksimum değerlerin altında çevreye verilmelidir. Bu çalışmada, bir dizel motorlu kojenerasyon sisteminin emisyon karakteristikleri ve kükürt oksit ve azot oksit bileşikleri arıtma sistemlerinin çalışması, ekserji analizi temel alınarak ekserji ve çevresel etkiler arasında kurulan bağlantı ekseninde incelenmiştir. Egzoz emisyon değerlendirmesi, yakıt tasarrufu analiz metodu ve ekserji verimi temel alınarak yapılmıştır. Egzoz emisyon değerlerinin düşürülmesi yakıt tasarrufuna benzetme yapılarak ve emisyon farkı analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçları, güç ve ısı ihtiyacının ayrı sistemlerle üretilmesi durumunda, dizel motorlu kojenerasyon sistemine göre yakıt tüketiminde %34.8 bir artış söz konusu olacağını göstermiştir. Bunun yanında dizel motorlu kojenerasyon sistemi azot oksit (NO_x), karbondioksit (CO_2) ve kükürt dioksit (SO_2) emisyonlarında, ayrı güç ve ısı üretim sistemlerine göre sırasıyla %87.6, %50 ve %41.3 bir azalma sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon, dizel motor, ağır yakıt, emisyon, ekserji, çevresel etki.

EMISSION CHARACTERISTICS ANALYSIS OF DIESEL ENGINE POWERED COGENERATION

Abstract: All industrial plants cause environmental pollution by the emission of detrimental gases and other hazardous components, which are harmful for human beings and other organisms. Diesel engine powered cogeneration (DEPC) plants burn heavy fuel oil which can be available and transported easily and the exhaust involve undesirable emissions such as solid particulates, sulfur oxides (SO_x) and nitrite oxides (NO_x). These emissions must remain below the maximum permissible levels defined by official organizations and international protocols. In this paper, exhaust emission characteristics of DEPC plants and the operation of De SO_x (desulphurization) and De NO_x (denitrification) treatment units in these facilities are studied based on the exergy analysis and the linkages between exergy and environmental impacts. Exhaust emission assessment is performed by using fuel savings analysis method and exergetic efficiency. Exhaust emission reduction is expressed using an analogy to fuel savings. The results show that using separate units of power and heat production increase the fuel consumption by 34.8% with respect to existing DEPC plant and the DEPC plant can reduce NO_x , CO_2 , and SO_2 emissions by 87.6%, 50% and 41.3%, respectively in comparison to separate power and heat productions

Keywords: Cogeneration, diesel engine, heavy fuel oil, emission, exergy, environmental effects

SEMBOLLER

\dot{W}	güç (elektrik) [kW]	β^*	kritik ısı-güç oranı
\dot{Q}	ısı oranı [kW]	se	ayrı güç (elektrik) üretim sistemi
LHV	alt ısı değeri [kJ/kg]	sh	ayrı buhar (ısı) üretim sistemi
\dot{m}	kütle debisi [kg/s]	e	elektrik
M	emisyon miktarı [mg/Nm ³]	h	ısı
η	birinci kanun verimi	f	yakıt
ε	ikinci kanun (ekserji) verimi		
θ	özgül emisyon miktarı [g/kW-saat]		
β	ısı-güç oranı		

GİRİŞ

Endüstriyel sektörler, elektrik tüketiminde ilk sırada yer almaktadırlar. Gelişmekte olan ülkelerde elektrik ihtiyacı her geçen gün büyük bir hızla artmaktadır ve bu artışın gelecekte de süreklilik göstermesi beklenmektedir. Bir çok hükümet, enerji politikalarını, yatırımcıları elektrik üretimi konusunda teşvik etmek için yeniden gözden geçirmektedir. Bu doğrultuda, kendi elektrik üretimini yapmak isteyen endüstriyel oluşumlar için cazip ekonomik ortam, enerji tasarrufunu mümkün kılan birleşik ısı ve güç üretimiyle (kojenerasyon) mümkün olabilmektedir.

Güç üretimi yapan tesisler için en büyük handikap, bu tesislerin zehirli egzoz gazlarının ve diğer zehirli bileşiklerin emisyonlarından kaynaklanan çevresel kirliliktir. Güç üretim ve kojenerasyon sistemleri, söz konusu emisyon değerlerinin düzeylerine göre insan sağlığı ve canlı organizmalar için oldukça büyük tehlike arz edebilmektedir (Frangopoulos, 1993; EPA, 2000). Kojenerasyon veya birleşik ısı ve güç üretimi, endüstriyel işletmelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamada ekonomik avantajlar taşıması 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 emisyon değerlerini düşürmesi dolayısıyla toplam enerji kullanım verimini arttırmaktadır (Spiewak, 1997; Roussaki ve Couch, 2000). Öteleme pistonlu motorlarla tahrik edilen kojenerasyon sistemleri genellikle 2.5–50 MW aralığında güç üretimi için tercih edilirler (Energy Nexus Group, 2000). Bu sistemler, paket sistem çözümleri sunmaları ve montajlarının kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan öteleme pistonlu, içten yanmalı motorlar, turboşarjlı, ara soğutmalı endüstriyel motorlardır ve genel olarak standart dizel motor bloklarından oluşmaktadırlar. Yakıt olarak çoğunlukla ağır yakıt (fuel oil no.6) tercih edilmesinin yanında, doğal gaz, motorin, LPG, propan ve biyogaz da kullanılmaktadır. Dizel motor tahrikli kojenerasyon uygulamalarında, düşük maliyet ve kolay elde edilebilirlik bakımından ağır yakıt ve doğal gaz kullanımı ilk sırayı almaktadır (Pulkrabek, 1997; Stenhede, 2004).

