

Büyük Ticari Yapılarda Kurulacak Kojenerasyon Sistemlerinin Ekonomik Açından Alternatif Sistemlerle Karşılaştırılması

Mecit Sivrioğlu¹, Mustafa Yurdakul¹, Alperdeniz Aydoğan² ve Yusuf Tansel İç^{3,*}

¹ Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara, Türkiye

² Mesa Mesken A.Ş., 06810 Çayyolu, Ankara, Türkiye

³ Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06810 Etimesgut, Ankara, Türkiye

* Corresponding author: ytansel@baskent.edu.tr

Özet. Ülkemizde toplam inşaat alanı yirmibin metrekare ve üzerindeki ticari yapılarda kojenerasyon sisteminin uygulanabilirliğinin sorgulanması yasal bir zorunluluk halini almıştır. Bu çalışmada, Ankara'daki bir alış-veriş merkezi için kojenerasyon sisteminin ekonomik açıdan kabul edilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak ısıtma ve iklimlendirme sistem alternatifleri incelenmiş, alternatifler arasından seçilen dört ısıtma ve iklimlendirme sistemi örnek binaya uygulanmış ve bina için en ekonomik ısıtma ve iklimlendirme sistemi belirlenmiştir. Ardından, örnek bina için kojenerasyon sistem seçimi gerçekleştirilerek, seçilen sistemin en ekonomik iklimlendirme sistemi ile ekonomik açıdan karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma risk analizleri yapılarak tamamlanmıştır. Yapılan örnek uygulama kojenerasyon sistemlerinin ısıtma ve iklimlendirme sistemlerine adapte edilmelerinin ekonomik açıdan önemli faydalar sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler. Kojenerasyon, ısıtma ve iklimlendirme sistemleri, ekonomik analiz.

Abstract. Recent regulations require the owners of buildings whose construction areas are at least twenty thousand meter square to perform feasibility studies for cogeneration systems as a part of the heating and air-conditioning systems. In the first part of the paper, for a specific commercial building, four alternative heating and air-conditioning systems are determined, compared and the most economical one is selected. Then, the cogeneration system is adapted and its economical feasibility is illustrated. Sensitivity analysis is also performed for the application of the cogeneration system by changing prices of fuel and electricity. The paper clearly illustrates the economic advantages of using cogeneration systems within the heating and air-conditioning systems.

Keywords. Cogeneration, selection of heating and air-conditioning systems, economic analysis.

Received June 30, 2010; accepted May 18, 2011.

Bu makale, 29-30 Nisan 2010 tarihlerinde Çankaya Üniversitesi'nin Ankara yerleşkesinde yapılmış olan 3. Çankaya Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu'nda sunulan ve sadece geniş bildiri özeti bölümü hakem sürecinden geçerek bu sempozyum kitapçığında yayımlanan bir makalenin revize edilmiş şekli olup Sempozyum Değerlendirme Komitesi tarafından yayımlanmak üzere Çankaya University Journal of Science and Engineering dergisine gönderilmesi önerilmiş ve derginin bağımsız hakem değerlendirmeleri sonucunda yayıma kabul edilmiştir.

1. Giriş

Kojenerasyon, en yalın ifadeyle enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemde üretilmesidir. Bu birliktelik, iki enerji formunun da tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik neticeler oluşturmaktadır. Basit çevrimde çalışan, yani sadece elektrik üreten bir gaz türbini ya da motoru, kullandığı enerjinin %30-40 kadarını elektriğe çevirir. Bu sistemin kojenerasyon şeklinde kullanılması halinde sistemden dışarıya atılacak olan ısı enerjisinin büyük bir bölümü de kullanılabilir enerjiye dönüştürülerek toplam enerji girişinin %70-90 arasında değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Bu tekniğe birleşik ısı-güç sistemleri ya da kısaca kojenerasyon denir [1]. Bu sistemlerin seçimi; işletmenin elektrik-ısı tüketim yapısı ve ısı-elektrik tüketim dengesi, işletmenin yıllık çalışma süresi, işletmenin enerji ihtiyacı seviyesi, birincil enerji kaynaklarının (gaz, lpg, nafta, fuel oil no.6) temin edilebilirliği ve ekonomik uygulanabilirlikleri şeklinde önem durumuna göre sıralanmış ölçütler değerlendirilerek yapılır.

Kojenerasyon sistemi ile ilgili olarak literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Osmanoğlu [2], yerleşime uygun bir ev tasarlamıştır. Bu çalışma çerçevesinde modellenen polimer elektrolit yakıt pilinin elektriksel ve termal enerjisi değişik senaryolara göre evin enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanmıştır. Ener [3], Kütahya ilindeki Güral Porselen ve Vitrifiye fabrikalarında gerçekleştirdiği çalışmada, gerekli enerji ihtiyaçlarına göre gaz motorlu ve gaz türbinli kojenerasyon tesislerini karşılaştırmıştır. Arat [4], organize sanayi bölgesindeki kapasiteleri ve tüketimleri belirli olan müşterilere buhar dağıtması planlanan bir kojenerasyon santralının buhar dağıtım hatlarının minimum maliyette olacak şekilde planlanması konusunda çalışmalar yapmıştır. Çakır [5] çalışmasında, gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinde yakıt olarak doğalgaz kullanımını incelemiştir. Tarakçıoğlu [6], atık ısıdan enerji elde edilmesi ve bu enerjinin sanayiye kazandırılması konusunda çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında atık ısıdan enerji elde etme yöntemleri, bunların sanayide kullanım alternatifleri, örnek olarak seçilen işletmelerin yapıları içerisinde atık ısıdan faydalanma prosesleri incelenmiş ve sistemin verimliliğini artırıcı öneriler ortaya konmuştur. Albayrak [7] ise kojenerasyonun termodinamik analizini yaparak, bileşik ısı güç santrallerinde sistem seçimini etkileyen faktörler ve kojenerasyon teknolojilerinin nasıl verimli kullanılacağı, kojenerasyonun bölgesel ısıtmada kullanılabilirliği ve ekonomikliğini araştıran bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada, inşaat alanı yirmibin metrekareden büyük bir alış-veriş merkezi ele alınarak yıllık elektrik ve yakıt tüketimleri hesaplanmış, buna en uygun kojenerasyon sistemi seçilmiş ve alternatif sistemlerle karşılaştırılarak ekonomik analizi yapılmıştır. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar paralelinde çalışmanın gerçekleştirildiği alış-veriş merkezi için en uygun kojenerasyon sistemi önerilmiştir.

