



ADSORPSİYONLU BİR SOĞUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANSININ FARKLI ÇALIŞMA ÇİFTLERİ İÇİN TEORİK ANALİZİ

İsmail SOLMUŞ* ve Cihan YILDIRIM**

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
25240 Erzurum, er24dem@gmail.com

**Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
01180 Adana, cihan35@gmail.com

(Geliş Tarihi: 09.01.2013, Kabul Tarihi: 16.07.2013)

Özet: Bu çalışmada, adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminin performansı farklı çalışma çiftleri için çeşitli adsorpsiyon, desorpsiyon, evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında teorik olarak analiz edilmiştir. Sistemde kullanılan adsorban-adsorplanan çalışma çiftinin denge adsorpsiyon kapasitesi çifte ait Dubinin-Astakhov (D-A) denklemi vasıtasıyla hesaplanmıştır. Desorpsiyon işlemi sırasında yatağı yenilemek için gerekli enerji miktarı ise çalışma çiftine ait adsorpsiyon ısı yardımcıyla elde edilmiştir. Yapılan analizde, adsorban-adsorplanan çalışma çiftleri arasında, silika jel-su çalışma çifti performans açısından en iyi sonucu verdiği saptanmıştır. Sistem performansı, artan evaporatör-desorpsiyon ve azalan kondenser-adsorpsiyon sıcaklıkları ile önemli oranda artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyonlu soğutma, Çalışma çifti, COP

THEORETICAL ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF AN ADSORPTION COOLING SYSTEM FOR VARIOUS WORKING PAIRS

Abstract: In this study, the performance of an adsorption cooling system for various adsorbent-adsorbate working pairs has been theoretically investigated for different adsorption, desorption, evaporator and condenser temperatures. Equilibrium adsorption capacity of the working pair used in the system was evaluated by the Dubinin-Astakhov (D-A) equation. The amount of energy supplied to the system during regeneration period is evaluated by the heat of adsorption of the working pair. Generally, among the adsorbent-adsorbate working pairs investigated, silica gel-water working pair is the best in terms of the performance evaluation. Performance of the system is significantly getting better with increasing evaporator-desorption temperatures and with decreasing condenser-adsorption temperatures.

Keywords: Adsorption cooling, Working pair, COP

SEMBOLLER

C_p	Özgül ısı [kJ/kg.K]
H_{de}	Desorpsiyon ısı [kJ/kg]
k	Dubinin-Astakhov denklemi sabiti
L	Gizli buharlaşma ısı [kJ/kg]
m	Kütle [kg]
n	Dubinin-Astakhov denklemi sabiti
P	Basınç [kPa]
T	Sıcaklık [°C]
x_o	Dubinin-Astakhov denklemi sabiti
X	Adsorpsiyon kapasitesi [kg _s /kg _{ad}]

Alt simgeler

ad	Adsorban
s	Adsorplanan soğutucu akışkan
k	Kondenser
e	Evaporatör
d2	Desorpsiyon
a2	Adsorpsiyon
doy	Doyma
min	Minimum
max	Maksimum

GİRİŞ

Türkiye’de artan nüfusa ve büyüyen turizm sektörüne bağlı olarak soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin kullanımı, özellikle ülkenin Ege ve Akdeniz kıyılarında giderek yaygınlaşmaktadır. Diğer taraftan, Türkiye’deki soğutma taleplerinin büyük bir kısmı yoğun elektrik enerjisi tüketen geleneksel buhar sıkıştırma sistemleri ile karşılanmaktadır. Bu nedenle, yaz aylarında, soğutma yüküne bağlı olarak konutlarda ve turizm sektöründe tüketilen elektrik enerjisi miktarında hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Soğutma ve iklimlendirme kaynaklı enerji tüketimi, güneş enerjisi, atık ısı veya jeotermal enerji destekli adsorpsiyonlu soğutma (ADS) sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanımı ile azaltılabilir.

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerini, günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan geleneksel buhar sıkıştırma soğutma sistemleri ile karşılaştırdığımızda bu sistemlerin sahip olduğu bazı avantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Enerji tasarrufu sağlamaları

- Kullandıkları aracı akışkanın çoğunlukla çevreci olması
- Sessiz çalışmaları
- Bakım giderlerinin düşük olması

Fakat ADS sistemleri, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek ve performans katsayılarının (COP) düşük olması nedeni ile şimdilik buhar sıkıştırma sistemleri ile rekabet edebilecek düzeyde değildirler. Dolayısıyla bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin düşürülmesi ve COP değerlerinin yükseltilmesi ile birlikte ticari bir ürün olmalarının önündeki engeller büyük ölçüde kaldırılmış olacaktır. Bu sistemlerin başarılı bir şekilde çalışması büyük ölçüde adsorban-adsorplanan (adsorbent-adsorbate) çiftinin doğru seçimine bağlıdır. Zeolit-su, zeolit-organik soğutucular, silika jel-su ve aktif karbon-metanol adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılacak uygun adsorban-adsorplanan (adsorbent-adsorbate) çiftlerinden bazılarıdır (Sumathy *vd*, 2003).