Çevresel kirliliğin en önemli bölümünü, içten yanmalı motorlardan çıkan egzoz gazı emisyonları oluşturmaktadır. Motor içinde gerçekleşen yanma işlemi neticesi çevreye verilen egzoz gazının içeriğinde karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) gibi temel yanma ürünlerinin yanında, çok çeşitli kirlilik bileşenleri de bulunur. Bu bileşenlerden en önemli üçü; karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve azot oksit (NO_x) bileşenleridir (Abdel-Rahman, 1998). Normal şartlarda azot soy gazdır fakat dizel motorlardaki yanma işlemlerinde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda oksijenle birleşerek azot oksit bileşenleri (NO_x) oluşturur. Gaz motorlarında,

yanma sıcaklıkları dizel motorlardaki kadar yüksek olmadığından NO_x oluşumu için gerekli şartlar meydana gelmez. Diğer taraftan, karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon oluşumları, gaz motorlu sistemlerin egzoz emisyonlarında, dizel motorlu sistemlere göre çok daha yüksektir (Stenhede, 2004). İçten yanmalı motorların egzoz emisyonlarında rastlanan diğer önemli kirleticiler, aldehitler, kurşunlu yakıtların kullanımı sonucu açığa çıkan kurşun bileşikleri, kükürt dioksit (SO₂) ve genellikle dizel motorların emisyonlarında bulunan partiküllerdir.

Ağır yakıtlar, çoğunlukla dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinde kullanılan fosil yakıt türevleridir. Bu yakıtlar damıtılmış (distillate) ve artık (residual) yakıtlar olmak üzere iki önemli kategoriye ayrılır. Damıtılmış yakıtlar, artık yakıtlara göre daha uçucu ve daha az akışkandır. İhmal edilebilir düzeyde azot ve kül içeriklerine ek olarak, genellikle ağırlıkça %0.3 den daha az kükürt ihtiva ederler (Yen, 1979). Kerosen ve motorin gibi damıtılmış yakıt türevleri temel olarak evsel ve küçük ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Damıtılmış yakıtlara göre daha akışkan ve daha az uçucu olan artık ağır yakıtlar yanmada uygun atomizasyon dağılımını ve kullanım kolaylığını sağlamak amacıyla işlem öncesi ısıtılmaya ihtiyaç duyarlar. Artık yakıtlar, büyük çoğunluğu güç üretim tesisleri olmak üzere, genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Speight ve Moschopedis, 1979; The Petroleum Testing Group, 2004).

Ağır yakıtların endüstriyel güç üretiminde kullanılması iki önemli problemi gündeme getirmektedir: zehirli emisyonlar ve sınırlı yakıt rezervlerinin günden güne daha da azalması. Isı ve güç ihtiyacını aynı yakıt kaynağını kullanarak birlikte üreten kojenerasyon sistemleri söz konusu problemlerin çözümü için doğru adres olarak gösterilebilir (Stenhede, 2004; Kaarsberg et al., 1999). Literatürde, kojenerasyon sistemlerinin yakıt kullanım tasarrufu ve emisyon azalımı yönünde verimliliğini ölçmek için iki ayrı yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntemde, kojenerasyon sistemleri ile ayrı ısı ve güç üretim sistemlerinin emisyonları, geleneksel fosil yakıtlı sistemlerle kojenerasyon sistemleri arasındaki ısı oranları farkını kullanarak karşılaştırılırken (Kaarsberg vd., 1999; Kaarsberg vd., 1998; Voorspools ve D'haeseleer, 2000a; 2000b), ikinci yöntemde, kojenerasyon sistemlerinin emisyon değerleri ürettikleri güç ve ısıya oranları ölçüsünde dağıtılarak, geleneksel ve ayrı ısı ve güç üretim sistemlerinin emisyonlarıyla karşılaştırılmaktadır (Sevilgen vd., 2003). Bütün bu çalışmalarda, *yakıt tasarrufu analizi*, yakıt kullanım verimi olarak da adlandırılan termodinamiğin *birinci kanun verimi* temel alınarak yapılır. Birinci kanun verimi üretilen güç ve ısıyı *nicelik* bakımından değerlendirmekte ve *eşit* kabul etmektedir. Bu durum yani sadece nicelik göz önüne alınarak değerlendirme yapılması, kojenerasyon sistemlerinin çevresel değerlendirmelerini termoekonomik analiz çerçevesinde yaparken, birinci kanun veriminin bir performans parametresi olarak kullanılmasının yeterli olmadığını göstermektedir (Huang, 1996).

Bu çalışmada, dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinin çevresel değerlendirmesi yapılırken termodinamiğin *ikinci kanun verimi* yada yaygın kullanımıyla *ekserji verimi* kullanılmıştır. Bu amaçla, gerçek bir dizel motorlu kojenerasyon sisteminin emisyon değerleri ele alınarak, emisyon içeriklerinde bulunan kükürt oksit ve azot oksit bileşenlerinin egzoz gazından uzaklaştırılmasında kullanılan sistemler incelenmiştir. Dizel motorlu kojenerasyon sisteminin emisyon değerlendirmesi, literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan yakıt kullanım verimi (birinci kanun verimi) yerine ekserji verimi (ikinci kanun verimi) temel alınarak, yakıt tasarruf analiz yöntemi ile yapılmıştır. *Egzoz emisyon azalımı*, yakıt tasarruf yöntemine benzetme yapılarak tanımlanmış ve elde edilen değerler ayrı ısı ve güç sistemlerinin değerleriyle karşılaştırılmıştır.

