

# Soğuk Depolama için Güneş Enerjili Ejektör Soğutma Sistemi Uygulamasının Termodinamik Çevresel ve Ekonomik Analizleri

## Thermodynamic, Environmental and Economic Analyses of Solar Ejector Refrigeration System Application for Cold Storage

**İbrahim ÜÇGÜL\***

Süleyman Demirel Üniversitesi, YEKARUM-Yenilebilir Enerji Kaynakları ve Uyg. Merkezi, 32260, Isparta

Geliş Tarihi/Received : 02.03.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 04.05.2009

### ÖZET

Soğutma prosesleri, özellikle soğuk depolama tesislerinde geniş çaplı olarak uygulanmaktadır. Bu tesislerde buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine göre çalışan sistemler klasik bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde sıkıştırma işini yapan kompresör genel olarak elektrik enerjisi ile çalışmaktadır. Elektrik enerjisinin hiçbir çevresel kirlenici etkisi olmamasına rağmen, dünyanın pek çok yerinde, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil kökenli enerji kaynakları oldukça kirlenici etkiye sahiptir. Kısaca yaygın olarak kullanılan bu soğuk depoların (kullandıkları elektriğin menşei nedeniyle) dolaylıda olsa çevresel kirlenicilikleri vardır. Oysa ejektörlü soğutma sistemleri sıkıştırma için gerekli enerjiyi, çevresel etkileri ihmal edilebilecek düzeydeki yenilenebilir enerji kaynaklarından önemli biri olan güneş enerjisi gibi bir ısı kaynaktan alır. Bu çalışmada; güneş enerjili ejektör soğutma sisteminin termodinamik, çevresel ve ekonomik incelenmesi yapılmıştır. Çalışmada örnek uygulama olarak, Türkiye'nin elma üretiminin 1/5'ini karşılayan Isparta ilinde yoğun olarak kullanılan elma soğuk depolama tesisleri seçilmiştir. Bu araştırma ile soğuk depolamada, güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemi uygulamasının çevresel ve ekonomik avantajları; termodinamik, ekonomik ve çevresel analizlerle ortaya konmuştur.

**Anahtar kelimeler :** *Ejektörlü soğutma, Enerji, Ekonomi, Çevre, Termoekonomi, Bir değere getirilmiş maliyet.*

### ABSTRACT

The refrigeration processes have been widely applied for especially in cold storages. In these plants, the systems working with compressed vapour cooling cycles have been used as a classical method. In general, electrical energy is used for compressing in these processes. Although, mainly the electricity itself has no pollution effect on the environment, the fossil fuels that are widely used to produce electricity in the most of the world, affect the nature terribly. In short, these refrigeration plants, because of the source of the electricity pollute the nature indirectly. However, for compression an ejector refrigeration system requires one of the important renewable energy sources with negligible pollution impact on the environment, namely solar energy from a thermal source. Thermodynamical, environmental and economical aspects of the ejector refrigeration system working with solar energy was investigated in this study. As a pilot case, apple cold storage plants widely used in ISPARTA city, which 1/5 th of apple production of TURKEY has been provided from, was chosen. Environmental and economical advantages of solar ejector refrigeration system application for cold storage dictated by thermodynamic, economic and environmental analyses in this research.

**Keywords :** *Ejector refrigeration, Energy, Economy, Environment, Thermoconomics, Levelized cost.*

\* Yazılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail adress: iucgul@mmf.sdu.edu.tr (İ. Üçgül)

## 1. GİRİŞ

Soğutma ihtiyacı genel olarak ortam sıcaklığının yükseldiği, yaz iklim şartlarında artmaktadır. Soğutma proseslerinin yaygın endüstriyel kullanım alanlarından birisi de soğuk depoculuk alanıdır. Soğuk depolarda geleneksel olarak buhar sıkıştırma soğutma çevrimleri kullanılmaktadır (Üçgül, 2006). Bu çevrimde kompresörde sıkıştırma işi için gerekli enerji, elektrik enerji ile karşılanmaktadır. Diğer enerji kaynakları içerisinde çevresel etki bakımından en temiz kaynak olarak elektrik enerjisi görünmektedir. Ancak elektrik enerjisi elde edilmiş kaynağı olarak incelendiğinde durumun böyle olmadığı ortaya çıkmaktadır. Dünya üzerindeki pek çok ülkede elektrik enerjisi hala termik santrallerde ve fosil kökenli yakıtlar kullanılarak üretilmektedir. Bu durum, elektrik enerjisinde dolaylı olarak çevre kirlilik etkisi bulunduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin Türkiye elektrik enerji üretiminin yaklaşık % 75'ini fosil yakıt kullanan (kömür, petrol, doğal gaz vs.) termik santrallerde yapmaktadır (UNDP, 2006; Tarakcioğlu, 1984; TUSIAD, 1998). Elektrik enerjisi kullanımından doğan dolaylı çevresel etkide mutlaka incelenmesi gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Birincil enerji kaynaklarının hızla tükendiği ve çevre kirliliğinin büyük boyutlara ulaştığı günümüzde enerji tüketen ve dolayısıyla çevre kirlüten her proses özenle incelenmek zorundadır. Ejektörlü iklimlendirme ve soğutma sistemleri, özellikle endüstriyel soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasında günümüzde ve gelecekte en uygun seçenekler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ejektörlü soğutma sistemleri, sıkıştırma işi için gerekli enerjiyi ısı bir kaynaktan alır. Bu sistemlerde kullanılabilir ısı kaynakları olarak her türlü atık ısı kullanılabilir gibi, yenilenebilir enerji kaynaklı ısı enerjisi de kullanılabilir. Özellikle soğutma ihtiyacının en üst düzeye çıktığı yaz ayları için güneş enerjili ejektör soğutma sistemleri uygun seçenek olmaktadır (Üçgül, 2006). Türkiye'nin tarıma dayalı ekonomisi içerisinde soğuk depoculuk büyük önem arz etmektedir. İncelemede Türkiye'nin elma üretiminin 1/5 ini karşılayan Isparta ili ve buradaki elma soğuk depoları temel olarak alınmıştır. Isparta'da 162570 dekar alanda 2673810 adet elma ağacından üretilen 520000 ton elmanın soğuk muhafazasında il genelinde toplam 309665 ton kapasiteli 87 adet soğuk depo faaliyette bulunmaktadır (Isparta Valiliği, 2006).