2. Örnek Bina Tanımı ve İklimlendirme Sistemi Seçimi

Alışveriş merkezleri perakende satışların yapıldığı satış alanı büyük işletmelerdir. Alışveriş merkezlerinin yapı alanları; müşterilerin girebildiği hipermarket, sinema gibi büyük mağaza alanları, satış alanları, dolaşım alanları, sadece idarecilerin ve çalışanların girebildiği yan odalar, ofisler, depo, mutfak, atölye, dinlenme odaları, teknik alanlar ve garaj alanlarından oluşur. Tüm bu alanlarda genelde pencere alanları küçük olduğundan dış ısı yükler çok düşüktür. Bununla birlikte, iç ısı yüklerin yüksek olması sebebiyle binanın kış mevsiminde bile soğutulması gerekir [8].

Ülkemizde son dönemde yapılan ticari yapıların büyük bir bölümünü alışveriş merkezleri oluşturmaktadır. Çalışmamızda örnek bina olarak “Ankara Arcadium Alışveriş Merkezi” incelenmiştir. Alışveriş merkezi (AVM), Ankara Çayyolu’nda 2002 yılında inşa edilmiş olup, 24.628 m²’si iklimlendirilmiş toplam 36.000 m²’lik kullanım alanına sahiptir. Toplam iki bodrum, zemin, birinci ve ikinci satış katları ile çatı katından oluşan yapı, büyük satış alanları, ortak dolaşım alanları, teknik hacim alanları, idari ofis alanları ve kapalı garajlardan oluşan ısı bölgelere ayrılmıştır. Arcadium AVM, çalışmanın bundan sonraki bölümünde örnek bina olarak anılmıştır.

2.1. Örnek bina tasarım şartları ve yük hesapları. Tasarımda esas alınan dış kısım sıcaklıkları ve rutubet değerleri Tablo 1’de, iç kısım konfor sıcaklıkları ve rutubet değerleri Tablo 2’de, iç kısım kişi sayısı, insan, cihaz, aydınlatma yükleri ve gerekli aydınlatma şiddeti ise binada kullanılan kısım özelliklerine göre ayrı ayrı belirlenerek Tablo 3’te sunulmuştur [1,9].

Bununla birlikte, yıllık yük tahmininde kullanılacak olan, Ankara ili dış hava şartlarına ait, aylara ve günün saatlerine göre oluşacak solar ısı kazanımları, sıcaklık profilleri gibi benzetim değerleri oluşturulmuştur (Şekil 1-2).

TABLO 1. Dış kısım sıcaklıkları ve rutubet değerleri.

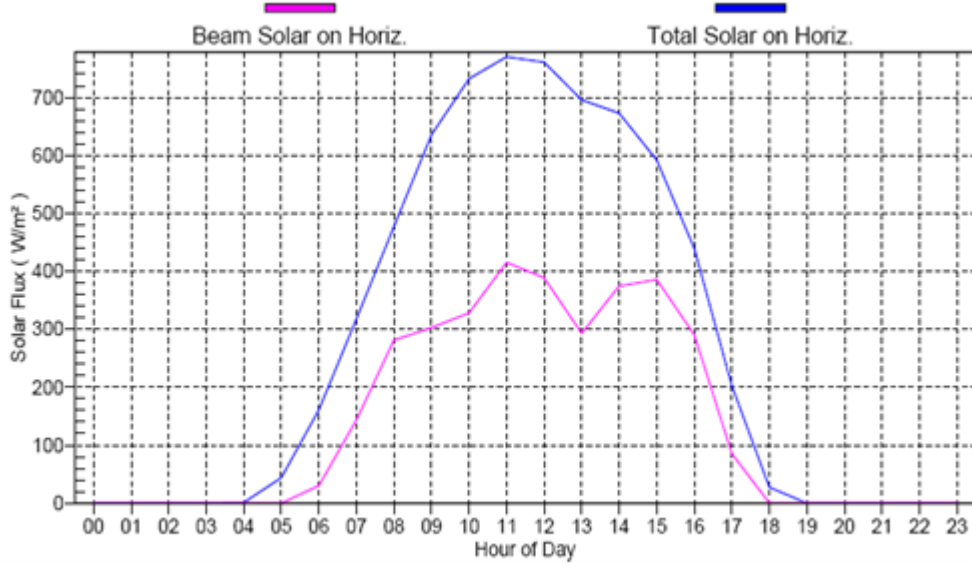
Tanım	Kış	Yaz
Kuru termometre sıcaklığı °C	-12	34
Yaş termometre sıcaklığı °C	-12,6	20
Bağıl nem %	80	29
Gece gündüz sıcaklık farkı		15
Rakım	895 m	

TABLO 2. İç kısım konfor sıcaklıkları ve rutubet değerleri.

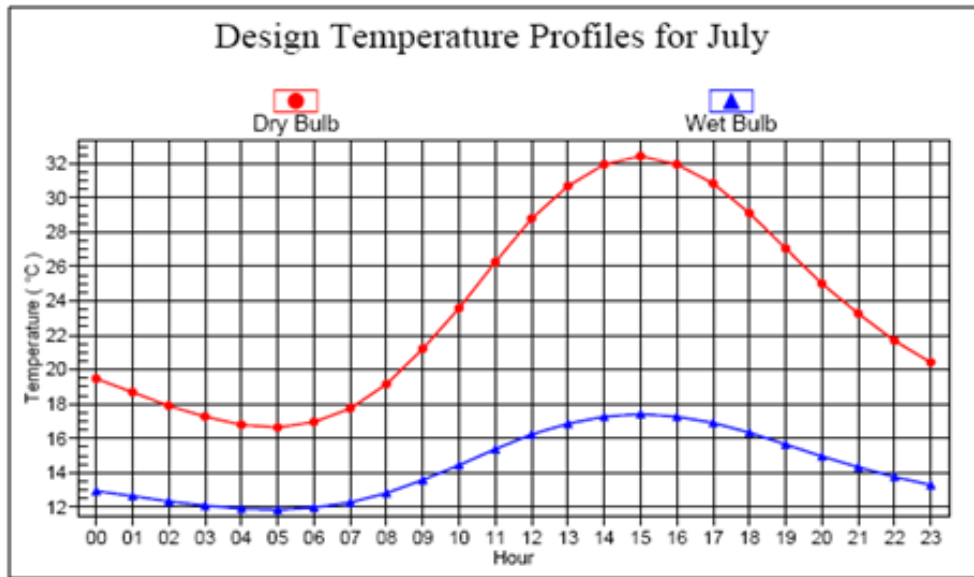
Kısım Adı	Kış- Sıcaklık (°C)	Yaz- Sıcaklık (°C)	Yaz- rutubet (%)
Büyük satış alanı	20	26	50
Satış alanları	20	26	50
Ortak dolaşım alanları	20	26	50
Teknik hacim alanları	15	Soğutulmuyor	KontROLSÜZ
İdari ofis alanları	20	26	50
Kapalı garaj alanları	Isıtılmıyor	Soğutulmuyor	KontROLSÜZ