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan çeşitli adsorban-adsorplanan çalışma çiftlerinin sistem performansı üzerine olan etkileri literatürde karşılaştırmalı olarak az sayıda araştırmacı tarafından kapsamlı olarak incelenmiştir. Askalany A.A. ve diğerleri (Askalany *vd*, 2013) ADS sistemlerinde kullanılan mevcut çalışma çiftleri ile kullanılması mümkün olabilecek bir takım adsorban-adsorplanan çalışma çiftlerinin sistem performansı üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmalar neticesinde soğutma sisteminin maksimum COP değeri 0.83 olarak bulunmuş ve sistemde silika jel-su veya chloride kompozit-su çalışma çiftlerinden herhangi birinin kullanılması durumunda sistemin en yüksek COP değerine ulaştığı beyan edilmiştir. Ayrıca, zeolit-su çalışma çiftinin en düşük performansa sahip adsorban-adsorplanan çifti olduğu ifade edilmiştir. En düşük evaporatör sıcaklığına -50 °C ile metal hidrider /hidrojen ve en yüksek desorpsiyon sıcaklığına 350 °C ile zeolit-su çalışma çiftinin sahip olduğu ve son olarak ADS sistemlerinde kullanılması mümkün yeni çalışma çiftlerinden AC/R134a'nın adsorpsiyon kapasitesinin 2 kg_s/kg_{ad} olduğu beyan edilmiştir. Wang L.W. ve diğerleri (Wang *vd*, 2009) farklı adsorban-adsorplanan çalışma çiftlerinin avantaj ve dezavantajlarını ve bu çiftlerin denge adsorpsiyon kapasitelerini tanımlayan modelleri araştırmışlardır. Tamainot-Telto Z. ve diğerleri (Tamainot *vd*, 2009) 26 çeşit farklı aktif karbon-amonyum çalışma çiftini üç farklı çevrimde yaygın koşullar altında buz üretimi, klima ve ısı pompası uygulamaları için incelemişlerdir. En iyi termal performansa, iki yataklı çevrimde ve desorpsiyon sıcaklığının 100 °C olduğu durumda monolithic karbon-amonyum çalışma çifti ulaşmıştır. Klima uygulaması için sistemin COP değeri 0.61 olarak bulunmuştur. San J.Y. ve Lin W.M. (San ve Lin, 2008) aktif karbon-metanol, silika jel-su ve zeolit 13X-su çalışma çiftlerini kullanan adsorpsiyonlu bir ısı pompasını incelemiş ve aktif karbon-metanol çalışma çiftinin kullanılması durumunda sistemin en yüksek COP değerine ulaştığını ifade etmişlerdir.

Ayrıca, çok sayıda araştırmacı tarafından çok farklı tiplerde adsorpsiyonlu soğutma sistemi tasarlanmış, üretilmiş ve bu sistemlerin performansı farklı çalışma koşulları altında teorik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Zhang L.Z. (Zhang, 2000) eksoz gazları ile desteklenen ve zeolit 13X-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu bir klima sistemi imal etmiş ve bu sistemin performansını deneysel olarak incelemiştir. Adsorpsiyon sıcaklığının 80 °C, desorpsiyon sıcaklığının 200 °C, evaporatör sıcaklığının 10 °C ve kondenser sıcaklığının 45 °C olduğu durumda sistemin COP değeri 0.38 olarak bulunmuştur. Fadar A.E. ve diğerleri (Fadar *vd*, 2009) aktif karbon-amonyum çalışma çiftini kullanan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminin performansını teorik olarak incelemişlerdir. Evaporatör sıcaklığının 0 °C, kondenser sıcaklığının 30 °C ve desorpsiyon sıcaklığının 100 °C olduğu durumda sistemin COP değerini 0.43 olarak rapor etmişlerdir. Solmuş İ. ve diğerleri (Solmuş *vd*, 2011) doğal zeolit-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu prototip soğutma sisteminin performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Prototip sistemin ortalama COP değeri, adsorpsiyon sıcaklığının 45 °C, desorpsiyon sıcaklığının 150 °C, kondenser sıcaklığının 30 °C olduğu üç farklı evaporatör sıcaklığı (22.5 °C, 15 °C ve 10 °C) için 0.25 olarak bulunmuştur. Amanul Alam K.C. ve diğerleri (Amanul *vd*, 2013) silika jel-su çalışma çiftini kullanan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performansını Tokyo, Japonya iklim koşullarında teorik olarak incelemişlerdir. Sistemin COP değeri temel çalışma koşulları altında ve öğlen vaktinde 0.3 olarak bulunmuştur.

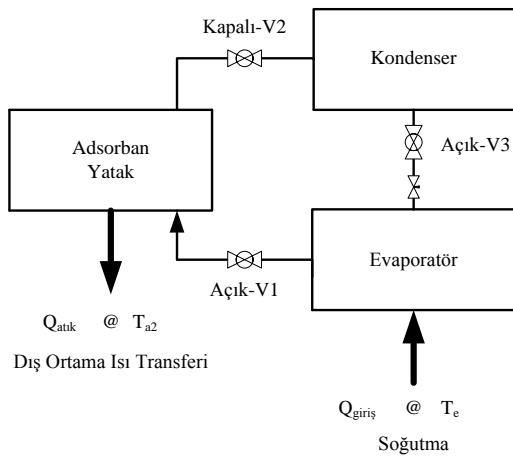
Son olarak çeşitli araştırmacılar tarafından farklı adsorban-adsorplanan çalışma çiftlerinin denge durumundaki adsorpsiyon kapasiteleri farklı denge koşulları için (adsorban yatak sıcaklığı ve adsorplanan akışkan basıncı) deneysel olarak elde edilmiştir. Denge adsorpsiyon kapasitesi deneysel olarak elde edilen adsorban-adsorplanan çalışma çiftlerinden bazıları; sentetik zeolite-su (Wang ve Wang, 1999), silika jel-su (Ng *vd*, 2001; Afonso ve Silveira, 2005), aktif karbon-metanol (Wang ve Wang, 1999; Wang *vd*, 2006), ACF (A-15)-etanol ve ACF (A-20)-etanol (El-Sharkawy *vd*, 2006), aktif karbon-amonyum ve kompozit adsorbent-amonyum (Wang *vd*, 2006), NA-su ve NB-etanol (Cui *vd*, 2005), Maxsorb III-n-butane (Saham *vd*, 2008), Maxsorb III- R134a (Saha *vd*, 2009), ve doğal zeolit-su (Solmuş *vd*, 2010) dur.

Bu çalışmada, literatürde mevcut birçok çalışmadan farklı olarak adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan çalışma çiftleri (aktif karbon-metanol, monolithic karbon-amonyum, aktif karbon-amonyum, silika jel-su, zeolite 13X-su ve doğal zeolit-su), denge adsorpsiyon kapasiteleri yerine soğutma sisteminde kullanılmaları durumunda sistem performansı (COP) üzerinde yaratacakları etki açısından farklı evaporatör, kondenser, adsorpsiyon ve desorpsiyon sıcaklıklarında teorik olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu soğutma

sistemleri için en uygun çalışma çiftine, evaporatör-kondenser ve adsorpsiyon-desorpsiyon işlemleri aşamasındaki uç sıcaklıklarda göz önünde bulundurulur kararlaştırılır.