Çalışmada Isparta'da bulunan soğuk depolar için güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemi, uygulama için ele alınmıştır. Ejektör soğutma sistemi ye-

nilenebilir enerji kaynaklarını kullanabilmesi, fosil kökenli yakıtları tüketmemesi ve çevreyi kirlitememesi gibi avantajları vardır. Bunların yanı sıra, ilk yatırım maliyetleri hariç işletme maliyetlerinin çok düşük oluşu her türlü soğutucu akışkanla (özellikle çevreye zararı olmayan suyu, soğutucu akışkan olarak kullanabilmesi) çalışabilmesi, tasarımının üretim ve işletiminin basit oluşu önemli üstünlüklerindedir. Ayrıca, 30-200 °C sıcaklıkları arasında her türlü ısı kaynağını kullanması atmosfer altı ya da üstü basınçlarda çalışabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Dezavantaj olarak sadece enerji performans katsayısının (COP) düşük oluşu verilebilir. Ejektör soğutma sisteminin, tasarım esasları, performansı ve uygulamaları ile ilgili çok sayıda yayın literatürde mevcuttur (Huang v.d., 2001; Khattab ve Barakat, 2002; Selbas v.d., 2003; Üçgül, 2006). Bu çalışma ejektör uygulamasının çevresel ve ekonomik boyutu ile ilgilidir. İncelenen parametreler; tasarım, performans değerlendirme ve işletme parametrelerinin belirlenmesi için önceden yapılan deneysel çalışma ve ilgili literatürde ki bilgilerden alınmıştır (Üçgül, 2006).

Ejektörlü soğutma sistemi, herhangi bir yenilenebilir enerji kaynağından ısı çekip, ejektörde kullanılacak buharı üreten jeneratör; jeneratörden gelen buharı ses üstü hızlara çıkarıp evaporatörden buhar emilmesini sağlayan ejektör; ejektörden gelen karışım halindeki buharı (çevreye ısı atarak) yoğunlaştıran kondenser ve soğutulacak ortamdaki ısı çeken evaporatörden oluşmuştur (Aphornratana ve Eames, 1997; Sun, 1997; Huang vd., 1998; Sun, 1999; El-Dessouky vd., 2002; Arbel ve Sokolov, 2004; Pridasawas ve Lundqvist, 2004). Çalışmada öncelikle bölge güneş enerjisi potansiyeli ortaya konmuştur. Ardından analiz, deneysel çalışma da belirlenen işletme koşullarındaki parametrelere göre yapılmıştır. Ekonomik ve çevresel değerlendirme, termodinamik analize dayalı olarak yapılmıştır.

Çalışmada incelenen bölge için, soğuk depolarda klasik buhar sıkıştırma soğutma çevrimi yerine güneş enerjili ejektörlü soğutma çevrimi kullanılarak, çevresel etki bakımından çok büyük miktarlarda (yaklaşık yıllık 4.2 milyon kg CO<sub>2</sub>) karbondioksit salınmasını (emisyonunu) engellediği, ayrıca bir değere getirilmiş maliyet (levelized cost) metoduna göre yapılan ekonomik analize göre de işletme maliyetleri yönünden çok daha (yaklaşık 5,56 kat) ekonomik olduğu ortaya konmuştur.

Bu sistemlerin, gelecek 10 yıllarda, üzerinde en fazla odaklanılan ve önemsenerek, çalışılan konularından olacağı çalışmayla vurgulanmıştır.

## 2. GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ VE EJEKTÖRLÜ SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE KULLANIMI

Güneş enerjisi, güneşten gelen ve dünya atmosferi dışında şiddeti sabit ve  $1370 \text{ W/m}^2$ , yeryüzünde ise  $0-1100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasında olan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi genel olarak konutlarda, sanayide, tarımda, ısı enerjisi uygulamaları olarak (proses enerjisi) ve elektrik enerjisi üretiminde (PV ve ısı güç santralleri) kullanılır. Güneş enerjisinden enerji üretim sistemlerinde, düşük, orta ve yüksek sıcaklık uygulamaları vardır. Sıcak su ( $40 \text{ }^\circ\text{C} - 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ) üretimi için düşük sıcaklık uygulamaları kullanılırken, endüstriyel proses ısılarının ( $100 \text{ }^\circ\text{C} - 250 \text{ }^\circ\text{C}$  buhar) karşılanmasında orta sıcaklık uygulamaları (odaklı toplayıcılar) yaygın olarak kullanılır (Sherif v.d., 1998). Güneş enerjisinin kullanımı ile enerji (petrol, doğalgaz v.s) dış-alım artış hızının frenlenmesi, fosil kökenli yakıt kaynaklarının tükenmesinin ve fosil yakıtlardan kaynaklanan çevre kirliliğinin engellenmesi mümkündür.