TABLO 3. İç kısım kişi sayısı, insan, cihaz, aydınlatma yükleri ve gerekli aydınlatma şiddeti.

Kısım Adı	Kişi sayısı/ 100 m ²	Dış hava	Egzos	İnsanlardan gelen ısı yükü		Cihaz ısı yükü watt/m ²	Aydınlatma ısı yükü watt/m ²
		L/s/kişi	L/s/m ²	Duyulur watt/kişi	Gizli watt/ kişi		
Büyük satış alanı	8	7,6	-	75	55	5	64,6
Satış alanları	15	7,8	-	75	55	5	64,6
Ortak dolaşım alanları	40	4,6	-	75	70	5	16,1
Teknik hacim alanları	2	-	3,7	-	-	10	-
İdari ofis alanı	5	8,5	-	75	45	10	21,5
Kapalı garaj alanları	-	-	3,7	-	-	-	-



ŞEKİL 1. 30 Temmuz güneş ışımalarının günün saatlerine göre değişim benzetimi.



ŞEKİL 2. Temmuz ayı dış hava sıcaklığı saatlik değişim benzetimi.

Örnek Bina, 27019 numaralı 09.10.2008 tarihli resmi gazetede yayınlanan binalarda ısı yalıtım yönetmeliğine göre üçüncü bölgede olup, bu değerlerin sağlanabilmesi için yapıda mantolama ve benzeri yalıtım tekniklerinin kullanılması zorunludur [10].

Kat planları ve ısı bölgeleri, Tablo 1-3'te belirtilen tasarım değerleri "Carrier E20-II HAP ver.4.04" programına girilmiş ve elde edilen ısıtma, soğutma yükleri, havalandırma ihtiyacı Tablo 4'te özetlenmiştir. Ayrıca binanın toplam ısıtma ve soğutma yükleri Tablo 5'te sunulmuştur.

TABLE 4. Örnek yapı ısıtma, soğutma yükleri ve havalandırma ihtiyacı.

Kısım bilgileri			Isıtma - soğutma bilgileri				
No	Kısım Adı	m ²	Yaz tasarım bilgileri		Kış tasarım bilgileri		Taze hava tasarım değerleri L/s
			İç Sıcaklık °C - Bağıl Nem %	Duyulur Isı Kazancı kW	İç Sıcaklık °C	Toplam Isı Kaybı kW	
1	Büyük satış alanı	6.244	26-50	500,0	20	97,5	3.796,4
2	Satış alanları	9.505	26-50	874,2	20	222,6	5.213,6
3	Ortak dolaşım alanları	6.376	26-50	454,4	20	162,4	18.717,0
4	Teknik hacim alanları	1.553	26-50	61,9	20	41,7	Sadece Egzos
5	İdari ofis alanı	950	26-50	30,2	20	30,3	950,0
	TOPLAM	24.628		1.920,7		554,5	28.677,0

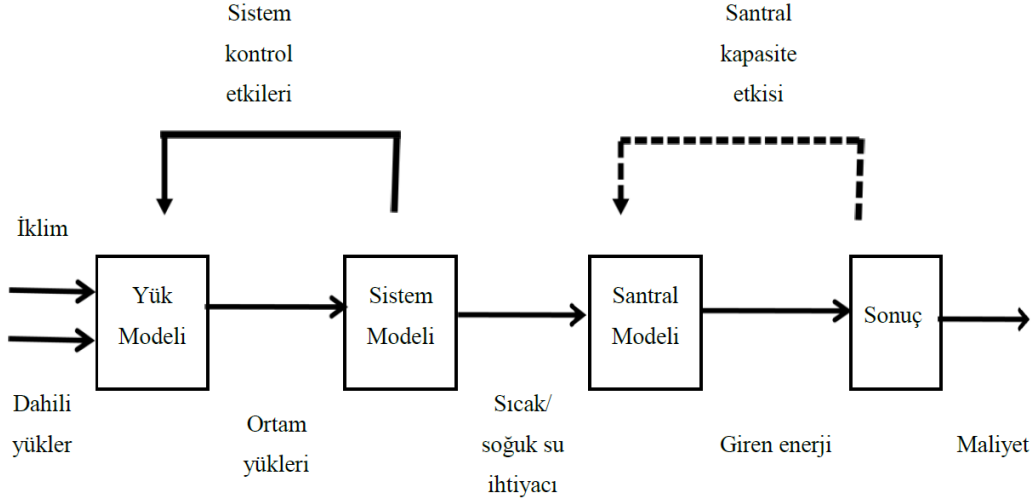
TABLE 5. Örnek yapı ısıtma, soğutma yükleri toplamı.

No	Tanım	Isıtma yükü (kW)	Soğutma yükü (kW)
1	Kısım iç ünite yükleri	554,5	1.920,7
2	Taze hava santrali yükleri	1.079,8	245,4
3	Toplam	1.634,3	2.166,1

Yıllık enerji ve kojenerasyon hesaplarında kullanılmak üzere binadaki mekanik sistemler haricinde, Tablo 3'te verilen aydınlatma yüklerine uygun iç aydınlatma ve açık otopark için 18.00-06.00 saatleri arasında 4,5 kwh aydınlatma kabul edilmiştir.