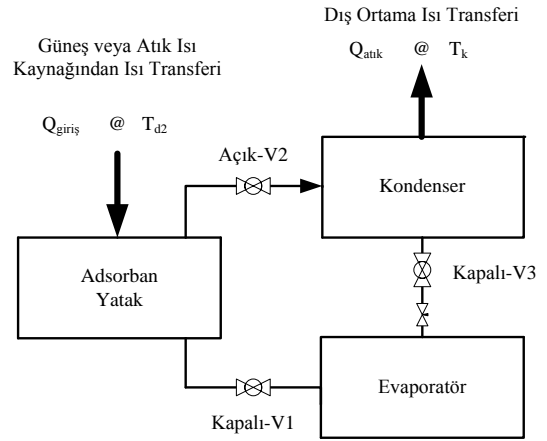
İDEAL ADSORPSİYONLU SOĞUTMA ÇEVİRİMİ

Basit ADS sistemini oluşturan başlıca elemanlar; evaporatör, kondenser ve ısıl enerji destekli adsorban yataktır. Sistemin basit şematik gösterimi soğutma (adsorpsiyon) ve yenilenme (desorpsiyon) süreçleri için Şekil 1’de verilmiştir.



Soğutma (Adsorpsiyon) Prosesi

Basit sistemde soğutucu buharını alternatifli olarak kondensere yollayan ve evaporatörden soğutucu buharını alan tek bir adsorban yatak kullanılır. Buradaki adsorban yatağın işlevi geleneksel buhar sıkıştırma sistemlerindeki kompresörün işlevi ile benzerlik göstermektedir. Adsorban yatağın adsorpsiyon kapasitesi (X), adsorban yatak sıcaklığı ve soğutucu akışkan buhar basıncının bir fonksiyonudur ve genellikle sistemde kullanılan çalışma çiftine ait adsorpsiyon denge denklemi ile ifade edilir. Yatak içerisinde kullanılan adsorban malzemenin soğutucu akışkanı adsorplama kapasitesi, azalan yatak sıcaklığı ve artan soğutucu buhar basıncı ile birlikte artış gösterir.

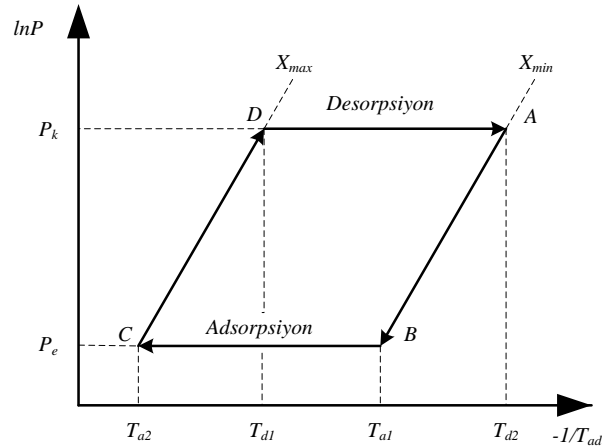


Yenilenme (Desorpsiyon) Prosesi

Şekil 1. Basit ADS sisteminin şematik gösterimi.

Basit ideal ADS sisteminin bir tam çevrimi en iyi Şekil 2’de verilen Clapeyron diyagramının eşliğinde açıklanabilir (Solmuş vd, 2013). Söz konusu basit sisteme ait çevrim Clapeyron diyagramı üzerinde A noktası ile gösterilen durumda başlar. Bu noktada sistemde kullanılan adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesi en düşük seviyededir. A noktasında yatak sıcaklığı T_{d2} ve yatak içerisindeki basınç P_k (kondenser) değerine eşittir. Adsorban yatak, sistem elemanları arasında aracı akışkan alışverişi olmadan (V1, V2 ve V3 kapalı) çevreye ısı transferi ile T_{a1} ara sıcaklığına soğutulur (B noktası) ve neticesinde, yatak içerisindeki soğutucu akışkan basıncı kondenser basıncından (P_k) evaporatör (P_e) basıncına iner. Yataktaki mevcut denge durumu A noktasından B noktasına değişirken adsorban yatağa bir miktar soğutucu akışkan adsorplanır ancak bu miktar çok düşük olduğu için ihmal edilebilir. Dolayısıyla A ile B arasında adsorban yatağın adsorpsiyon kapasitesinin sabit kaldığı kabul edilir. Adsorban yatağın B noktasından çevreye ısı transferi ile C noktasına soğutulması durumunda (soğutma süreci-V1 ve V3 açık, V2 kapalı), adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesi sabit evaporatör basıncında artarak maksimum bir değere ulaşır. C noktasından sonra yatak sistem elemanları arasında aracı akışkan alışverişi olmadan (V1, V2 ve V3 kapalı) güneş veya atık ısı kaynağı desteği ile T_{d1} ara sıcaklığına ısıtılır (D noktası). Yatak sıcaklığı sabit adsorpsiyon kapasitesi doğrusu boyunca bir miktar artar iken yatak içerisindeki

basınç da evaporatör (P_e) basıncından kondenser basıncına (P_k) yükselir. Adsorban yatağın sabit kondenser basıncında D noktasından en yüksek sıcaklık olan T_{d2} yenilenme sıcaklığına ısıtılması durumunda (yenilenme süreci-V1 ve V3 kapalı, V2 açık), adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesi azalarak minimum bir seviyeye iner ve böylece çevrim tamamlanmış olur.



Şekil 2. Clapeyron diyagramı.

A noktasındaki yatağın yenilenme sıcaklığı olan T_{d2} ve C noktasında yatağın soğutulduğu en düşük sıcaklık olan T_{a2} sırasıyla sistemde kullanılan ısı kaynağının ve soğutma sıvısının sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. İdeal çevrimde adsorpsiyon ve

desorpsiyon işlemleri sırasında evaporatör ve kondenser basınçları sabit olmakla birlikte yatak içerisindeki sıcaklık gradyanları ihmal edilebilir durumdadır. Ayrıca yatağın C noktasından D noktasına ısıtıldığı ve A noktasından B noktasına soğutulduğu durumlarda adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesi değişmemektedir.