Türkiye coğrafi konumu itibarıyla zengin güneş enerjisi kuşağı içerisinde yer alan, her türlü güneş enerjisi uygulamalarına uygun bir ülkedir. Güneşlenme süresi bakımından Akdeniz bölgesi, Türkiye'de ikinci sırada yer almaktadır. Türkiye'de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli Tablo 1'de verilmiştir (Selbas v.d., 2003).

Güneş enerjisi sistemlerinde (düşük, orta ve yüksek sıcaklık sistemlerinde) elde edilen ısının her türlü ejektörlü soğutma sisteminin jeneratör ısısının üretiminde kullanılabilme potansiyeli mevcuttur. Isparta güneş enerjisi potansiyeli için, Akdeniz bölgesi verileri temel alınmıştır.

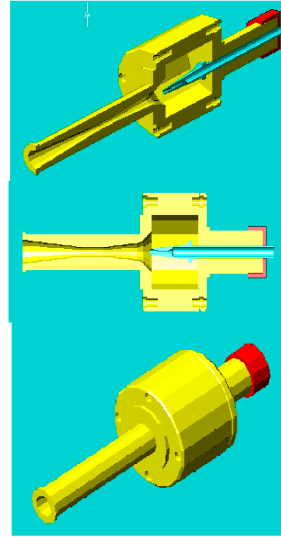
**Tablo 1. Türkiye'de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli.**

BÖLGE	Güneş Enerjisi Yıllık ort. kWh/m <sup>2</sup> .yıl	Güneşlenme Periyodu		
		Yıllık Ort. h/yıl	Maks. h/ay	Min. h/ay
G.Doğu Anadolu	1491.2	3016	407	126
Akdeniz	1452.7	2923	360	101
İç Anadolu	1432.6	2712	381	98
Ege	1406.6	2726	371	96
Doğu Anadolu	1398.4	2693	373	165
Marmara	1144.2	2528	351	87
Karadeniz	1086.3	1966	273	82

## 3. EJEKTÖRLÜ SOĞUTMA SİSTEMİ

### 3. 1. Ejektör

Ejektör, buhar ejektörlü soğutma sisteminin en önemli elemanıdır. Şekil 1a ve b'de çalışma kapsamında dizayn edilen ve imal edilen ejektörün kesit görünüşleri verilmiştir. Burada n: nozulu, k: karışım odasını, d: difüzörü; g, e, c ise sırasıyla ejektörün; jeneratör girişini, evaporatör girişini ve kondenser çıkışını göstermektedir (Üçgöl, 2006).



**a. Dizayn edilen ejektörün kesit şekilleri.**

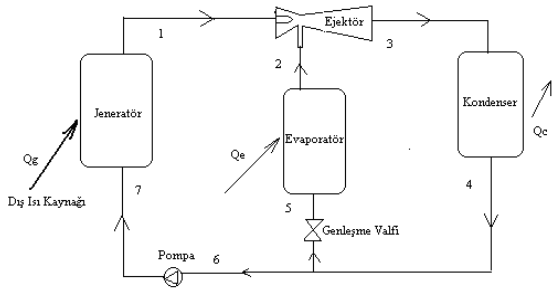


**b. İmal edilen ejektörün şekli**

**Şekil 1. Ejektör kesit görünüşleri.**

Ejektör tasarımında, literatürdeki ejektör teorisine dayalı yöntem kullanılmıştır (Sherif vd., 1998; ASHRAE, 1983; Alexis ve Karayiannis, 2005; Chunnanond ve Aphornratana, 2004; Rogdaki ve Alexis, 2003; Selvaraju ve Mani, 2004; Sun, 1999). Ejektörlü soğutma sistemi, buhar sıkıştırılmalı sisteme benzer. Bu sistemde; kompresörün yaptığı, soğutucu akışkanı düşük basınçtan emme ve yüksek basınca sıkıştırma işlemini, sisteme ilave edilen jeneratör ve ejektör ikilisi gerçekleştirir. Şekil 2'de şematik görünüşü verilen bu sistemde herhangi bir kaynaktan alınan (Güneş enerjisi) ısı jeneratörde bulunan akışkanı buharlaştırır. Jeneratörden çıkan buhar ejektörden yüksek hızla geçerken evaporatörden

ikincil buhar emişini gerçekleştirir. Ejektör karışım bölgesinde karışan akımlar kondenser basıncında ejektörü terk edip kondensere girer (Acar v.d., 2005).

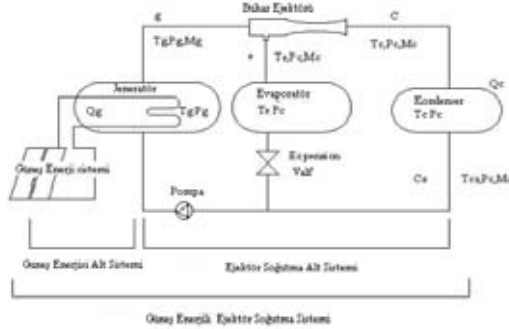


Şekil 2. Ejektörlü soğutma sisteminin şematik görünüşü (Üçgül, 2006).

Buhar ejektör soğutma sistemini, jeneratörün kullandığı ısıyı aldığı yenilenebilir ısı kaynağına göre güneş enerjili, jeotermal enerjili ve biyokütle enerjili olarak sınıflandırmak mümkündür (Üçgül, 2006).

### 3. 2. Güneş Enerjili Ejektör Soğutma Sistemi

Bu sistem genel olarak iki alt sistemden oluşmaktadır; birincisi güneş kolektöründen meydana gelmiş bir güneş enerjili ısıtma sistemi ve diğeri de bir jeneratör, bir evaporatör, bir ejektör ve bir kondensere oluşmuş ejektör soğutma sistemidir. Şekil 3'de bu sistem görülmektedir (Üçgül, 2006; Üçgül v.d., 2006).