3. Uygulama

3.1. Örnek bina iklimlendirme sistemleri enerji analizi. Binanın ve enerji sisteminin modeli; binanın ısı davranışını, şartlandırılmış hava dağıtım sisteminin termodinamik davranışını ve ısı yüklerine göre ana ekipmanların enerji ihtiyaçlarını veren matematiksel bir bağlantı modelini kapsamalıdır. Örnek bina uygulamasında kullanılan hesap akış diyagramı Şekil 3'te sunulmuştur [9,11].



ŞEKİL 3. Saatlik ısıtma soğutma yükleri hesap akış diyagramı.

Çalışmada gerçekleştirilen enerji analizinde, ısıtma havalandırma ve iklimlendirme ekipmanlarının verimlerinin ve binanın kullandığı enerji miktarının sabit değerde alındığı Eş. 1’de verilen en basit enerji analiz formülü kullanılmıştır. Eş. 1 kullanılarak yıllık enerji sarfiyatı hesaplanmıştır.

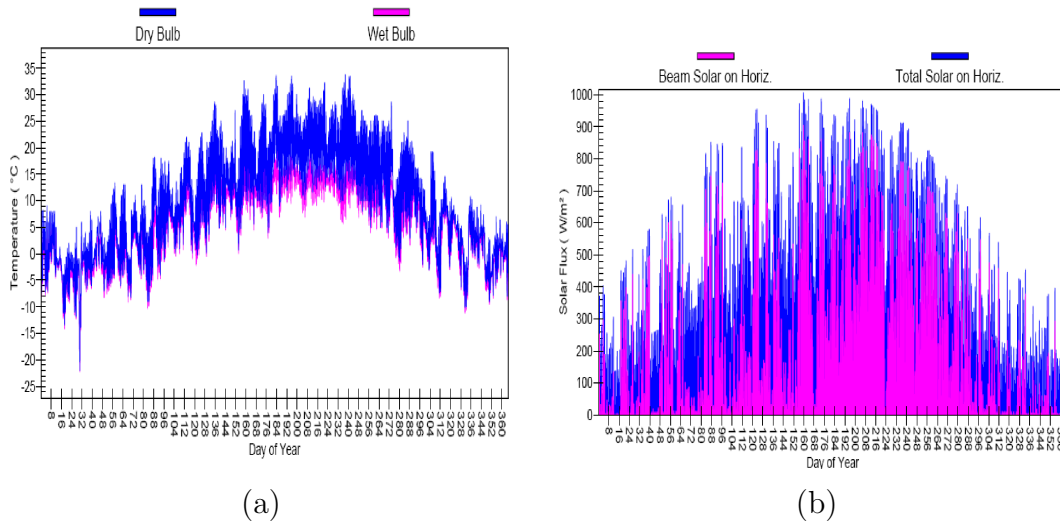
$$Q_{\text{bin}} = N_{\text{bin}} \frac{K_{\text{top}}}{\eta_h} [t_{\text{den}} - t_0]^+ \quad (1)$$

Eşitlikte, Q_{bin} yıllık enerji sarfiyatını, N_{bin} her sıcaklık aralığı için geçen süreyi, K_{top} binanın toplam ısı kayıp katsayısını, η_h yıllık yakacak kullanım verimini, t_0 dış hava sıcaklığını, t_{den} denge noktası sıcaklığını, $[]^+$ sıcaklık farkının sadece pozitif olduğu değerlerin hesaba katıldığını göstermektedir.

Örnek binada enerji analiz yöntemi olarak 8760 saat BIN yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntemde bina ve cihazların çalışması, birbirini izleyen günlere ve gerçek hava verilerine göre yılın 8760 saati için hesaplanır. Buradaki temel ilke, en kesin enerji ve çalışma maliyeti belirlemelerini yapabilmek için, binanın yıl içindeki gerçek çalışma deneyiminin benzetiminin yapılmasıdır. Bu yöntemle, kesin hava verileri, hava koşullarının hangi aralıkta ve hangi saatlerde değiştiği ayrıntılarıyla dikkate alınır. Ayrıca binanın her saat ve her gün için kaç kişi tarafından kullanıldığı, aydınlatma ve cihaz kullanımı da hesaba katılabilmektedir. Bununla birlikte, binanın günlük ve saat başı değişimleri ve ısıtma, havalandırma ve hava koşullandırma cihazlarının bu değişime tepkileri tüm yılın benzetimi olarak elde edilebilmektedir. Sonuçta enerji kullanım miktarı ve saatine ilişkin kesin ve ayrıntılı veriler bulmak için

yüksek kalitede veriler kullanılmış olmaktadır. Bütün bunlar da kesin bir çalıştırma maliyeti hesabı için gerek verilerdir [12].

8760 saat BIN enerji benzetim yönteminin örnek binaya uygulanması “Carrier E20-II HAP ver.4.04” programı ile yapılmıştır. Programla yılın her gün ve saati için dış hava sıcaklığı, solar radyasyon miktarları gibi veriler benzetilerek yıllık enerji sarfiyatı hesaplanmıştır (Şekil 4).



ŞEKİL 4. (a) Dış hava kuru ve yaş termometre sıcaklığının yılın günlerine göre değişimi, (b) Solar akının yılın günlerine göre değişimi.

3.2. Alternatif sistemlerin ekonomik karşılaştırılmaları. Örnek bina iklimlendirme sistemi alternatifleri olarak çalışmada dört farklı sistem değerlendirilmektedir. Bu sistemler, dört borulu fancoil, direkt genleşmeli klima sistemi, toprak kaynaklı ısı pompası ve su kaynaklı ısı pompası uygulamalarıdır. Mevcut teknolojiler ve uygulama örnekleri göz önüne alındığında dört sistemin örnek binaya uygulanmasının teknik olarak mümkün olduğu görülmektedir. Hesaplamalar için kullanılan “Carrier E20-II HAP ver.4.04” programı alternatif olarak sunulan dört iklimlendirme sistemine ait tasarım verilerini içerisinde barındırmaktadır. Alternatif sistemler Tablo 5’te toplamları verilen ısıtma ve soğutma yüklerini karşılayacak şekilde çözüm alternatifleri sunabilecek kapasitededir. Bu sistemlerin herbiri için “Carrier E20-II HAP ver.4.04” programıyla bina modelleri oluşturulmuştur. Çalışma ABD Doları (USD) bazında hazırlanmış olup, tarifeler Türkiye Kojenerasyon Derneği tarafından yayımlanan güncel yakıt fiyatlarından alınmıştır [13].