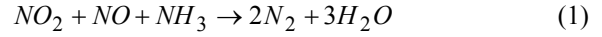
DİZEL MOTORLU KOJENERASYON SİSTEMİNDE EGZOZ AKIŞI

Bu makalede ele alınan dizel motorlu kojenerasyon sistemi, Güneydoğu Bölgemizdeki Gaziantep şehrinde halihazırda çalışıyor durumdadır. İşletmede elektrik, her birinde ikişer adet turboşarj bulunan üç ayrı dizel motor tahrikli jeneratör düzeneğiyle üretilmektedir. Her bir dizel motor-jeneratör düzeneği 8.44 MW elektrik ve 8 bar, 170°C’de saatte 2.7 ton buhar üretmektedir. Kojenerasyon işletmesinin tek bir motor için egzoz akım şeması, Şekil 1’de verilmektedir. İşletmenin yıllık elektrik üretimi 217 GW-saat olup, dizayn işletme şartlarında yıllık ağır yakıt tüketimi 45,000 tondur. Motordan ayrılan egzoz gazı, turboşarj ünitesinin türbinine girerek, aynı shafta bağlı olan kompresörün çalışması için gerekli işi üretir. Türbinden ayrılan egzoz gazı azot oksit artırım (DeNO_x) ünitesine girer. Burada egzoz gazı üzerine üre çözeltisi (NH₃) püskürtülerek, içeriğindeki NO_x emisyonu kanunen kabul edilen emisyon değerlerinin altına düşürülmeye çalışılır. Buradan ayrılan egzoz gazı atık ısı geri kazanım ünitesine girerek, ısını besleme suyuna transfer eder, yakıtın ön ısıtması için elektrik üretim bölümüne ve kojenerasyon sisteminin bağlı bulunduğu tekstil işletmesine gerekli olan buharı üretir. Atık ısı geri kazanım ünitesinden çıkan egzoz gazı üzerine kireçtaşı çözeltisi püskürtülerek içeriğindeki SO_x emisyonunun kanuni sınırların altına çekildiği artırım ünitesine (DeSO_x) girer ve buradan atmosfere verilir.

Azot Oksit Artırım Ünitesi (DeNO_x)

Azot oksit artırım (DeNO_x) ünitesinin amacı egzoz gazı içindeki NO_x emisyonunu, amonyak (NH₃) çözeltisi kullanarak kimyasal bir reaksiyonla azot (N₂) ve suya ayrıştırarak azaltmaktır. Motor içindeki yanma sırasında, azot molekülleri yanma havasında bulunan oksijenle tepkimeye girerek nitrik oksit (NO) oluşturur. Eğer oksijen miktarı az ise, yanma ürünlerinde NO yerine N₂ bulunacaktır. Bu işlem DeNO_x prensibinin temelini oluşturmaktadır. Dizel motorlu kojenerasyon ünitesinde ısı transferini

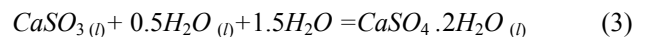
azaltmak amacıyla her bir motor-jeneratör düzeneğine yalıtılmış bir DeNO_x ünitesi bağlıdır. Egzoz gazı içindeki NO_x, *seçici katalitik indirgeme* (selective catalytic reduction – SCR) tepkimesi yardımıyla azot ve suya dönüştürülür. SCR tepkimesi, 300-500°C sıcaklık aralığında vanadyum/titanyum katalizörleri aracılığıyla aşağıda görüldüğü gibi gerçekleştirilir,



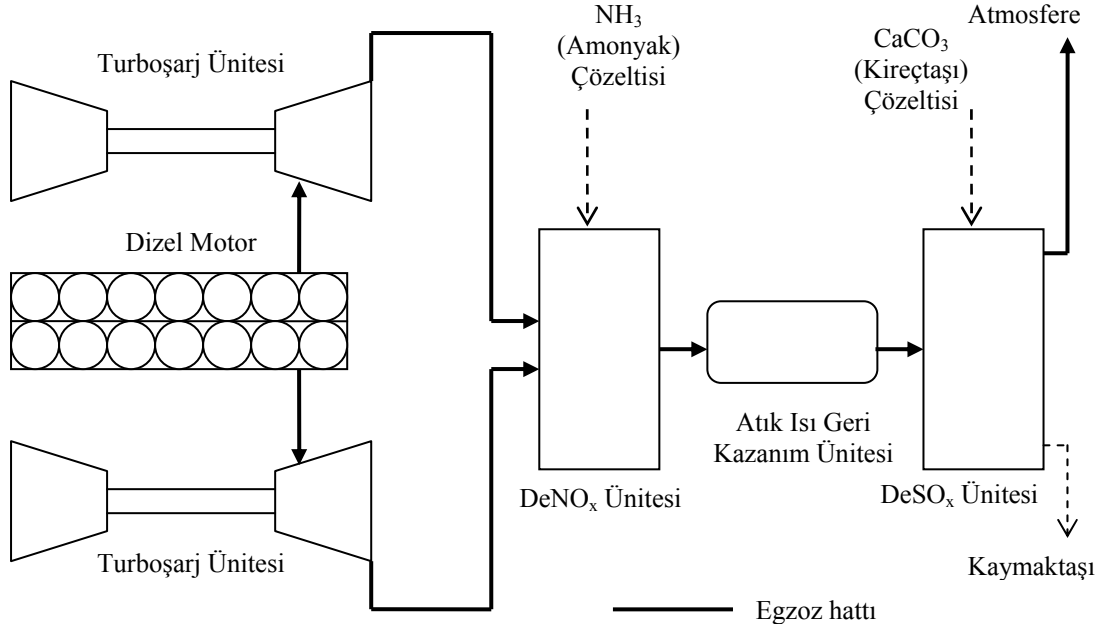
Katalizörler bal peteği şeklinde özel seramiklerden yapılmıştır. Amonyak (NH₃) çözeltisi sıvı haldeki üreden elde edilerek söz konusu tepkimede indirgeme çözeltisi olarak kullanılır. 300-450°C aralığındaki egzoz gazı yalıtılmış egzoz kanalları yardımıyla motor silindirlere girer. Yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı katalizörlerden geçerken üzerine NH₃ püskürtülür, gaz içindeki NO_x bileşenleri NH₃ ile tepkimeye girerek N₂ ve su (H₂O) oluşturur. Bu iki nihai ürün tamamen doğal bir yapıdadır ve çevreye zararlı bir etkileri yoktur. Kojenerasyon işletmesinde, DeNO_x ünitesinde tüketilen toplam amonyak/üre çözeltisi saatte 260 kg iken toplam NO_x debisi saatte 402 kg civarındadır. Artırılmış egzoz gazı Tablo 1’de belirtildiği üzere 800 mg/Nm³’den az NO_x içermektedir.