Şekil 3. Güneş enerjili ejektör soğutma sistemi ve alt sistemler (Üçgül, 2006).

İşletim boyunca güneş kolektör sisteminden çekilen ısı jeneratörün alt-atmosferik basınç  $P_g$  ve  $T_g$  sıcaklığında doymuş buhar üretimine neden olur (Khattab ve Barakat, 2002). Jeneratörde üretilen yüksek hızlı buhar akımı, ejektör içerisindeki nozuldan geçer ve bu da düşük sıcaklıktaki ( $T_e$ ) evaporatörden buharın yüksek hızlı buhar akımı tarafından emilmesine neden olur. Karışmadan sonra, birleşik akış oluşturan birleşik akım basıncı, difüzerde yavaşlamadan sonra uygun bir yoğunlaşma basıncına ( $P_c$ ) gelmesi için

yeterince yüksek olmalıdır. Basınç yükselişinden sonra ejektörden gelen akım, kondensere gider ve ısı çevreye atılır. Kondensere sonra, akışın bir kısmı jeneratöre gider ve geri kalanı genişleme valfi içerisinde buharlaşma basıncına yükselen evaporatöre gider. Sistem performansını güneş enerjisi alt sistemi ve ejektör soğutma alt sistemi işletme koşulları belirler. İşletme parametrelerinin ( $T_c$ ,  $T_e$ ,  $T_g$ ) belirlenmesinde kullanılan deneysel güneş enerjili ejektörlü soğutma sisteminin fotoğrafı Şekil 4'de verilmiştir (Üçgül, 2006).



Şekil 4. Güneş enerjili ejektörlü soğutma sisteminin fotoğrafı (Üçgül, 2006).

## 4. SİSTEM HESAPLARI

### 4. 1. Teorik Analiz

Kararlı halde sistem bileşenlerinin temel denklemleri aşağıdaki gibidir (Acar vd., 2005; Üçgül v.d., 2006).

Jeneratöre verilmesi gereken ısı ( $\dot{Q}_g$ ):

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g (h_1 - h_7) \quad (1)$$

Evaporatörden çekilen ısı ( $\dot{Q}_e$ ):

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_e (h_2 - h_5) \quad (2)$$

Kondensere çevreye atılan ısı ( $\dot{Q}_c$ ):

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c (h_3 - h_4) \quad (3)$$

Ejektör için enerji dengesi:

$$\dot{m}_g h_1 + \dot{m}_e h_2 = \dot{m}_c h_3 \quad (4)$$

Kütle dengesi:

$$\dot{m}_c = \dot{m}_g + \dot{m}_e \quad (5)$$

Buhar oranı (G)

$$G = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} = \frac{h_1 - h_3}{h_3 - h_2} \quad (6)$$



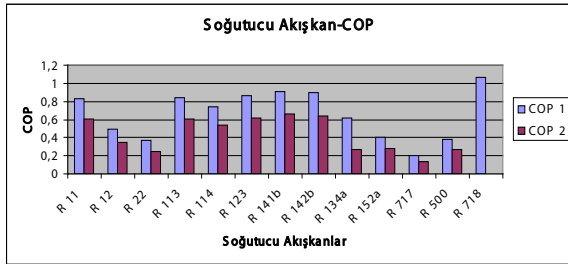
olmak üzere;

Sistemin soğutma performansı (etkinlik) katsayısı (COP) :

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = G \frac{(h_2 - h_5)}{(h_1 - h_7)} \quad (7)$$

dir.

Ejektör soğutma sistemi termodinamik analizde performans değerlendirme hesapları iki ayrı duruma göre yapılmıştır. COP 1 ile gösterilen durum (jeneratör sıcaklığı  $T_g=90$  °C, kondenser sıcaklığı  $T_c=35$  °C, evaporatör sıcaklığı  $T_e=5$  °C) iklimlendirme prosesleri için uygun durumu, COP 2 ile gösterilen durum ise (jeneratör sıcaklığı  $T_g=90$  °C, kondenser sıcaklığı  $T_c=35$  °C, evaporatör sıcaklığı  $T_e=-5$  °C) soğutma proseslerine uygun durum için seçilmiştir. Hesaplama sonuçları Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemi için değişik soğutucu akışkanların COP performans katsayıları değişimleri.

Çevresel ve ekonomik analizlerde, güneş enerjili ejektör sistemi performansının soğutucu akışkan ve işletme koşullarına bağımlılığını önlemek amacıyla COP değeri ortalama 0,25 ile 0,5 arasında alınabilir.

## 4. 2. Çevresel ve Ekonomik Analizler

### 4. 2. 1. Çevresel Analiz

Elektrik üreten santrallerden kaynaklanan sera gazı emisyonu, kullanılan kaynağa, kaynağın ısı gücüne, verimliliğine ve kullanılan teknolojiye göre farklılık gösterdiği için, her ülkenin elektrik tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları kendine özgü bir değer ifade etmektedir. Türkiye'de elektrik üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarına ait hesaplama Tablo 2'de verilmiştir (UNDP, 2006).

Bu tablodan Türkiye elektrik üretiminin yaklaşık % 75 inin fosil kökenli kaynaklardan karşılandığı görülmektedir. Çevresel analiz, literatürde verilen bu değerlere göre birim kWh elektrik üreti-

mi için atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarlarının hesaplanması esasına göre yapılmıştır.

Tablo 2. Türkiye'de elektrik üretiminden kaynaklanan sera gazı salımı.