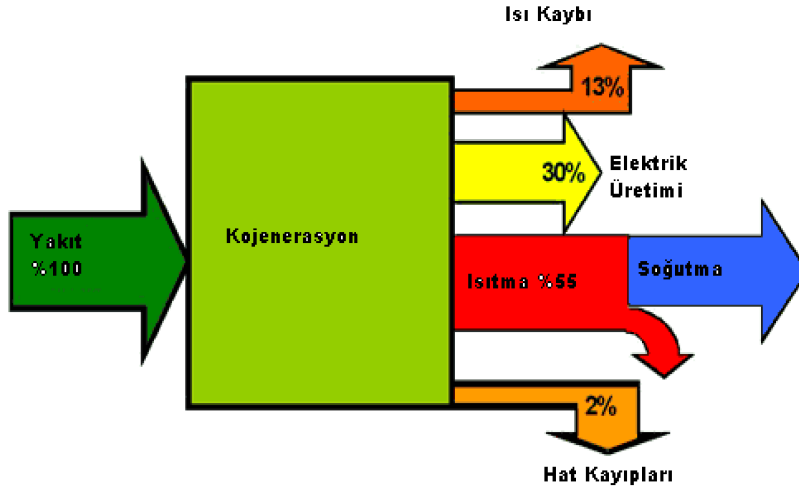
Sistemlere ait ilk kurulum masrafları, binaya ait hazırlanmış olan detaylı keşiflerden, ısı-enerji üretim ve dağıtım elemanları, soğutma ekipmanları, soğutma dağıtım elemanları, hava işlem ve dağıtım elemanları vb. ilgili sistemlerin maliyetleri ayrı ayrı olarak hazırlanmıştır. Sistemlere ait yıllık hizmet ömrü ile ilgili olarak ASHRAE uygulama el kitabı Bölüm 36’da Tablo 4’te sunulan değerler esaslar alınmıştır [14]. Tablo incelendiğinde kanal sistemleri için 30 yıl, kazanlar için 18-21 yıl, elektrikli serpantinler için 15 yıl, direkt genişlemeli cihazlar için 10 yıl gibi değişken kullanım ömürlerinden bahsedilmektedir.

Çalışmamızda dört sistemin de kullanım ömrü ortalama 20 yıl alınmış, her sistemin kendi özelliğinden kaynaklanan farklılıklar değiştirme maliyeti olarak 5, 10 ve 15’inci yılların sonu için hesaplanmış ve ilave değiştirme masrafları olarak hesaplara ilave edilmiştir. Tüm bu maliyetler kullanılarak dört iklimlendirme sisteminin 20 yıllık proje ömürleri, %10 faiz oranı için Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi ile karşılaştırılmış ve özet sonuçlar Tablo 6’da sunulmuştur. Tablo 6’da sunulan NBD’ler incelendiğinde, en ekonomik iklimlendirme sisteminin “Toprak Kaynaklı Isı Pompası” sistemi olduğu görülmektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında örnek bina için kurulacak kojenerasyon sisteminin toprak kaynaklı ısı pompası iklimlendirme sistemi ile ekonomik karşılaştırmaları yapılacaktır.

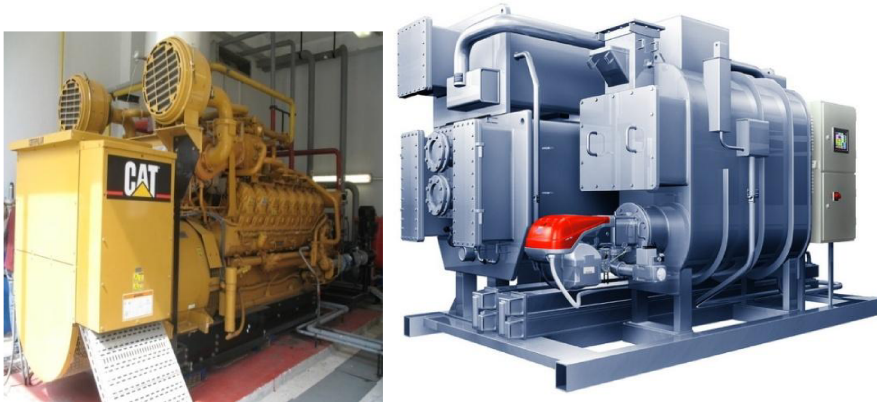
TABLE 6. İklimlendirme sistemlerin ekonomik karşılaştırmaları.

Maliyetler (USD)	Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi	Su kaynaklı ısı pompası sistemi	Direkt genişlemeli klima sistemi	Dört borulu fan-coil sistemi
Isıtma, soğutma tesisatı ilk yatırım maliyeti	1.507.419	979.822	0	753.709
Klima ve havalandırma tesisatı ilk yatırım maliyeti	1.017.048	1.017.048	1.120.874	847.540
Otomasyon sistemi ilk yatırım maliyeti	129.975	129.975	129.975	129.975
Doğal gaz sistemi ilk yatırım maliyeti	0	0	0	10.958
Toplam ilk yatırım maliyeti	2.654.442	2.126.845	1.250.850	1.742.183
Değiştirme maliyeti 5. yıl	79.633	63.805	37.525	87.109
Değiştirme maliyeti 10. yıl	79.633	63.805	280.219	87.109
Değiştirme maliyeti 15. yıl	79.633	63.805	37.525	87.109
Yıllık enerji sarfıyatı elektrik	686.169	807.023	898.828	672.161
Yıllık enerji sarfıyatı doğalgaz	0	0	0	138.599
Yıllık bakım ve işletme gideri USD/m ²	3,19	3,19	4,45	4,74
Yıllık bakım ve işletme gideri USD	78.539	78.539	109.668	116.737
Toplam yıllık gider	764.708	885.562	1.008.496	927.497
Hurda değeri	15.800	15.800	5.000	11.250
Toplam NBD	9.261.700	9.745.625	9.977.064	9.747.012
EN UCUZ SİSTEMLE FARK (USD)	0	483.925	715.364	485.312

3.3. Örnek bina kojenerasyon sistemi uygulaması. Çalışmamızda örnek bina özelliklerine uygun kojenerasyon sistemi seçilerek, ısıtma, soğutma ve güç (aydınlatma ve diğer elektrik) yüklerini karşılayacak bir çözüm oluşturulmuştur. Kojenerasyon sisteminde tek yakıt olarak doğalgaz kullanılacak olup, bina için gerekli güç, ısıtma ve soğutma bu yakıtın kojenerasyon sisteminde kullanılmasıyla karşılanacaktır. Soğutma sisteminde absorpsiyonlu soğutma grupları kullanılacak olup, ısıtma atık enerjiden faydalanarak tamamlanacaktır. Kojenerasyon sisteminin örnek binaya uygulanma prensibi Şekil 5-6'da sunulmuştur.