Kükürt Oksit Artırım Ünitesi (DeSO_x)

Kükürt oksit artırım (DeSO_x) ünitesinde, egzoz gazı içindeki kükürt oksit bileşenleri (SO_x) emisyonu, temelde toz haldeki kireçtaşının (CaCO₃), kaymaktaşı/alçıtaşına (CaSO₄) dönüşümü işlemi sırasında bertaraf edilmektedir. Kojenerasyon işletmesindeki kireçtaşı tüketimi yaklaşık olarak saatte 750 kg’dır. Artırım ünitesinde, egzoz gazı sulandırılmış kireçtaşı ile yıkanarak, içeriğindeki kükürt dioksit (SO₂) ve diğer kirleticilerin (SO₃ – HCl) uzaklaştırılması esas alınırken, egzoz gazı da soğutulmaktadır. Egzoz gazının, artırım ünitesi içinde dikey olarak yukarıya doğru hareketi esnasında asılı haldeki bileşikler ayrışarak soğutulurlar (absorption). SO₂, SO₃ ve HF (Hidrofulorik asit) çok zor çözünen bileşikler olduklarından işlem esnasında yıkama çözeltisi içinde askıda kalırlar. Çözelti içinde çok fazla yığılmayı önlemek amacıyla, yıkama çözeltisi içine bir karıştırıcı konulur. Bu aynı zamanda çözeltinin havalanmasını ve içine oksijen girişini arttırır. Artırma işlemi boyunca sırasıyla aşağıdaki tepkimeler meydana gelmektedir,



Artırım işlemi esnasında üretilen kalsiyum sülfat (CaSO₃) ve kalsiyum sülfat (CaSO₄) bileşenlerinin suyu alınarak, içerdikleri nem oranının %15 seviyesine düşmesi sağlanır ve böylelikle kullanılabilir nitelikte kaymaktaşı elde edilmiş olur. Kükürt oksit artırma işlemi sonrası egzoz gazı içindeki toplam SO₂ emisyonu 2400 mg/Nm³’den daha az bir seviyeye düşürülmüş olur (bakınız Tablo 1).



Şekil 1. Dizel motorlu kojenerasyon sistemi egzoz akım şeması (tek bir motor için)

Tablo 1. Türkiye’de güç üretim tesisleri için emisyon standartları (IEA, 2005).

1986 YÖNETMELİĞİ (mg/Nm ³)									
	PM		CO	NO _x		SO ₂			
	Eİ	Yİ		Eİ	Yİ	<300 MW _{th}	>300 MW _{th}		
						ÇS>20,000	Yİ	ÇS<50,000 and Eİ	ÇS>50,000 and Yİ
KYT	250	150	250	1000	800	3200	2000	3200	1000
SYT	110	110	175	1000	800	3200	1700	1700	800
GYT	10	10	100	500	500	60	60	60	60
2004 YÖNETMELİĞİ (mg/Nm ³)									
KYT	100		200	800	2000 (<100 MW _{th}) 1300 (100 -300 MW _{th})		1000 ≥300 MW _{th}		
SYT	110-170 ≥15 MW _{th}		150	800	1700 (1% S ^a) 2400 (1.5% S) (<100 MW _{th}) 1700 (100-200 MW _{th})		800 ≥300 MW _{th}		
GYT	10		100	500	60		60		

KYT: Katı yakıtlı tesisler, SYT: Sıvı yakıtlı tesisler, GYT: Gaz yakıtlı tesisler, Eİ: 1986 yılında yürürlüğe giren “Hava Kalitesini Koruma Yönetmeliği” nden önce devrede olan Eski işletmeler, Yİ: 1986 yılında yürürlüğe giren “Hava Kalitesini Koruma Yönetmeliği” nden sonra devreye alınan Yeni İşletmeler, ÇS: İşletmenin ekonomik ömrüne bağlı olarak belirlenen Çalışma Saatleri, ^a Kullanılan yakıtın kütleli yüzdesine bağlı olan sülfür içeriği

Tablo 2 ve Tablo 3’te egzoz gazının arıtma ünitelerinden önce ve sonra içerdiği emisyon değerleri verilmektedir.

Tablo 2. Dizel kojenerasyon sisteminin egzoz gazı arıtma ünitelerinden önce emisyon içeriği

İçerik	Motor 1	Motor 2	Motor 3
O ₂ (%)	13.40	13.45	13.55
CO ₂ (%)	5.55	5.55	5.45
CO (mg/m ³)	75.5	90	105
NO (mg/m ³)	1485	1500	1532
SO ₂ (mg/m ³)	935.5	1149	1053
Egzoz gazı sıcaklığı °C	309.5	312.5	310

Tablo 3. Dizel kojenerasyon sisteminin egzoz gazı arıtma ünitelerinden sonra emisyon içeriği