Yakıt Kaynağı	Salınım faktörü KgCO <sub>2</sub> / kWh	2003 yılı üretim % olarak	2003 yılı elektrik üretiminden kaynaklanan sera gazı salımı
Taş kömürü	0.97 – 0.98	6 %	0,52kgCO <sub>2</sub> / kWh
Linyit	0.98 – 1.14	17%	
Fuel oil	0.85 – 0.91	7%	
Doğalgaz	0.46 – 0.56	45%	
Su	~ 0	25%	
Diğer	~ 0	0%	

Teknolojik gelişmeler ve modernleşme beraberinde büyük çevresel sorunlar ve tehditler getirmiştir. Endüstriyel her uygulama çevresel sorunlar oluşturmaktadır. Soğutma-iklimlendirme prosesleri endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Dünyada Endüstriyel soğutma ve iklimlendirme tesislerinin miktarı azımsanmayacak miktardadır. Bu tesislerde şimdiye kadar ozon tabakasına zarar veren pek çok soğutucu akışkan kullanılmıştır. Ayrıca tesislerin elektrik tüketimleri ve buna dolaylı olarak bağımlı olan fosil kökenli enerji kaynaklarının tüketilmesi ile fosil kökenli enerji kullanımından kaynaklanan emisyonların sebep olduğu çevresel tahribatlarda, büyük çevre sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnsanlığın geleceği ve ekolojik çevrenin korunmasında sosyal sorumluluk herkes kadar araştırmacı ve bilim adamlarına da düşmektedir. Geliştirilen her teknoloji ve proseste ekonomi ve emniyetin yanı sıra çevre boyutu da düşünülmelidir. Özellikle enerji kullanan her proseste ekonomiden önce çevresel maliyet ve sorumluluk hesaba katılmalıdır. Enerji üretiminde, çevresel boyut yönüyle büyük oranda temiz olan yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı olabildiğince yaygınlaştırılmalıdır. Soğutma ve iklimlendirme prosesleri için, yenilenebilir enerji kaynakları içindeki ısı potansiyeli itici güç olarak kullanan ejektörlü soğutma sistemleri en uygun sistemlerdir. Bu sistemlerde ısı enerjisi, jeneratör ısını karşılayacak kolaylıkla soğutma etkisine dönüştürülmektedir. Ejektörlü soğutma sistemleri sahip olduğu ısı potansiyel sebebi ile güneş enerjili sistemler ile birlikte kullanmaya çok uygundur.

Buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemleri elektrik

enerjisi kullandığından dolayı, elektrik enerjisinin üretim kaynağı bakımından çevresel etkisi araştırılmıştır. Buna göre 2 kWh soğutma etkisi elde etmek için yaklaşık 1 kWh elektrik enerjisi tüketilir (yaklaşık olarak COP=2). Tüketilen bu elektrik enerjisi, üretim orjini (kökeni) bakımından incelenirse; 1kWh elektrik enerjisi üretimi için yaklaşık olarak 3 kWh miktarında birincil enerji kaynağı tüketilmektedir (Tarakcıoğlu, 1984). Türkiye de elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık % 75 i fosil kökenli yakıtlardan yapılmaktadır. Dolayısıyla 1kWh elektrik üretimi için 2,1 kWh enerji eş değeri miktarında fosil kökenli yakıt tüketildiği söylenebilir. Birleşmiş milletler kaynaklarına göre 1kWh eş değer fosil kökenli yakıttan atmosfere 0,52 kg CO<sub>2</sub> salımı olmaktadır (UNDP, 2006). Türkiye şartlarında üretilen her 1kWh soğuk etkisi için 0.585 kg CO<sub>2</sub> atmosfere salınmaktadır. Bu bilgiler ışığında Isparta soğuk depolarında soğutma amaçlı kullanılan elektriğin çevresel etkisi yıllık 4132498.5 kg CO<sub>2</sub> atmosfere salınarak olmaktadır.

#### 4. 2. 2. Ekonomik Analiz

Ekonomik hesaplamalara temel olacak veriler Isparta ili için alınmıştır. Bu veriler Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3. Isparta soğuk hava depoları için temel veriler (Isparta Valiliği, 2006).**

Parametre	Değeri
Soğuk hava deposu (adet)	87
Soğuk hava kapasitesi (Ton)	309665
Yıllık çalışma saati (saat/yıl)	6000
Tesis ömrü (yıl)	15
Soğutma kapasitesi (kW)	2354,7
Kurulu kompresör gücü (kW)	1177,35
Elektrik maliyeti (Euro/ kW)	0,07- 0,14
Yıllık çalışma süresi (ay/ yıl)	10

Ekonomik analiz "bir değere getirilmiş maliyet"(levelized cost) metoduna göre ve yatırım ve işletme maliyetleri esas alınarak yapılmıştır (Bejan, 1996; Tsatsaronis ve Czesla, 2002; Temir ve Bilge, 2004; Isparta Sanayi Ticaret İl Müd., 2003-2006). Bu metoda göre: Bir değere getirilmiş fiyat düzeltme faktörü,

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}} \quad (8)$$

olmaktadır. Burada  $r_n$  nominal eskalasyon oranı ve  $i_{eff}$  ise efektif geri ödeme oranıdır. Anapara geri dönüşüm (kazanım) faktörü (CRF),

$$CRF = \frac{i_{eff}(1 + i_{eff})^n}{(1 + i_{eff})^n - 1} \quad (9)$$

Eskalasyon düzeltme faktörü (CELF) ;

$$CELF = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} CRF \quad (10)$$

Bir değere getirilme faktörü (A) ;

$$A = \frac{CELF}{1 - r_i} \quad (11)$$

şekindedir. Burada,  $r_i$  faiz oranıdır.