PERFORMANS ANALİZİ

Yukarıda bahsedilen ADS sisteminin performans analizleri farklı çalışma çiftleri için çeşitli evaporatör (T_e), kondenser (T_k), desorpsiyon (T_{d2}) ve adsorpsiyon (T_{a2}) sıcaklıklarında yapılmıştır. Performans hesaplamalarında aşağıdaki kabuller yapılmış ve hesaplamalara ilişkin akış diyagramı Ek 1 de verilmiştir.

- Sistemde kullanılan adsorban malzeme ve soğutucu akışkanın ısı kapasite değerleri sabittir.
- Desorpsiyon ısı, adsorpsiyon ısısına eşit ve sabittir.
- Metal kütle ısıtmak (adsorban yatak) ve soğutmak (evaporatör) için gerekli ısı miktarı ihmal edilmiştir.

Çevrimin COP değeri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$COP_{cyc} = \frac{Q_c}{Q_{in}} \quad (1)$$

Sistemin soğutma kapasitesi (Q_c), soğutucu akışkanın gizli buharlaşma ısısından soğutucu akışkanın kondenser sıcaklığından evaporatör sıcaklığına soğutulması için gerekli duyulur ısı miktarının çıkarılması ile bulunmuştur (Fadar vd, 2009).

$$Q_c = m_{ad} (X_{max} - X_{min}) \left[L(T_e) - \int_{T_e}^{T_k} C_{p-s} dT \right] \quad (2)$$

Desorpsiyon işlemi sırasında yatağı yenilemek için gerekli toplam enerji miktarı (Q_{in}), adsorban malzemeyi (Q_{ad}), soğutucu akışkanı (Q_s) ısıtmak ve diferansiyel miktarda soğutucu akışkanı desorplamak (Q_{de}) için gerekli enerji miktarlarının toplamına eşittir (Fadar vd, 2009) :

$$Q_{in} = Q_{ad} + Q_s + Q_{de} \quad (3)$$

$$Q_{ad} = \int_{T_{a2}}^{T_{d2}} m_{ad} C_{p-ad} dT \quad (4)$$

$$Q_s = \int_{T_{a2}}^{T_{d2}} m_{ad} X(T, P) C_{p-s} dT \quad (5)$$

$$Q_s = \int_{T_{a2}}^{T_{d1}} m_{ad} X_{max} C_{p-s} dT + \int_{T_{d1}}^{T_{d2}} m_{ad} X(T, P_k) C_{p-s} dT$$

$$Q_{de} = \int_{T_{d1}}^{T_{d2}} m_{ad} H_{de} dX = \int_{T_{d1}}^{T_{d2}} m_{ad} H_{de} \frac{dX}{dT} dT \quad (6)$$

Adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesi (X), adsorban yatak sıcaklığı ve soğutucu akışkan buhar basıncının bir fonksiyonudur ve genellikle aşağıda verilmiş olan modifiye Dubinin-Astakhov (D-A) denklemi ile ifade edilir. Bu denklemin katsayıları farklı adsorban-adsorplanan çalışma çiftleri için Tablo 1'de verilmiştir.

$$X = x_o \exp \left[-k \left(\frac{T_{ad}}{T_{doy}} - 1 \right)^n \right] \quad (7)$$

Soğutucu akışkan olarak kullanılan; su, amonyum ve metanolün gizli buharlaşma ısıları aşağıdaki eşitlikler vasıtasıyla hesaplanmıştır (İnternet, 2013).

$$L_{H_2O} = 3171.2 - 2.4425 * T (K) \quad (8)$$

$$L_{NH_3} = 2441 - 4.3 * T (K) \quad (9)$$

$$L_{CH_3OH} = 1576.7 - 1.329 * T (K) \quad (10)$$

Sistemde kullanılan soğutucu akışkanlar ve adsorban malzemelerin ısı kapasite değerleri ile çalışma çiftlerinin desorpsiyon ısıları Tablo 2' de verilmiştir.

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin performans katsayıları, sistemde kullanılan adsorban-adsorplanan çiftinin seçimine bağlı olarak büyük oranda değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle sisteme uygun çalışma çiftinin seçimi sistem tasarımı öncesinde büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada altı adet farklı çalışma çiftini kullanan (aktif karbon-metanol, monolithic karbon-amonyum, aktif karbon-amonyum, silika jel-su, zeolit 13X-su ve doğal zeolit-su) ve ideal çevre göre çalışan basit adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminin performansı farklı adsorpsiyon (40-60 °C), desorpsiyon (95-175 °C) evaporatör (5-15 °C) ve kondenser (20-40 °C) sıcaklıklarında analiz edilmiştir.

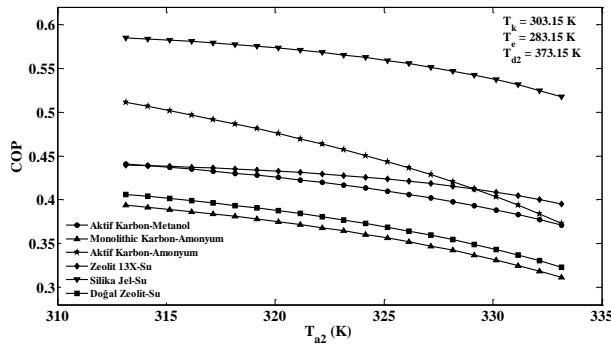
Tablo 1. Farklı adsorban-adsorplanan çalışma çiftleri için D-A denkleminin katsayıları.