ŞEKİL 5. Kojenerasyon sisteminin örnek binaya uygulama şeması.



ŞEKİL 6. Kojenerasyon sisteminde kullanılan ekipmanlara ait örnekler.

Kojenerasyon sisteminin örnek binaya uygulanması sırasında “Carrier E20-II HAP ver.4.04” programıyla hesaplanan güç, ısıtma ve soğutma değerleri temel değerler olarak kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 7’de sunulmuştur. Kojenerasyon sistemi gaz türbinli olacak ve belirtilen değerleri minimumda karşılayacak şekilde seçilecektir.

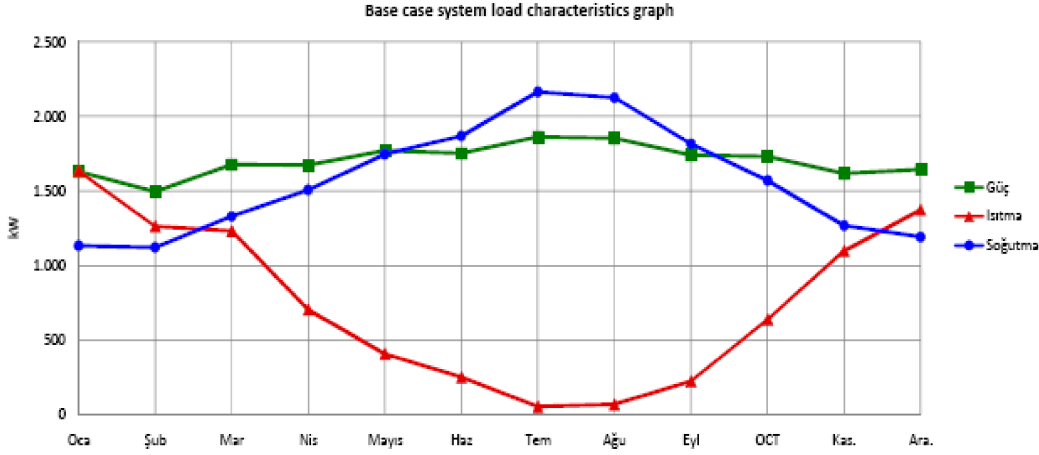
TABLO 7. Örnek bina temel yükleri.

No	Tanım	Kapasite
1	Bina baz ısıtma yükü (kW)	1.634,3
2	Bina baz soğutma yükü (kW)	2.166,1
3	Bina yıllık iklimlendirme dışı baz elektrik güç ihtiyacı (MWh)	10.706,3

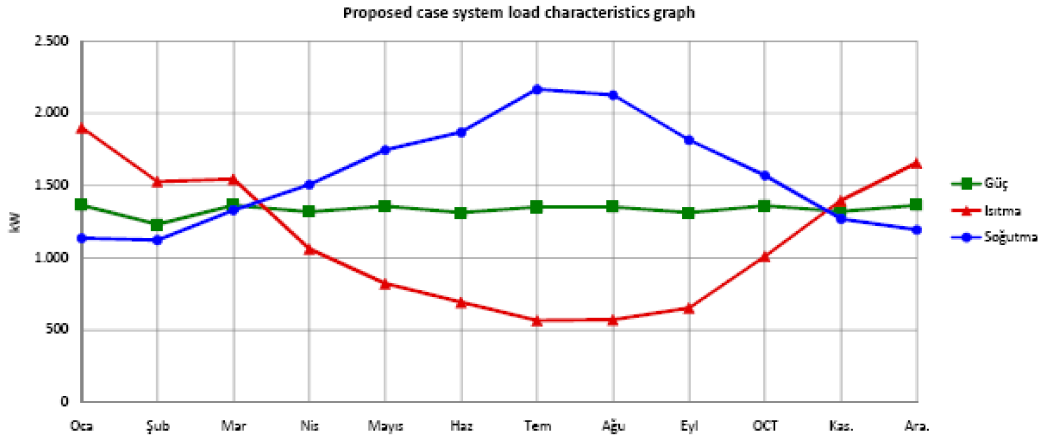
Temel değerler “RETSscreen sürüm 4” yazılımına girilerek örnek bina yük analizleri yapılmış ve uygun kapasitede kojenerasyon sistemi seçilmiştir. Program girdileri yapılırken, temel yüklerin aylara göre dağılımı daha detaylı sonuçlar veren “Carrier E20-II HAP ver.4.04” program çıktıları temel alınarak düzenlenmiştir. Yürürlükteki Elektrik Piyasası Kanununa göre, otoprodüktörler belli koşullar altında ürettikleri enerjinin %20’sini piyasaya satabilmektedirler. Bu durum, seçilen kapasite %20 arttırılarak sağlanan fazla elektriğin piyasada bulunan serbest tüketicilere satılmasına imkân vermektedir. Çalışmada hem sadece bina ihtiyaçlarını karşılayacak kapasitede, hem de %20 arttırılmış kapasite için hesaplamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 8’de sunulmuştur. Bina yük dağılımı ve seçilen kojenerasyon sistemlerinin sağladığı yük grafikleri ise Şekil 7-8’de verilmiştir.

TABLO 8. Kojenerasyon sistemi kapasite alternatifleri özeti.

Sistem seçimi	Gaz türbinli kojenerasyon gücü, kW	Isıtma kapasitesi, kW		Soğutma kapasitesi, kW		Bina iklimlendirme dışı güç, MWh		Şebekeye verilen elektrik, MWh
		Temel durum	Sağlanan	Temel durum	Sağlanan	Temel durum	Sağlanan	
Bina yüküne göre	1.364	1.634	2.145	2.166	2.166	10.706	11.557	248
Bina yükü %80 olacak şekilde arttırılmış kapasite	1.705= (1.364/0.8)	1.634	2.145	2.166	2.166	10.706	11.557	3.205



ŞEKİL 7. Bina yüklerinin aylara göre dağılımı.