Bir değere getirilmiş yatırım bedelleri ( $Z_{CI}$ ) ve bir değere getirilmiş işletme-bakım bedelleri ( $Z_{OM}$ ) olmak üzere toplam bir değere getirilmiş bedeller (her bir bileşen için ayrı ayrı) Tablo 4'e göre hesaplanmıştır.

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{CI} + \dot{Z}_{OM} \quad (12)$$

Bağıntısından hesaplanır. Bu ifade açılırsa,

$$\dot{Z} = \left[ \frac{\dot{C}_{CI}}{n \times h} + \frac{C_{OM}}{h} \right] A \quad (13)$$

Elde edilir. Burada;

$\dot{C}_{CI}$  Yatırım maliyet masrafları,  $C_{OM}$  işletme-bakım masrafları,  $n$  sistem ekonomik ömrü (yıl),  $h$  yıllık işletme saati (saat/yıl)'dir.

**Tablo 4. Ejektörlü Sistem Ünitelerinin Maliyet Denklemleri (Hasan, 1999; El-Sayed, 2001; Kalogirou, 2003; El- Mudir v.d., 2004; Mabrouk v.d., 2007).**

Ünite	Maliyet Denklemleri
Evaporatör/ Kondenser, \$	$Z=430 \times 0.582 \times UA \times \Delta P_t^{-0.01} \times \Delta P_t^{-0.1} U$ , kW/m <sup>2</sup> k; A, m <sup>2</sup> , $\Delta P$ , kPa
Pompa, \$	$1000 \times 32 \times 0.000435 \times (\dot{M}_{water})^{0.55} \Delta P^{0.55}$ $\Delta P^{0.55} \left( \frac{\eta}{1 - \eta} \right) M$ , kg/s; $\Delta P$ , kPa
Eşanjör, \$	$1000 \times (12.86 + A^{0.8}) \Rightarrow A : m^2$
Ejektör, \$	$1000 \times 16.14 \times 0.989 \times (\dot{M}_{vapor} \times (T_r/P_r)^{0.05})$ $P_e^{-0.75}, D_i$ , kg/s; $P_r, P_e$ , MPa; $T_r$ , k
Solar Sistem, \$	$80 \$/m^2 \sim 160 \$/m^2$
Kompresör, \$	$7364 \times (\dot{M}_{vapor} \times \left( \frac{P_o}{P_i} \right) \times \left( \frac{\eta_c}{1 - \eta_c} \right)^{0.7} D_i$ , kg/s; $P_r, P_e$ , kPa, $\eta_c$ : kompresör verimi

1 kWh lik soğutma etkisi(SE) için tüketilen birim enerjinin maliyeti (özgül enerji maliyeti)(K),

$$K = \frac{Z}{E_h} \quad (14)$$

ile bulunmuştur.

Bir değere getirilmiş maliyet metoduna göre yapılan hesaplamada kullanılan ekonomik parametreler Tablo 5'de verildiği şekilde kabul edilmiştir.

**Tablo 5. Ekonomik analiz için temel veriler (Isparta Sanayi Ticaret İl Müd., 2003-2006).**

Parametre	Değeri
$n$ sistem ekonomik ömrü (yıl)	15 yıl
$r_i$ faiz oranı	%2
$r_n$ nominal eskalasyon oranı	%3
$i_{eff}$ efektif geri ödeme oranı.	%4
$h$ yıllık işletme saati (saat/yıl)	6000 saat /yıl

Tablo 4 ve 5'e göre yapılan hesaplamalar sonucu bir değere getirme faktörü (Levelized cost factor)  $A=1,27$  olarak bulunmuştur. Ekonomik değerlendirme için Tablo 3. deki değerler ile 8-14 denklemleri kullanılmıştır. Bayındırlık bakanlığı birim fiyat endeksi ve serbest piyasadan toplanan verilerle güneş enerjili ejektör soğutma sisteminin tesis yatırım birim maliyeti 1100 Euro/kWh olarak belirlenmiştir. Ejektörlü sistemin işletme bakım masrafları 9886,8 Euro/yıl olarak hesaplanmıştır. Diğer işletme masrafları (işçilik, sigorta, vergi, diğer...) buhar sıkıştırma soğutma sistemleri ile aynı olduğundan dikkate alınmamıştır. Mevcut soğuk depolar zaten kurulu olduğundan bu sistemler içinde ilk yatırım payı karşılaştırmada dikkate alınmamıştır. Analiz  $h = 6000$  h/yıl işletme süresi ve  $n = 15$  yıl ekonomik ömür dikkate alınarak yapılmıştır.

Ejektördeki sistem hesaplanırken; "ilk yatırım masrafları + işletme masrafları" dikkate alınmış mevcut buhar sıkıştırma soğutma sistemi için sadece elektrik tüketimine bağlı işletme masrafları göz önüne alınmıştır. Buna göre bir değere getirilmiş maliyetler (Levelized cost) ejektörlü sistem için  $Z_{es} = 37,6942$  Euro/h ve buhar sıkıştırma soğutma sistemi için  $Z_{bss} = 209,5635$  Euro/h bulunmuştur.