Çalışma Çifti	Kaynak	x_o	k	n
Zeolite 13X-Su	(Wang vd, 2009)	0.261	5.36	1.73
Doğal Zeolit-Su	(Solmuş vd, 2010)	0.1233	4.268	1.3
Aktif Karbon-Metanol	(Wang vd, 2002)	0.284	10.21	1.39
Monolithic Karbon-Amonyum	(Chahbani vd, 2002)	0.27	4.3772	1.1935
Aktif Karbon-Amonyum	(Critoph, 2001)	0.3629	3.6571	0.94
Silika Jel-Su	(Di vd, 2007)	0.346	5.6	1.6

Tablo 2. Soğutucu akışkan ve adsorban malzeme ısıl kapasite değerleri ile çeşitli çalışma çiftlerinin desorpsiyon ısıları.

Adsorban-Adsorplanan Çalışma Çifti	$H_{de}(kJ/kg)$ -Kaynak	$C_{p_Adsorban}(J/kg.K)$ -Kaynak	$C_{p_Adsorplanan}(J/kg.K)$
Aktif Karbon-Metanol	1900-(Wang vd, 2009)	900-(Wang vd, 2002)	2470
Monolithic Karbon-Amonyum	1500-(Chahbani vd, 2002)	840-(Chahbani vd, 2002)	4780
Aktif Karbon-Amonyum	942-(Anyanwu, 2004)	900-(Wang vd, 2002)	4780
Zeolite 13X-Su	3800-(Anyanwu, 2004)	836-(Boubakri vd, 2000)	4180
Silika Jel-Su	2800-(Cho ve Kim, 1992)	920-(Di vd, 2007)	4180
Doğal Zeolit-Su	3200-(Solmuş vd, 2010)	1100-(Solmuş vd, 2010)	4180

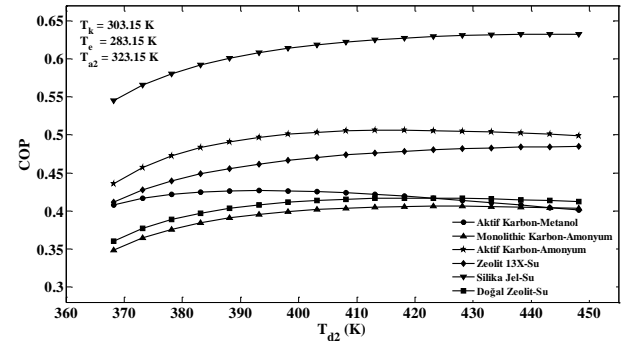
ADS sisteminin performans katsayısının farklı çalışma çiftleri için adsorpsiyon sıcaklığı ile değişimi Şekil 3' de verilmiştir.

**Şekil 3.** ADS sisteminin performans katsayısının (COP) farklı çalışma çiftleri için adsorpsiyon sıcaklığı ile değişimi.

Sistemin performans katsayısı bütün çalışma çiftleri için artan adsorpsiyon sıcaklığı ile birlikte düşüş göstermektedir. Sistemde kullanılan adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesi artan soğutucu buhar basıncı ve azalan adsorban yatak sıcaklığı ile artmaktadır. Bu nedenle artan adsorban yatak sıcaklığı ile birlikte X_{max} değeri düşmekte ve neticesinde X_{max} ile X_{min} arasındaki farkı azalmaktadır. Soğutma çevriminde adsorp edilen soğutucu akışkan miktarındaki azalış sistemin soğutma kapasitesini düşürmekte ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Söz konusu soğutma sisteminin performans katsayısındaki düşüş, analizlerin yapıldığı sıcaklık sınırları arasında aktif karbon-amonyum çifti için daha belirgindir. Diğer bir ifade ile sistemin performans katsayısı, sistemde aktif karbon-amonyum çalışma çifti kullanıldığı durumda adsorpsiyon sıcaklığının değişiminden daha fazla etkilenmektedir. Ancak sistemde zeolit 13X-su çalışma çiftinin kullanılması durumunda sistem performansında değişen adsorpsiyon sıcaklığına bağlı olarak kayda değer bir değişim gözlemlenmemektedir. Adsorban yatak sıcaklığının 328 K geçtiği durumda zeolit 13X-su çalışma çifti aktif karbon-amonyum çalışma çiftine göre daha iyi sonuç vermektedir. Düşük adsorpsiyon sıcaklıklarında sistemde zeolit 13X-su veya aktif karbon-metanol kullanılması sistem performansını değiştirmemektedir. Genel olarak bütün çalışma çiftleri için sistem performansının olumsuz yönde etkilenmemesi için adsorban yatak sıcaklığının mümkün olduğunca düşük tutulması gerekmektedir. Ancak adsorpsiyon prosesi sırasında adsorban yatağın

soğutulması hava veya su ile yapıldığından sistemin çalıştırıldığı ortamdaki hava sıcaklığı veya soğutma suyunun temin edildiği kaynağın sıcaklığı sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sistem tasarlanırken soğutma sisteminin hangi iklim koşullarında çalıştırılacağı, sistemin nasıl ve hangi kaynaktan soğutulacağı iyi düşünülmelidir.

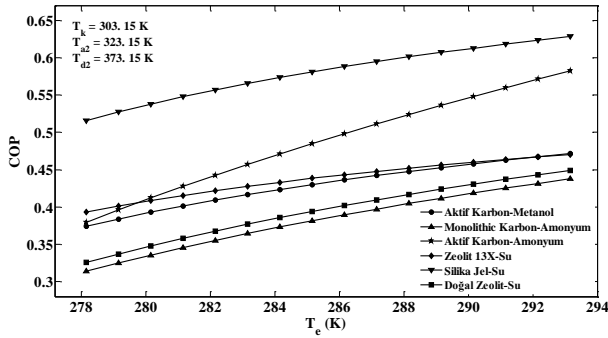
Şekil 4' de adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısının farklı çalışma çiftleri için desorpsiyon sıcaklığı ile değişimi verilmiştir.

**Şekil 4.** ADS sisteminin performans katsayısının (COP) farklı çalışma çiftleri için desorpsiyon sıcaklığı ile değişimi.