ŞEKİL 8. Bina yüküne göre seçilen kojenerasyon sistemi yük dağılımı.

3.4. Örnek bina kojenerasyon sistemi ekonomik analiz. Çalışmamızda yer alan ekonomik analizlerde net bugünkü değer (NBD) yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde, sistemin ömrü boyunca yaratacağı fayda ile enflasyon değerlendirmesiyle sistemin yıllara göre fayda ve harcama değerleri hesaplanmakta, ardından fayda-harcama farkının sıfırdan büyük olması durumuna göre sistemin uygulanabilirliğine karar verilmektedir. NBD yöntemine ilişkin eşitlik aşağıda verilmektedir:

$$\sum_{n=m+1}^t \frac{F_n}{(1+i)^n} - \sum_{n=0}^m \frac{M_n}{(1+i)^n} > 0. \quad (2)$$

Eşitlikte, M_n , n yıldaki yatırım miktarını (USD), F_n , n yıldaki faydayı (USD), M , yatırımın tamamlanma yılını, $t - m$, sistemin (projenin) ekonomik ömrünü, i , reel faiz oranını (enflasyondan arındırılmış) göstermektedir.

Çalışmada kojenerasyon sistemi kullanım ömrü ortalama 20 yıl alınmıştır. Kojenerasyon alternatif sistemlerinin ilk kurulum masrafları ve değiştirme maliyetleri Tablo 9’da sunulmuştur. Tablo hazırlanırken, doğalgaz ve elektrik harcamalarında ortaya çıkan maliyetlerin hesabında, elektrik satış fiyatı 0,1061 USD/kWh ve doğalgaz alış fiyatı 0,3191 USD/m³ olarak alınmıştır [13]. Tablo 9’da görüldüğü gibi NBD’si 19.275.980 USD ile bina yüküne göre olan kojenerasyon alternatifi daha ekonomiktir. Kojenerasyon sisteminin önceki bölümde en ekonomik iklimlendirme alternatifi olarak verilen “toprak kaynaklı ısı pompası sistemi” ile karşılaştırabilmek için iklimlendirme dışı sistemlere ait yıllık elektrik sarfiyatı, ticari kullanım elektrik bedeli üzerinden hesaplanarak yıllık giderlere ilave edilmesi gerekmektedir. Örnek binada yıllık elektrik sarfiyatı 10.706.307 kWh’dir. Bunun karşılığı olarak iklimlendirme sistemi yıllık giderlerine 1.701.232 USD ilave edilmesi gerekir. Bu durumda toprak kaynaklı ısı pompası iklimlendirme sisteminin NBD’si 23.745.247 USD olarak hesaplanır. Görüldüğü üzere bina yüküne göre kojenerasyon sisteminin NBD’si daha düşüktür ve dolayısıyla iklimlendirme alternatiflerinden daha ekonomik bir çözümdür.

TABLO 9. Kojenerasyon alternatif sistemlerin ekonomik karşılaştırmaları.

MALİYETLER (USD)	Bina yüküne göre	Bina yükü %80 olacak şekilde arttırılmış kapasiteye göre
Kojenerasyon sistemi ilk yatırım maliyeti	1.958.849	2.372.294
Absorpsiyonlu chiller ilk yatırım maliyeti	520.080	520.080
Klima ve havalandırma tesisatı ilk yatırım maliyeti	1.017.048	1.017.048
Otomasyon sistemi ilk yatırım maliyeti	450.000	450.000
Doğal gaz sistemi ilk yatırım maliyeti	480.000	480.000
Lisans Bedeli	1.500	1.500
Toplam ilk yatırım maliyeti	4.427.477	4.840.922
Değiştirme maliyeti 10. yıl	195.885	237.229
Değiştirme maliyeti 15. yıl	97.942	118.615
Yıllık kojenerasyon doğalgaz gideri m ³	4.703.625	5.666.614
Yıllık kojenerasyon doğalgaz gideri	1.500.927	1.808.217
Yıllık bakım ve işletme gideri	231.548	231.548
Yıllık elektrik satışı MWh	248	3.205
Yıllık elektrik satış geliri	26.313	340.051
Yıllık gider	1.706.162	1.699.714
Hurda değeri	140.000	145.000
Toplam NBD	19.275.980	22.426.445

3.5. Kojenerasyon sistemi hassasiyet ve risk analizleri. Çalışmanın bu bölümünde “RETSscreen sürüm 4” programı ile bina yükleri esas alınarak seçilen kojenerasyon sistemi ile ilgili hassasiyet ve risk analizleri yapılmıştır. Örnek bina kojenerasyon sistemi tasarımında satın alınan elektrik ve doğalgaz, yıllık işletme ve bakım maliyetleri, ilk yatırım maliyeti gibi kalemlerin değişmesi yatırımın kabul edilebilir olup olmadığının ölçümünde önemli bir rol oynayacaktır. Dolayısıyla örnek bina kojenerasyon uygulamasında bu kalemlerden elektrik, doğalgaz ve ilk yatırım maliyeti kalemlerinin $[+15\%, -15\%]$ değişiminde proje geri ödeme süresine etkilerine ait hesaplamalar yapılarak sonuçlar Tablo 10-12’de sunulmuştur. Buna göre elektrik fiyatlarındaki azalma, diğer alternatifi (toprak kaynaklı ısı pompası) daha yüksek miktarlarda iklimlendirme dışı sistemlere ait yıllık elektrik sarfiyatı yüksek olduğu için daha cazip hale getirmektedir. Öte yandan, kojenerasyon sisteminde yakıt olarak doğalgaz kullandığından, doğalgaz fiyatlarındaki azalma, kojenerasyon sisteminin ilk yatırım tutarının daha hızlı geri dönüşünü sağlamaktadır. Yapılan çalışmada, alternatiflerin elektrik ve doğalgaz fiyatlarına duyarlı olduğu görülmektedir. İlk yatırım tutarındaki azalma ve artışın etkisi beklenildiği gibi gerçekleşmiştir.

TABLO 10. Elektrik maliyeti için %15 duyarlılık aralığı geri ödeme süresi özet tablosu.