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma ile güneş enerjili ejektörlü soğutma sisteminin çevresel ve ekonomik boyutları ortaya konulmuştur. Bugüne kadar yapılan çalış-

malarda geleneksel buhar sıkıştırma endüstriyel soğutma tesislerinin, kullandıkları soğutucu akışkan dışında çevresel etkisi olmadığı kabul edilmiştir. Ancak bu tesislerde, kompresörde kullanılan elektrik enerjisinin üretim kökeni (orjini) hiç irdelenmemiştir. Bu durum irdelenmediğinde durumun hiç de sanıldığı gibi olmadığı ortaya konmuştur. Bu çalışmada yapılan analizlerde, örnek durum olarak Isparta ilindeki endüstriyel soğuk depolar incelenmiştir. Sonuçlar, dünya ölçeğinde çok küçük bir yer olan bu bölgedeki, geleneksel buhar sıkıştırma soğutma çevrimi kullanan soğuk depoların, yıllık 4.2 milyon kg miktarında karbondioksit gibi sera gazının dolaylı olarak atmosfere salınmasına yol açarak, çevre için büyük bir tahribat kaynağı olduğunu göstermiştir. Karbondioksit salım miktarları dünya ölçeğinde değerlendirildiğinde durumun ne denli korkutucu olduğu ortaya çıkmaktadır. Oysa bu çalışma kapsamında incelenen ejektörlü soğutma sistemleri, sıkıştırma için gereken enerjiyi, elektrikten değil, çevresel kirlenme etkileri ihmal edilebilecek düzeyde olan güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaktan alır. Bu özellik, bu sistemlerin, geleneksel buhar sıkıştırma sistemlere göre en önemli üstünlüğüdür. Ejektörlü soğutma sistemlerine kademeli bir geçişin bile, çevresel etki olarak büyük katkı sağlayacağı açıktır. Ekonomik analize göre değerlendirilme yapıldığında, güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemlerinin, ilk yatırım maliyetleri (1100 Euro/kWh) başlangıçta yüksek görünse bile, sistemin kendini kısa sürede amorti ettiği ve işletme maliyetleri bakımından da kısa sürede kar'a geçtiği ortaya konmuştur. Çalışmada uygulanan, bir değere getirilmiş maliyet metoduna göre değerlendirme yapıldığında, (saatlik maliyetler ve ekonomik ömür göz önüne alınarak) güneş enerjili ejektörlü soğutma sisteminin, geleneksel buhar sıkıştırma soğutma sistemine göre, (soğutma performans katsayısının (COP) yaklaşık 4 kat küçük olmasına rağmen) işletme maliyetleri bakımından 5,56 kat daha ekonomik olduğu ortaya konmuştur. Bu değerler, analiz sonucu ejektörlü soğutma sistemi için  $Z_{es} = 37,6942$  Euro/h ve buhar sıkıştırma soğutma sistemi için  $Z_{bss} = 209,5635$  Euro/h olarak bulunmuştur.

Genel olarak Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, düşük enerji yoğunlukları ve yüksek ilk yatırım masraflarından dolayı yeterince hızlı değildir. Ancak bu ça-

lişmada yapılan analizlerle, çevresel etki boyutu ve ekonomik ömür süresince işletme maliyetleri boyutu da göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklı uygulamalara yönelmenin en uygun çözümleri sunduğu ortaya konmuştur.

## 6. SONUÇLAR

Genel olarak Türkiye’de güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yeterli düzeyde faydalanılmadığı bir gerçektir. Oysa bu kaynakların, soğutma gibi pek çok alanda kullanılabilme potansiyelinin var olduğu ve çevresel etki ile ekonomik boyutlar birlikte düşünülüğünde aslında en uygun çözümlerin yenilenebilir enerji destekli sistem uygulamalarında olduğu, çalışma ile sayısal olarak ortaya konmuştur. Geleneksel buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemlerinin,

1kWh soğuk etkisi üretmek için 0,585 kg miktarında ( $CO_2$ ) karbondioksitin atmosfere salınmasına sebep olduğu ve ayrıca 1kWh soğutma etkisi için maliyetin, ejektörlü sistemde 0,016 Euro/kWh<sub>(SE)</sub> ve geleneksel soğutma sisteminde 0,178 Euro/kWh<sub>(SE)</sub> olduğu ortaya konmuştur.

Sunulan çalışma, çevresel ve ekonomik değerlendirilme boyutları ile bundan sonra yapılacak olan yenilenebilir enerji kaynakları kullanan soğutma sistemleri ile ilgili çalışmalar için bakışı olumlu yönde değiştirecektir.

## 7. TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya, 104M375’nolu proje ile TÜBİTAK ve 2003-14’nolu proje ile SDU-APYB destek vermiştir. Her iki kurumada teşekkür ederim.

### SEMBOLLER

A	: Bir değere getirilme faktörü
C	: Masraflar
CELF	: Eskalasyon düzeltme faktörü
COP	: Soğutma performans katsayısı
CRF	: Anapara geri dönüşüm( kazanım) faktörü
E	: Enerji
G	: Buhar oranı
h	: Entalpi
h	: Yıllık işletme saati
i	: Faiz oranı
K	: 1 kWh lik soğutma etkisi(SE) için tüketilen birim enerjinin maliyeti
k	: Bir değere getirme faktörü
m	: Kütle
n	: İşletme ekonomik ömrü
P	: Basınç
Q	: Isı
r	: Faiz-eskelasyon-enflasyon oranı

T	: Sıcaklık
Z	: Bir değere getirilmiş bedeller

### Alt indisler

bss	: Buhar sıkıştırırmalı sistem
c	: Kondenser
Cl	: Yatırım
d	: Difüzör
e	: Evaporatör
eff	: Efektif
es	: Ejektör sistemi
g	: Jeneratör
h	: Harcanan
i	: Bileşenler
k	: Karışım odası
n	: Nozul
OM	: işletme-bakım
SE	: Soğutma etkisi