ADS sisteminin performans katsayısı artan desorpsiyon sıcaklığı ile birlikte belirli bir noktaya kadar artış göstermektedir. Ancak adsorban yatak belirli bir sıcaklığın üzerine ısıtıldığında sistemin performans katsayısı düşüş eğilimine girmektedir. Bu düşüşün aktif karbon-metanol çifti dışındaki çalışma çiftleri için daha belirgin hale gelmesi için adsorban yatak sıcaklığının 450 K üzerine çıkarılması gerekmektedir. Bu davranış genel olarak X_{min} değerinin artan desorpsiyon sıcaklığı ile kayda değer bir değişim göstermemesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla sistemde aktif karbon-metanol çalışma çifti kullanıldığında yatağı yenilemek için gerekli ısı kaynağının maksimum sıcaklığının yaklaşık 390 K olması yeterlidir. Genel olarak bütün çalışma çiftleri için desorpsiyon işlemi sırasında adsorban yatak sıcaklığının en yüksek 410-420 K ile sınırlandırılması gerekmektedir. Çünkü adsorban yatağı bu noktanın ötesine ısıtmanın sistem performansını üzerinde olumlu bir etki yaratmadığı açıkça görülmektedir. Sonuç olarak soğutma sistemi yukarıda Clapeyron diyagramı ile açıklanan çevrime dayalı olarak çalıştığı için desorpsiyon işlemi sırasında yatağın ısıtılarak adsorplanan soğutucu akışkanın desorplanması

yani adsorpsiyon işlemine hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yatağın bir ısı kaynağı ile desteklenmesi zorunluluk arz etmektedir. Adsorban yatak güneş enerjisi, eksoz gazları, atık ısı ve jeotermal gibi kaynaklardan desteklenebilir. Ancak yukarıda tartışıldığı üzere ısı kaynağının sıcaklık değeri sistem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla soğutma sistemi tasarlanırken, sistemde kullanılan çalışma çifti de göz önünde bulundurularak sistemi destekleyecek ısı kaynağı önceden değerlendirilmelidir.

Adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performans katsayısının farklı çalışma çiftleri için evaporatör sıcaklığı ile değişimi Şekil 5’ de sunulmuştur.



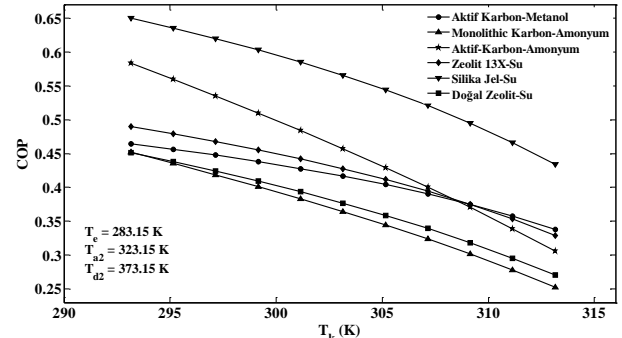
Şekil.5 ADS sisteminin performans katsayısının (COP) farklı çalışma çiftleri için evaporatör sıcaklığı ile değişimi.

Sistemin performans katsayısı bütün çalışma çiftleri için artan evaporatör sıcaklığı ile birlikte artış göstermektedir. Bu davranış genel olarak adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesinin diğer bir ifade ile X_{max} değerinin artan evaporatör sıcaklığı ile birlikte artış eğilimi içerisine girmesinden kaynaklanmaktadır. Düşük evaporatör sıcaklıklarında ($T_e < 6$ °C) zeolit 13X-su çalışma çifti aktif karbon-amonyum çiftine göre daha iyi sonuç vermektedir. Ayrıca, düşük evaporatör sıcaklıklarında silika jel-su ile aktif karbon-amonyum çalışma çifti arasında performans açısından kayda değer bir fark var iken bu fark evaporatör sıcaklığının yükselmesi ile birlikte giderek azalmaktadır. Diğer taraftan çalışılan evaporatör sıcaklıklarında sistemin performans katsayısı diğer çalışma çiftlerinden farklı olarak aktif karbon-amonyum çifti için artan evaporatör sıcaklığı ile birlikte doğrusal bir artış göstermektedir. Doğal zeolit-su ve monolithic karbon-amonyum çalışma çiftleri evaporatör sıcaklığının değişimine sistem performansı açısından yaklaşık olarak aynı tepkiyi vermektedirler. Ancak bu durum zeolit 13X-su ve aktif karbon-metanol çalışma çiftleri için farklılık göstermektedir. Evaporatör sıcaklığının yükselmesi ile birlikte her iki çift performans yönünden aynı sonucu sahip olmaktadır.

Şekil 6’ da ADS sisteminin performans katsayısının farklı çalışma çiftleri için kondenser sıcaklığı ile değişimi verilmektedir.

Genel olarak bütün çalışma çiftleri için yükselen kondenser sıcaklığı sistem performansı üzerinde

olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bunun temel nedeni kondenser sıcaklığının yükselmesi ile birlikte desorpsiyon işlemi sırasında desorplanan soğutucu akışkan miktarında meydana gelen düşüştür. Diğer bir ifade ile X_{min} değerinin yükselen kondenser sıcaklığı ile birlikte artış göstermesidir. Düşük kondenser sıcaklıklarında aktif karbon-amonyum çifti zeolit 13X-su ve aktif karbon-metanol çalışma çiftlerine göre daha iyi sonuç verir iken kondenser sıcaklığının yükselmesi ile birlikte bu durum ters yönde bir seyir izlemektedir. Ayrıca, zeolit 13X-su veya aktif karbon-metanol çalışma çiftlerinden birini kullanan ADS sisteminin performans katsayısı kondenser sıcaklığında meydana gelen değişimlere diğer çalışma çiftlerine nazaran daha az duyarlıdır.



Şekil 6. ADS sisteminin performans katsayısının (COP) farklı çalışma çiftleri için kondenser sıcaklığı ile değişimi.