Yakıt tipi	Fuel oil no.6
Üretilen güç (MW)	25.32
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı (°C)	53.7
Egzoz gazı çıkış hızı (m/s)	8.1±0.1
Egzoz gazı debisi (m ³ /saat)	123,464
PM yoğunluğu (mg/m ³)	96.78
PM emisyonu (kg/saat)	11.8695±2.6904 (SD*:15)
CO yoğunluğu (mg/m ³)	101.67
CO emisyonu (kg/saat)	12.5507±1.4898 (SD:5)
SO ₂ yoğunluğu (mg/m ³)	40.95
SO ₂ emisyonu (kg/saat)	5.0673±0.6036 (SD:100)
NO yoğunluğu (mg/m ³)	1282.14
NO emisyonu (kg/saat)	158.3056±18.766 (SD:20)
NO ₂ yoğunluğu (mg/m ³)	1983.75
NO ₂ emisyonu (kg/saat)	244.94
O ₂ yoğunluğu (%)	12.8
CO ₂ yoğunluğu (%)	6.3

*SD: Sınır Değer

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yakıt Tasarrufu Analizi

Dizel motorlu kojenerasyon sisteminde, motorlarda üretilen elektriğin sonucunda atılan egzoz gazının ısısından faydalanılarak üretimde kullanılmak üzere buhar üretilmektedir. Böylelikle atık ısı faydalı ısıya çevrilmiş olur. Kojenerasyon sistemlerinde, yakıtın kimyasal enerjisinin üretilen elektrik enerjisine oranı elektrik verimi (veya birinci kanun verimi), η_e , üretilen ısı enerjisine oranı ise ısı verim, η_h olarak tanımlanmaktadır. Elektrik ve ısı üretimleri sırasıyla, \dot{W} ve \dot{Q} ile gösterilmektedir.

Ayrı güç ve ısı üretilen sistemlerde, elektrik ve ısı üretimleri için ayrı yakıtlar kullanılır. Literatürde bu tür sistemler için kullanılan yakıt tüketimi, elektrik üretim verimiyle, η_{se} , kazan ısı verimine, η_{sh} bağımlı bir parametre olarak kabul edilmektedir (Kaarsberg vd., 1998; Kaarsberg vd., 1999; Voorspools ve D'haeseleer, 2000a; 2000b; Sevilgen vd., 2003). Bu çalışmada yapılan yakıt tasarruf analizinde dizel motorlu kojenerasyon sistemi ayrı elektrik ve ısı üretilen sistemlerle karşılaştırılırken çevresel değerlendirmeler ekserji verimi (ikinci kanun verimi) kullanılarak yapılmıştır. Bu bağlamda her iki sistemin de aynı miktarda elektrik ve ısı ürettikleri kabul edilmiştir. Elektrik ve ısı üretimleri hesaplanırken aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır,

$$\dot{W} = \dot{m}_f LHV_f \varepsilon_e \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_f LHV_f \varepsilon_h \quad (5)$$

yukarıdaki eşitliklerde LHV_f , yakıtın alt ısı değerini, \dot{m}_f , kullanılan yakıtın kütle debisini, ε_e ve ε_h , sırasıyla dizel motorlu kojenerasyon sisteminde üretilen elektrik ve buharın ekserji verimlerini

göstermektedir. Dizel motorlu kojenerasyon sistemiyle aynı miktarda elektriği üretmek amacıyla sadece güç (elektrik) üreten bir sistemin ihtiyacı olan yakıt miktarı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir,

$$\dot{m}_{sef} = \dot{m}_f \zeta_e \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{se}} \right) \quad (6)$$

(6) nolu eşitlikte, ζ_e dizel motorlu kojenerasyon sisteminde kullanılan yakıtın alt ısı değerinin sadece güç üreten bir sistemin kullandığı yakıtın alt ısı değerine oranı olarak tanımlanmaktadır. ε_{se} ise, sadece güç üreten bir sistemin üretimine bağlı ekserji verimidir. Benzer şekilde, dizel motorlu kojenerasyon sisteminde üretilen buhar eşit debi ve kalitede buhar üretimi yapan bir buhar kazanının ihtiyacı olan yakıt miktarı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\dot{m}_{shf} = \dot{m}_f \zeta_h \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{sh}} \right) \quad (7)$$

yukarıdaki eşitlikte ζ_h , dizel motorlu kojenerasyon sisteminde kullanılan yakıtın alt ısı değerinin sadece buhar üreten bir kazanın kullandığı yakıtın alt ısı değerine oranı olarak tanımlanabilir ve ε_{sh} 'de buhar üreten kazanın üretimine bağlı tanımlanan ekserji verimidir. Kojenerasyon sistemi ile ayrı elektrik ve buhar üreten sistemlerin yakıt tüketimlerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, *yakıt tasarrufu miktarı* aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Kaarsberg vd., 1999),

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_f \left[\zeta_e \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{se}} \right) + \zeta_h \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{sh}} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

Dizel motorlu kojenerasyon sisteminin tercih edilmesi durumunda elde edilecek yakıt tasarrufu (8) nolu eşitlik için bir sınır şartı tanımlayarak hesaplanabilir. Bu durumda,

$$\left[\zeta_e \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{se}} \right) + \zeta_h \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{sh}} \right) \right] > 1 \quad (9)$$

Her iki sistemde de aynı yakıtın kullanıldığını kabul ettiğimiz takdirde $\zeta_e = \zeta_h = 1$ olur ve (9) nolu eşitlik aşağıdaki gibi sadeleşebilir,

$$\left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{se}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{sh}} \right) > 1 \quad (10)$$

Dizel motorlu kojenerasyon sistemi için gerekli veriler ve termodinamik hesaplamaların sonuçları Tablo 4'te verilmektedir (Abusoglu ve Kanoglu, 2008; Abusoglu ve Kanoglu 2009a; 2009b). Ayrı elektrik ve buhar üreten bir sistem için gerekli veriler ise literatürden alınmıştır (Sevilgen vd., 2003; Marecki, 1998; Coelho vd., 2003).