### KAYNAKLAR

- Üçgül, İ. 2006. TÜBİTAK Proje Raporu, Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Isının Soğutma ve İklimlendirme proseslerinde Kullanım Potansiyelleri, Proje no: 104M375, Temmuz, 2006.
- UNDP, 2006. GEF Destek Programı (SPG), Küresel İklim Değişiklikleri için Yerel Çözümler ve SPG Yaklaşımı, TTGV., ART Tanıtım LTD. Şti. 8-12.
- Tarakcioğlu, I. 1984. Tekstil Proses İşlemlerinde Enerji Tüketimleri ve Ekonomisi, Uludağ Üniversitesi. Tekstil Müh. Böl. Yayınları, 18.
- TUSIAD, 1998. Türk Sanayici ve İşadamları Derneği, 21 Yüzyıla Girerken Türkiye’nin Enerji Stratejilerinin Değerlendirilmesi Raporu. 12-239, İstanbul.
- Isparta Valiliği Web sitesi, 2006. URL(<http://www.isparta.gov.tr>).
- Khattab, N. M., Barakat, M. H. 2002. Modeling the design and performance characteristics of solar steam-jet cooling for comfort air conditioning, Solar Energy. 73 (4), 257-267.
- Huang, B. J., Petrenko, V. A., Samofatov, I. YA., Shche-



- ting, N. A. 2001. Collector selection for solar ejector cooling system, *Solar Energy*. 71 (4), 269-274.
- Selbas, R., Ucgul, I., Sencan, A., Kızılkın, O. 2003. "Güneş enerjisi Destekli Buhar- Jet Soğutma Sisteminin İklimlendirmede Uygulanabilirliğinin Araştırılması" Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, TMMOB, MMO, 20-21 Haziran 2003, Mersin.
- Aphornratana, S., Eames, I. W. A. 1997. Small capacity steam-ejector refrigerator: experimental investigation of a system using ejector with movable primary nozzle., *Int.J.Refring.* 20 (5), 352-358.
- Sun, D.W. 1999. Comparative study of the performance of an ejector soğutma cycle operating with various refrigerating, *Energy convers. Mgmt.* (40), 873-884.
- Huang, B. J., Chang, M. J., Petrenko, V. A., Zhuk, K. B. A. 1998. Solar ejector cooling system using refrigerant R141b, *Solar Energy*. 64 (4-6), 223-226.
- Pridasawas, W., Lundqvist, P. 2004. An exergy analysis of a solar-driven ejector refrigeration system, *Solar Energy*. (76), 369-379.
- El-Dessouky, H., Ettouney, H., Aladiqi, I., Al-Nuwaibit, G. 2002. Evaluation of steam jet ejectors, *Chemical Eng. and Processing*. (41), 551-561.
- Arbel, A., Sokolov, M. 2004. Revisiting solar powered ejector air conditioner. The greener the better, *Solar Energy*. (77), 57-66.
- Sun, D.W. 1997. Solar powered Combined ejector vapor compression cycle for air conditioning and refrigeration, *Energy converts. Mgmt.* 38 (5), 479-491.
- Sherif, S. A., Goswami, D. Y., Mathur, G. D., Iyer, S. V., Davanager, B. S., Natarajan, S., Colacino, F. A. 1998. Feasibility Study of Steam-jet refrigeration, *Int, journal of Energy research*. (22), 1323-1336.
- Ashrae, 1983. Refrigerants, In *ASHRAE Equipment Handbook*. Chapter. 13.
- Alexis, G. K., Karayiannis E. K. 2005. A solar ejector cooling system using refrigerant R134 a in the Athens area, *Renewable Energy*. (30), 1457-1469.
- Chunnanond, K., Aphornratana S. 2004. Ejectors: applications in refrigeration technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (8), 129-155.
- Rogdakis E. D., Alexis G. K. 2003. Design and parametric investigation of an ejector in an air-conditioning system, *Applied Thermal Engineering*. (20), 213-226.
- Selvaraju A., Mani A. 2004. Analysis of an ejector with environmentally friendly refrigerants, *Applied Thermal Engineering*. (24), 827- 838.
- Sun D. W. 1999. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerating, *Energy convers. Mgmt.* (40), 873-884.
- Acar, M., Üçgöl, İ., Koyun, T. 2005. "Jeotermal Buhar Ejektörlü Soğutma Sistemi Tersinmezliklerinin İncelenmesi" Ulusal İklimlendirme Sempozyumu ve Sergisi, 25-26-27 Şubat, 2005. Antalya.
- Üçgöl İ., Selbaş R., Ünlü F., Elbir A. 2006. "Ejektörlü soğutma sistemlerine uygun soğutucu akışkanların belirlenmesi" VI. Ulusal temiz enerji sempozyumu, 408-413, 25-27 Mayıs, 2006. Isparta.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. 1996. *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Tsatsaronis, G., Czielsa, F. 2002. *Thermoeconomics, Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press, Third Ed. (16), 659-680.
- Temir, G., Bilge, D. 2004. Isıl Sistemlerin Termoekonomik Çözümlemesi, *Termodinamik*. 88-94, Eylül, 2004.
- Isparta Sanayi Ticaret İl Müd, 2003-2006. Yıllık Raporlar.
- El-Sayed, Y.M. 2001. Designing desalination systems for higher productivity, *Desalination*. (134), 129-158.
- El-Mudir, W., El-Bousiffi, M., Al-Hengari, S. 2004. Performance evaluation of small size TVC desalination plant, *Desalination*. (165), 269-279.
- Mabrouk, A.A, Nafey, A.S., Fath, H.E.S. 2007. Thermoeconomic analysis of some existing desalination processes, *Desalination*. (205), 354-373.
- Kalogirou, S. 2003. The potential of solar industrial process heat applications, *Applied Energy*. (76), 337-361.
- Hasan, A. 1999. Sizing solar space heating system: A case study, *Renewable Energy*. (16), 720 -724.