Son olarak performans analizleri yapılan söz konusu adsorban-adsorplanan çalışma çiftlerinin adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminde kullanılması durumunda sistem veya çevre açısından ortaya çıkması olası avantajlı/dezavantajlı durumlar irdelenmiştir. Aktif karbon-metanol çalışma çiftinin desorpsiyon sıcaklığı diğer çalışma çiftlerine nazaran göreceli olarak daha düşüktür. Bu durum sistemin düşük sıcaklıkta ısı kaynağı ile desteklenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, adsorban malzemenin desorpsiyon ısısının düşük olması sistem performansı açısından olumlu bir özelliktir. Çünkü yatağı yenilemek için sisteme girilmesi gerekli enerji miktarı göreceli olarak düşük kalmaktadır. Diğer taraftan metanolün gizli buharlaşma ısısının düşük olması sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Soğutucu akışkanın gizli buharlaşma ısısının yüksek olması ADS sistemlerinde tercih edilen bir özelliktir. Ayrıca bu çalışma çifti atmosfer basıncının altında çalıştığı için sistemin vakum sızdırmazlığının iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Monolithic karbon-amonyum çalışma çiftinin desorpsiyon ısısının aktif karbon-metanol çalışma çiftinde olduğu gibi düşük olması önemli bir avantajdır. Diğer taraftan amonyumun çalışma basıncının yüksek olması yani atmosfer basıncının üstünde bir basınç da çalışması sistem açısından vakum problemleri yaratmaz. Bu nedenle, adsorban yatak cidar kalınlığı atmosfer basıncının altında çalışan sistemlere göre daha incedir ve metal kütle miktarının az olması sistem performansı üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır. Ayrıca yüksek çalışma basıncı nedeniyle vakum sızdırmazlık problemlerinin ortadan kalkması adsorban yatağın

sıradan imalat teknikleri ile üretilmesine ve basit vana ve ölçüm ekipmanlarının kullanılmasına imkan tanımaktadır. Bunlara ek olarak yüksek basınç nedeniyle, yatak içerisindeki adsorplanan ve ısı transferi iyileşir ve neticesinde çevrim zamanı kısalmıştır. Ancak, amonyumun gizli buharlaşma ısısının düşük olması bir dezavantajdır. Ayrıca, amonyumun toksik olması sebebiyle gıda vb. ürünlerin soğutulması için tasarlanan adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılması insan sağlığı ve çevre açısından oldukça tehlikelidir. Aktif karbon-amonyum çalışma çifti için aktif karbonun desorpsiyon ısısının diğer çalışma çiftlerine göre oldukça düşük olması sistem performansı açısından önemli bir avantajdır. Zeolit 13X-su çalışma çiftinin desorpsiyon ısısı diğer çalışma çiftleriyle karşılaştırıldığında oldukça yüksektir ve bu durum sistem performansı üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun gizli buharlaşma ısısının yüksek olması sistemin soğutma kapasitesini artırmaktadır. Ancak, soğutma sisteminde aracı akışkan olarak su kullanılması durumunda sistem atmosfer basıncı altında çalışmakta ve bu durum vakum problemlerinin ve sistem elemanlarının paslanmaz çelik olmaması durumunda elemanlar üzerinde korozyona bağlı hasarların ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca, aracı akışkan olarak suyun kullanılması 0 °C derecenin altında soğutma yapmayı imkânsız kılmaktadır. Fakat suyun kolay ulaşılabilir, ucuz ve çevre dostu bir akışkan olması tercih edilmesi için yeterli kriterleri oluşturmaktadır. Silika jel in desorpsiyon ısısının yüksek olması dezavantajlı bir durum yaratmaktadır. Ancak, silika jel in ucuz ve kolay ulaşılabilir bir malzeme olması söz konusu dezavantajlı durumun bir miktar ortadan kalkmasına sebebiyet vermektedir. Doğal zeolit desorpsiyon ısısının yüksek olması sebebiyle sistem performansı üzerinde olumsuz bir etki bırakmaktadır. Diğer taraftan bu malzemenin doğada bol miktarda bulunması ucuz ve rahat bir şekilde temin edilmesine olanak sağlamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada altı adet farklı çalışma çiftini kullanan (aktif karbon-metanol, monolithic karbon-amonyum, aktif karbon-amonyum, silika jel-su, zeolit 13X-su ve doğal zeolit-su) ve ideal çevrime göre çalışan basit bir adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performansı farklı adsorpsiyon, desorpsiyon, evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında değerlendirilmiştir. Genel olarak çalışılan sıcaklık sınırları arasında sırasıyla silika jel-su, aktif karbon-amonyum, zeolit 13X-su, aktif karbon-metanol, doğal zeolit-su ve monolithic karbon-amonyum çalışma çifti performans açısından daha iyi sonuç vermektedir. Söz konusu ADS sistemi, adsorpsiyon sıcaklığının 50 °C, desorpsiyon sıcaklığının 100 °C, evaporatör sıcaklığının 10 °C ve kondenser sıcaklığının 20 °C olduğu ve adsorban-adsorplanan çalışma çifti olarak silika jel-su kullanıldığı durumunda en yüksek COP değerine (0.65) ulaşmaktadır. Artan evaporatör-desorpsiyon ve azalan kondenser-adsorpsiyon sıcaklıkları sistem performansı üzerinde

olumlu etki yaratmaktadır. Son olarak sistem performansının doğrudan $X_{max} - X_{min}$ (ΔX) arasındaki farka bağlı olduğu ve bu farkın yüksek olduğu çalışma çiftlerinin performans açısından daha iyi sonuç verdikleri birçok araştırmacı tarafından ifade edilmekte ve çoğunlukla bu kıstas göz önünde bulundurularak adsorban-adsorplanan seçimi yapılmaktadır. Ancak, yapılan bu çalışmada aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan bir ADS sisteminde kullanılan iki farklı çalışma çifti arasında düşük ΔX miktarına sahip çiftin daha iyi sonuç verdiği anlaşılmıştır. Bunun temel nedeni sistem performansının ΔX in yanı sıra büyük oranda sistemde kullanılan aracı akışkanın gizli buharlaşma ısısından ve adsorban malzemenin desorpsiyon ısısından etkilenmesi olarak açıklanabilir.