Tablo 4'te görülebileceği gibi, dizel motorlu kojenerasyon sisteminde üretilen net elektrik miktarı 25.32 MW ve buhar debisi saatte 8.1 ton dur. Yukarıdaki eşitlikleri kullanarak, ayrı güç üretim sisteminde ve buhar kazanında kullanılan yakıt debileri sırasıyla saatte 1.66 kg ve 0.20 kg olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan da açıkça görülebileceği üzere, elektriğin ve buharın ayrı sistemlerde üretilmesi durumunda halihazırdaki dizel motorlu kojenerasyon sistemine göre yakıt tüketimi %34.8 oranında artmaktadır.

Tablo 4. Dizel motorlu kojenerasyon sistemi verileri (Abusoglu ve Kanoglu, 2008; Abusoglu ve Kanoglu 2009a; 2009b)

Yakıtın kütle debisi(kg/s)	1.38
Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)	42,700
Üretilen toplam güç (elektrik) (MW)	25.32
Üretilen toplam buhar enerjisi (kW)	176.1
Üretilen buharın debisi (ton/saat)	8.1
Egzoz gazının kütle debisi (kg/s)	51.0
Kojenerasyon sisteminin ekserji verimi, ε_e (%)	40.6
Dizel motorun ekserji verimi, ε_{DE} (%)	40.4
Atık ısı kazanının ekserji verimi, ε_h (%)	11.4

Emisyon Farkı Analizi

Dizel motorlu kojenerasyon sisteminde üretilen emisyon miktarı sadece elektrik üretimine bağlı değerlendirilirken, ayrı elektrik ve buhar üreten sistemlerde hem elektrik hem buhar üretimlerine bağlı değerlendirilmektedir. Dizel kojenerasyon sisteminde açığa çıkan emisyon miktarı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir,

$$M_{DEPC,i} = \dot{W}\theta_{DEPC,i} \quad (11)$$

yukarıdaki eşitlikte θ_{DEPC} kojenerasyon sisteminin üretilen elektriğe bağlı emisyon miktarını veren özgül emisyon değeri olarak tanımlanabilir, "i", egzoz gazı içindeki bileşikler (CO_2 , SO_2 , ve NO_x) temsil etmektedir. Ayrı güç üretim sistemi ve buhar kazanı için emisyon miktarları sırasıyla aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir (Kaarsberg vd., 1999),

$$M_{SP,i} = \dot{W}\theta_{SP,i} \quad (12)$$

$$M_{SH,i} = \dot{Q}\theta_{SH,i} \quad (13)$$

$M_{SP,i}$ ve $M_{SH,i}$ sırasıyla güç üretim sistemi ve buhar kazanı için emisyon miktarları, θ_{SP} ve θ_{SH} ise yine sırasıyla güç üretim sistemi ve buhar kazanı için özgül emisyon değerleridir. Dizel motorlu kojenerasyon sistemi tercih edildiğinde, emisyon miktarındaki azalma (ΔM) aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$\Delta M = \dot{W}(\theta_{SP,i} + \beta\theta_{SH,i} - \theta_{DEPC,i}) \quad (14)$$

yukarıdaki eşitlikte, β kojenerasyon sisteminde üretilen ısının, üretilen elektriğe oranı (ısı/güç) olarak tanımlanabilir. Emisyon azalması için sınır şart ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\theta_{SP,i} + \beta\theta_{SH,i} > \theta_{DEPC,i} \quad (15)$$

Isı-güç oranı, eşit miktarlarda emisyonları olduğunu varsaydığımız dizel motorlu kojenerasyon sistemiyle ayrı güç üretim sistemi ve buhar kazanı işletmesi için "kritik ısı-güç oranı" β^* olarak tanımlanabilir

$$\beta^* = \frac{\theta_{DEPC,i} - \theta_{SP,i}}{\theta_{SH,i}} \quad (16)$$

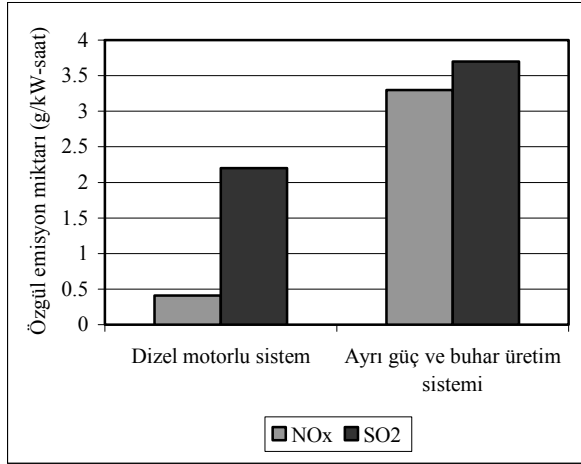
Dizel motorlu kojenerasyon sisteminin ortalama özgül emisyon değerleri, Tablo 3'te ki veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrı güç üretim sistemi ve buhar kazanı için ise sözkonusu değerler literatürden alınmıştır (Kaarsberg vd., 1999, Kaarsberg vd., 1998; Voorspools ve D'haeseleer, 2000a; 2000b; Sevilgen vd., 2003). Tablo 5'te gaz türbinleri, dizel motorlu kojenerasyon sistemi ve geleneksel elektrik üretim tesisleri için özgül emisyon değerleri verilmiştir. Bu emisyon miktarları ve termal verimleri de aynı çizelgede sunulmuştur. Kojenerasyon sistemi ve ayrı güç ve buhar üretim tesisleri için özgül emisyon değerlerinin karşılaştırılması Şekil 2 ve 3'te verilmiştir. Dizel motorlu kojenerasyon sisteminin ekserji verimleri ile ısı-güç oranı Tablo 6'da sunulmaktadır. Ayrı güç ve buhar üreten sistemlerde kullanılabilen doğal gaz, linyit ve fuel oil no.6 gibi yakıtların ortalama özgül emisyon değerleri ise Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 5. Kojenerasyon sistemleri ile geleneksel elektrik üretim sisteminin özgül emisyon değerleri (g/kW_e-saat)