Elektrik maliyeti değişimi (%)					
%	Geri ödeme süresi (yıl)	%	Geri ödeme süresi (yıl)	%	Geri ödeme süresi (yıl)
-15	>proje süresi	-4	12,4	7	6,9
-14	>proje süresi	-3	11,7	8	6,7
-13	>proje süresi	-2	11,1	9	6,5
-12	>proje süresi	-1	10,6	10	6,3
-11	>proje süresi	0	9,0	11	6,1
-10	>proje süresi	1	8,6	12	5,9
-9	>proje süresi	2	8,2	13	5,8
-8	>proje süresi	3	7,9	14	5,6
-7	17,3	4	7,6	15	5,5
-6	15,8	5	7,4		
-5	11,8	6	7,1		

TABLO 11. Kojenerasyon yakıt maliyeti için %15 duyarlılık aralığı geri ödeme süresi özet tablosu.

Kojenerasyon yakıt (doğalgaz) maliyeti değişimi (%)					
%	Geri ödeme süresi (yıl)	%	Geri ödeme süresi (yıl)	%	Geri ödeme süresi (yıl)
-15	6,1	-4	7,9	7	13,4
-14	6,2	-3	8,2	8	15,6
-13	6,3	-2	8,4	9	16,7
-12	6,5	-1	8,7	10	18,0
-11	6,6	0	9,0	11	>proje süresi
-10	6,8	1	10,4	12	>proje süresi
-9	7,0	2	10,8	13	>proje süresi
-8	7,1	3	11,2	14	>proje süresi
-7	7,3	4	11,7	15	>proje süresi
-6	7,5	5	12,2		
-5	7,7	6	12,7		

TABLO 12. İlk yatırım maliyetinin %15 duyarlılık aralığı geri ödeme süresi özet tablosu.

İlk yatırım maliyeti değişimi (%)					
%	Geri ödeme süresi (yıl)	%	Geri ödeme süresi (yıl)	%	Geri ödeme süresi (yıl)
-15	7,5	-4	8,6	7	10,8
-14	7,6	-3	8,7	8	10,9
-13	7,7	-2	8,8	9	11,0
-12	7,8	-1	8,9	10	11,1
-11	7,9	0	9,0	11	11,2
-10	8,0	1	10,2	12	11,3
-9	8,1	2	10,3	13	11,4
-8	8,2	3	10,4	14	11,5
-7	8,3	4	10,5	15	11,6
-6	8,4	5	10,6		
-5	8,5	6	10,7		

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yirmibin metrekare ve üzerinde inşaat alanı olan örnek bir binada kojenerasyon sisteminin uygulanabilirliği, enerji analizi ve ekonomik analizler gerçekleştirilerek analiz edilmiştir. Örnek bina uygulamasında NBD yöntemi ile 20 yıllık proje ömrü için yapılan hesaplamalar sonucunda en ekonomik sistemin bina yüküne göre seçilen kojenerasyon sisteminin olduğu görülmüştür. Bu sistemi ekonomiklik açısından bina yükünün toplam kapasitenin %80'i olacağı durum için seçilen kojenerasyon sistemi takip etmektedir.

Piyasaya enerji satmanın, piyasanın talebiyle değişkenlik göstereceği ve devletin alım garantisini vermediği durumda daha yüksek miktarlarda üretim yapan satıcılara karşı rekabet şansının düşük olduğu düşünülürse, ekonomik analizlerde de uygun çözüm olarak görülen kojenerasyon kapasitesinin bina yüküne göre seçilmesi daha doğru olmaktadır.

Çalışma içeriğinde ayrıca sisteme ait hassasiyet ve risk analizleri de gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde geri ödeme süresi için en hassas değer elektrik için fiyat değişimi olduğu görülmektedir. Diğer fiyat kalemlerinin değişmediği bir durumda, elektrik fiyatları %8 düşerse; geri ödeme süresi proje ömrü olan 20 yılın üzerine çıkmaktadır. Öte yandan elektrik fiyatlarına gelecek %15'lik bir artış geri ödeme süresini 5,5 yıla düşürmektedir.

Kaynaklar

- [1] *Kalorifer Tesisatı Proje Hazırlama Esasları MMO/2001/259*, TMMOB, Ankara 2001.
- [2] H. Osmanoğlu, *Pem Yakıt Pillerine Dayalı Eysel Kojenerasyon*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul 2007.
- [3] Ö. Eren, *Örnek Bir İşletmede Kojenerasyon Tesisi Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya 2006.
- [4] B. Arat, *Organize Sanayii Bölgelerinde Kojenerasyon Santralinin Yer Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2006.
- [5] D.Çakır, *Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinde Yakıt Olarak Doğalgaz Kullanımının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2006.
- [6] A. Tarakçıoğlu, *Sanayide Atık Isıdan Yararlanma Yöntemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2006.
- [7] S. Albayrak, *Kojenerasyonun Bölgesel Isıtma Sisteminde Kullanılabilirliği ve Klasik Bölgesel Isıtma ile Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 2007.
- [8] E.-R. Schramek, *Isıtma Klima Tekniği El Kitabı*, Türk Tesisat Mühendisliği Derneği 2003.

- [9] ASHRAE Technical Committee, *Commercial and Public Buildings (ASHRAE Handbook HVAC Applications SI Edition, Chapter 3)*, ASHRAE, Atlanta 2007.
- [10] T.C Resmî Gazete No. 27019, Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/10/20081009-2.htm>. Son erişim: 14-Haziran-2011.
- [11] ASHRAE Technical Committee, *ANSI/ASHRAE Standart 62.1-2004 Ventilation of Acceptable Indoor Air Quality*, ASHRAE, Atlanta 2004.
- [12] ALARKO Teknik Grup, *ALARKO CARRIER Teknik Bülten 21* (2007), 1-4.
- [13] Türkiye Kojenerasyon Derneği, Güncel Yakıt Fiyatları Karşılaştırma Tablosu (16.06.2009). http://www.kojenerasyon.com/tablo/Yakit_Fiyatlari_Karsilastirma_16.06.2009.xls. Son erişim: 14-Haziran-2011.
- [14] ASHRAE Technical Committee, *Owning and Operating Cost (ASHRAE Handbook HVAC Fundamentals SI Edition, Chapter 36)*, ASHRAE, Atlanta 2009.