KAYNAKLAR

- Afonso J.M.R.A., Silveira V., 2005, Characterization of equilibrium conditions of adsorbed silica-gel/water bed according to Dubinin-Astakhov and Freundlich, *Thermal Engineering*, 4, 3-7.
- Amanul Alam K.C., Saha B.B., Akisawa A., 2013, Adsorption cooling driven by solar collector: A case study for Tokyo solar data, *Applied Thermal Engineering*, 50, 1603-1609.
- Anyanwu E.E., 2004, Review of solid adsorption solar refrigeration II: An overview of the principles and theory, *Energy Conversion and Management*, 45, 1279-1295.
- Askalany A.A., Salem M., Ismael I.M., Ali A.H.H., Morsy M.G., Saha B.B., 2013, An overview on adsorption pairs for cooling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 565-572.
- Boubakri A., Guillemot J.J., Meunier F., 2000, Adsorptive solar powered ice maker: experiments and model, *Solar Energy*, 69, 249-263.
- Cho S.H., Kim J.N., 1992, Modelling of a silica gel-water adsorption cooling system, *Energy*, 17, 829-839.
- Chahbani M.H., Labidi J., Paris J., 2002, Effect of mass transfer kinetics on the performance of adsorptive heat pump systems, *Applied Thermal Engineering*, 22, 23-40.
- Critoph R.E., 2001, Simulation of continuous multiple-bed regenerative adsorption cycle, *International Journal of Refrigeration*, 24, 428-437.
- Cui Q., Tao G., Chen H., Guo X., Yao H., 2005, Environmentally benign working pairs for adsorption refrigeration, *Energy*, 2005, 30, 261-271.
- Di J., Wu J.Y., Xia Z.Z., Wang R.Z., 2007, Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel-water chiller under the conditions of variable heat source temperature, *International Journal of Refrigeration*, 30, 515-526.
- Internet, 2013, <http://www.engineeringtoolbox.com>.

El-Sharkawy I.I., Kuwahara K., Saha B.B., Koyama S., Ng K.C., 2006, Experimental investigation of activated carbon fibers/ethanol pairs for adsorption cooling system application, *Applied Thermal Engineering*, 26, 859-865.

Fadar A.E., Mimet A., Perez-Garcia M., 2009, Modelling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector, *Solar Energy*, 83, 850-861.

Ng K.C., Chua H.T., Chung C.Y., Loke C.H., Kashiwagi T., Akisawa A., 2001, Experimental investigation of the silica-gel water adsorption isotherm characteristics, *Applied Thermal Engineering*, 21, 1631-1642.

Saha B.B., Habib K., El-Sharkawy I.I., Koyama S., 2009, Adsorption characteristics and heat of adsorption measurements of R-134a on activated carbon, *International Journal of Refrigeration*, 32, 1563-1569.

Saham B.B., Chakraborty A., Koyama S., Yoon S.H., Mochida I., Kumja M., Yap C., Ng K.C., 2008, Isotherms and thermodynamics for the adsorption of n-butane on pitch based activated carbon, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 51, 1582-1589.

San J.Y., Lin W.M., 2008, Comparison among three adsorption pairs for using as the working substances in a multi-bed adsorption heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 28, 988-997.

Solmuş I., Yamalı C., Kaftanoğlu B., Baker D., Çağlar A., 2010, Adsorption properties of a natural zeolite-water pair for use in adsorption cooling cycles, *Applied Energy*, 87, 2062-2067.

Solmuş I., Kaftanoğlu B., Yamalı C., Baker D., 2011, Experimental investigation of a natural zeolite-water adsorption cooling unit, *Applied Energy*, 88, 4206-4213.

Solmuş İ., Yıldırım C., Bilen K., 2013, Silika jel-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performans analizi, *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 777-785.

Sumathy K., Yeung K.H., Yong L., 2003, Technology development in the solar adsorption refrigeration systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 301-327.

Tamainot-Telto Z., Metcalf S.J., Critoph R.E., Zhong Y., Thorpe R., 2009, Carbon-ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping, *International Journal of Refrigeration*, 32, 1212-1229.

Wang R.Z., Wang B.Q., 1999, Adsorption mechanism and improvements of the adsorption equation for adsorption refrigeration pairs, *International Journal of Energy Research*, 23, 887-898.

Wang R.Z., Xu Y.X., Wu J.Y., Li M., Shou H.B., 2002, Research on a combined adsorption heating and cooling system, *Applied Thermal Engineering*, 22, 603-617.

Wang L.W., Wang R.Z., Lu Z.S., Chen C.J., Wang K., Wu J.Y., 2006, The performance of two adsorption ice making test units using activated carbon and a carbon composite as adsorbents, *Carbon*, 44, 2671-2680.

Wang L.W., Wang R.Z., Oliveira R.G., 2009, A review on adsorption working pairs for refrigeration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 518-534.

Zhang L.Z., 2000, Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system, *Applied Thermal Engineering*, 20, 103-114.



İsmail SOLMUŞ

1980 Erzincan doğumludur. 2002 yılında Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden Lisans derecesi ile mezun olmuştur. 2006 yılında ODTÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden Yüksek Lisans, 2011 yılında yine aynı Üniversiteden Doktora derecesi almıştır. 2010-2011 yılları arasında bir yıl süreyle İngiltere’de Bath Üniversitesinde Doktora tez konusu ile ilgili çalışmalarda bulunmuştur. 2012 yılı Aralık ayından beri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında Yrd.Doç.Dr. olarak görev yapmaktadır. Adsorpsiyonlu soğutma, Güneş enerjisi ve uygulamaları, Mikro ısı boruları, Gözenekli malzemede ısı ve kütle transferi konularında çalışmaktadır.



Cihan YILDIRIM

1981 Ankara doğumludur. 2002 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirdikten sonra aynı yıl Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Bölümünde araştırma görevlisi olarak bütünlük doktora programına başlamıştır. 2011 yılında doktoraasını tamamlamıştır. Halen Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji anabilim dalında Araştırma Görevlisi Doktor olarak çalışmaktadır. Başlıca çalışma alanları; Doğal konveksiyon, Güneş enerjisi ve uygulamaları, Tuzsuzlaştırma ve damıtma sistemleri, Adsorpsiyonlu soğutma ve Enerji çevrim sistemleridir.

Ek 1.