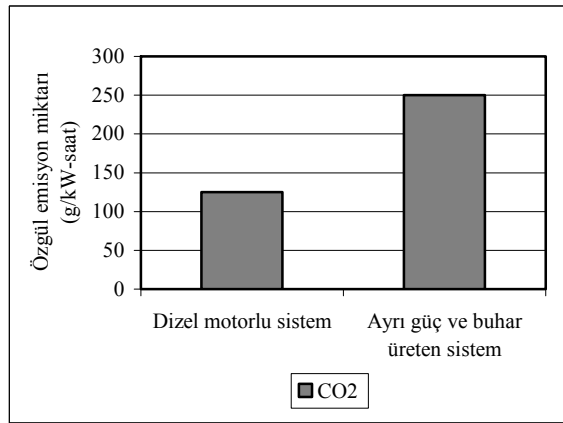
Özgül emisyonlar	Kojenerasyon sistemleri			Geleneksel güç üretim sistemleri	
	Gaz türbinli sistem	Dizel motorlu sistem	Gaz motorlu sistem	Ayrı güç ve buhar üretim sistemi	Kombine çevrim sistemi
NO _x	0.25	0.41	1.34	3.3	0.18
CO ₂	580	500	529.1	997.3	400
SO ₂	-	2.20	-	3.7	-

(12) ve (13) nolu eşitliklerin yardımıyla ve Tablo 3'te verilen emisyon değerlerini kullanarak, tam yükte çalışan dizel motorlu kojenerasyon sisteminin birim elektrik üretimi başına düşen emisyon miktarları hesaplanmıştır ve NO_x için 10.381 kg, CO₂ için 12.66 m³ ve SO₂ için 55.704 kg olarak bulunmuştur. Dizel motorlu kojenerasyon sistemine eşit yükte elektrik üreten bir güç sistemi ve aynı miktar ve kalitede buhar üreten bir buhar kazanı için birim elektrik üretimi başına hesaplanan emisyon değerleri ise sırasıyla NO_x için 83.56 kg ve 0.110 kg, CO₂ için 25.25 m³ ve 0.05 m³, SO₂ için ise 93.68 kg ve 1.28 kg olarak bulunmuştur. Hesaplamalar neticesinde elde edilen değerlerden de görülebileceği üzere dizel motorlu kojenerasyon sistemi ayrı güç ve buhar üreten sistemlere

göre söz konusu emisyon miktarlarında sırasıyla %87.6, %50 ve %41.3 oranında bir azalma sağlamaktadır.



Şekil 2. Tam yükte çalışan dizel motorlu kojenerasyon sistemi ile ayrı güç ve buhar üreten bir sistemin NO_x ve SO₂ emisyonlarının karşılaştırılması



Şekil 3. Tam yükte çalışan dizel motorlu kojenerasyon sistemi ile ayrı güç ve buhar üreten bir sistemin CO₂ emisyonlarının karşılaştırılması

Tablo 6. Farklı güç ve buhar üretim sistemlerinin ekserji verimleri ve ısı-güç oranları

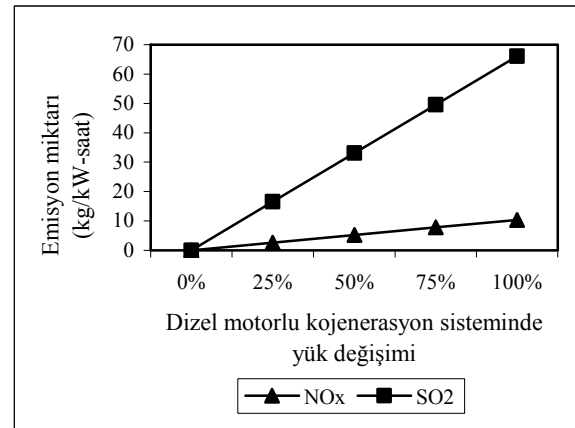
	ϵ	β
Dizel kojenerasyon	0.404	0.007
<u>Ayrı güç ve buhar üreten sistemler</u>		
Buhar türbinli sistem	0.334	-
Kombine çevrim	0.480	-
Buhar kazanı	0.770	-

Tablo 7. Buhar üreten kazanlarda üretilen emisyon miktarları (g/kW-saat)

Yakıt tipi	NO _x	CO ₂	SO ₂
Doğal gaz	0.93	201.92	-
Linyit	0.89	364.25	9.21
Fuel oil no 6	0.62	263.95	7.25

Dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinde emisyon miktarları, Şekil 4'te görüleceği üzere yüklerle birlikte artar. Yine de, yakıt tasarruf yöntemini kullanarak kojenerasyon sistemleri ile ayrı güç ve buhar üreten

sistemler arasındaki emisyon azalma farkını tam olarak hesaplayabileceğimizi düşünmek yanlış sonuçlar doğurabilir. Bunun nedeni, kullanılan analiz yönteminin, aynı yakıt tipini farklı yanma teknolojileri ile kullanırken emisyon değerlerinde olabilecek değişikliği göz ardı etmesidir. Kullanılan analiz yöntemlerinden açıkça görüleceği gibi bu farklar, dikkate alınması gereken özgül emisyon miktarları, kojenerasyon sisteminde kullanılabilen farklı içerikteki yakıtların özellikleri, ayrı güç ve buhar üreten sistemlerin kojenerasyon sistemlerinden yapısal farkları ve söz konusu sistemlerin farklı ısı-güç oranları gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir.



Şekil 4. Dizel motorlu kojenerasyon sisteminde emisyon miktarlarının yüklerle değişimi

SONUÇ

Bu makalede, halihazırda çalışıyor durumda bulunan dizel motorlu bir kojenerasyon sisteminin egzoz emisyon özellikleri incelenerek, işletmede egzoz gazı arıtmak amacıyla çalışan azot oksit (DeNO_x) ve kükürt oksit (DeSO_x) arıtım ünitelerinin çalışma prensipleri anlatılmıştır. Egzoz emisyon değerlendirmesi yakıt tasarrufu analiz yöntemi ve ekserji verimine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Dizel motorlu kojenerasyon sistemi ile ayrı güç ve buhar üreten sistemlerin egzoz emisyon farkları, yakıt tasarrufu yöntemine benzetilerek uygulanmıştır. Sonuçlar, kojenerasyon uygulamasının ayrı güç ve buhar üreten sistemlere göre kullanılan yakıt ve istenmeyen emisyon miktarlarında önemli azaltmalar sağladığı ve oldukça avantajlı olduğunu göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Katkılarından ötürü Gaziantep Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne ve çalışma için gerekli verilerin alınmasında yardımlarını esirgemeyen Sanko Enerji'ye teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR

Abdel-Rahman, A. A., On the emissions from internal-combustion engines: A review, *International Journal of Energy Research* 22, 483-513, 1998.

- Abusoglu, A. ve Kanoglu, M., First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems, *Energy Conversion and Management* 49, 2026-2031, 2008.
- Abusoglu, A. ve Kanoglu, M., Exergetic and Thermoeconomic Analyses of Diesel Engine Powered Cogeneration: Part 1– Formulations, *Applied Thermal Engineering* 29, 234-241, 2009a.
- Abusoglu, A. ve Kanoglu, M., Exergetic and Thermoeconomic Analyses of Diesel Engine Powered Cogeneration: Part 2 – Applications, *Applied Thermal Engineering* 29, 242-249, 2009b.
- Coelho, M., Nash, F., Linsell, D. ve Barciela, J.P., Cogeneration – the development and implementation of a cogeneration system for a chemical plant, using a reciprocating heavy fuel oil engine with a supplementary fired boiler, *Journal of Power and Energy* 217, 493-503, 2003.
- Energy Nexus Group, Technology characterization: Reciprocating engines, *Environmental Protection Agency Climate Protection Partnership Division*, Washington DC, USA, 2002.
- EPA Report – AP 42, Compilation of air pollutant emission factors, (Fifth edition), 2000.
- Frangopoulos, C. A., Cogeneration of heat and power–The way forward, *Proceedings of a European Conference-Greek Productivity Center*, Athens, Greece, 1993.
- Huang, F. F., Performance assessment parameters of a cogeneration system, *Proceedings of ECOS'96*, Stockholm, Sweden, 1996.
- IEA (International Energy Agency), Energy Policies of IEA Countries: Turkey Review, *OECD/EA*, France, 2005.
- Kaarsberg, T., Elliott, R. N. ve Spurr, M., An integrated assessment of the energy savings and emissions-reduction potential of combined heat and power, *American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE'99)*, Washington DC, USA, 1999.
- Kaarsberg, T., Fiskum, R., Romm, J., Rosenfeld, A., Koomey, J. ve Teagan, W. P., Combined heat and power (CHP) for saving energy and carbon in commercial buildings, *Proceedings of the ACEEE 1998 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Washington DC, USA, 1998.
- Marecki, J., *Combined heat and power*, 1st ed., Athens, Greece: Elkepa, 1988.
- Pulkrabek, W.W., *Engineering fundamentals of internal combustion engines*, (First edition), Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1997.
- Rousaki, K. ve Couch, G., Advanced clean coal technologies and low value coals, *IEA Coal Research Report, CCC/39*, London, UK, 2000.
- Sevilgen, S. H., Erdem, H. H., Akkaya, A. V. ve Cetin, B. 2003, Comparison cogeneration system with conventional power plant and evaluation of their environmental impacts, *Proceedings of the First International Energy, Exergy and Environment Symposium*, İzmir, Turkey, 2003.
- Speight, J. G. ve Moschopedis, W. E., Some observations on the molecular nature of petroleum asphaltenes, *ACS Symposium Series, Chemistry of Asphaltenes* 24 (4), 1979.
- Spiewak, S., *Cogeneration and small power production manual*, (Fifth edition), Lavoisier, Inc., France, 1997.
- Stenhede, T., Cogeneration and emissions, *10th International Energy and Environmental Technology Systems Fair and Conference, ICCI'2004*, İstanbul, Turkey, 2004.
- The Petroleum HPV Testing Group, Heavy fuel oils category, *High Production Volume (HPV) Challenge Program*, Washington D.C., USA., 2004.
- Voorspools, K. ve D'haeseleer, W., Dynamic simulation of the entire electric power generation system for evaluating CO₂ emissions, *The Third Asia-Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies*, Hong-Kong, 2000a.
- Voorspools, K. ve D'haeseleer, W., The impact of cogeneration in a given energetic context, *5th International Conference on Greenhouse-Gas Control Technologies (GHGT-5)*, Cairns, Australia, 2000b.
- Yen, T. F., Structural difference between petroleum and coal-derived asphaltenes, *ACS Symposium Series, Chemistry of Asphaltenes* 24 (4), 1979.



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. Halen bu görevini sürdürmektedir ve 2008 yılı Ağustos ayında doktora çalışmasını da tamamlamıştır. Çalışma alanları; termodinamik, ısı transferi, enerji dönüşüm ve güç üretim sistemleri, kojenerasyon, ekserji analiz ve uygulamaları ve eksergoekonomi, içten yanmalı motorlar, sonlu zaman termodinamiği.



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.