ARAŞTIRMA MAKALESİ

Evsel ve Endüstriyel Soğutma Uygulamalarında Resorbsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Kullanımının İncelenmesi

Bilsay PASTAKKAYA

Dr.
Bursa Uludağ Üniversitesi
Orhangazi YAÇ Meslek Yüksekokulu
Makine Programı
Bursa
bilsay@uludag.edu.tr
orcid: 0000-0001-5027-9458

ÖZ

Dünya üzerinde tüketilen enerjinin önemli bir bölümü evsel ve endüstriyel soğutma ihtiyacının karşılanması için kullanılmaktadır. Fosil yakıt temelli enerji tüketimine bağlı sorunlar nedeni ile temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklı soğutma sistemlerinin kullanımı, önemini her geçen gün arttırmaktadır. Soğurmalı soğutma sistemleri ile atık ısı veya güneş enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir kaynaklar kullanılarak, işletme maliyetleri asgariye indirilmiş, enerjide dışa bağımlı olmayan ve tamamen çevre dostu soğutma uygulamalarını hayata geçirmek mümkün olmaktadır. Ancak soğurmalı soğutma sistemleri, ilk yatırım maliyetleri ve uygulama karşılaşılan teknik zorluklar nedeni ile geleneksel soğutma sistemleri ile rekabet edememektedir. Resorbsiyonlu soğutma sistemleri, diğer soğurmalı soğutma sistemlerine göre farklı bir çevrim özelliğine sahiptir. Resorbsiyonlu soğutma çevriminde çalışma basınçları alternatiflerine göre çok daha düşük seviyelerde olduğundan, tekno-ekonomik açıdan daha uygulanabilir ve daha güvenli soğutma uygulamaları oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin çalışma özellikleri ve farklı uygulama örnekleri tanıtılarak sistemin evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında kullanımı incelenmiştir. Çalışma sonucunda resorbsiyonlu sistemlerin sahip oldukları tekno-ekonomik üstünlükleri nedeni ile diğer geleneksel soğutma sistemlerine göre önemli avantajlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklı resorbsiyonlu sistemlerin kullanımının, enerji kullanımıma bağlı ulusal ve küresel ölçekli birçok soruna, alternatif çözümler sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler
Resorbsiyon, Soğutma, Yenilenebilir Enerji.

Investigation of the Use of Resorption Cooling Systems in Domestic and Industrial Applications

ABSTRACT

The significant amount of consumed energy is globally used to provide domestic and industrial cooling requirement. Importance of the use of clean and renewable powered cooling systems increases day by day due to the issues related to fossil fuel based energy consumption. By using waste heat and renewable energy such as solar and geothermal, powered sorption cooling systems, it is possible to actualize non-dependent, eco-friendly cooling applications with minimised operational cost. However, sorption cooling systems are not competitive with conventional cooling systems because of their initial cost and technical challenges in practices. Resorption cooling systems have a different cycle than the other sorption cooling systems. Since the operational pressures in resorption cycle are considerably lower than their alternatives, it enables to construct more feasible and safer cooling applications in techno-economic aspect. In this article, technical features and various examples of resorption systems are presented and, domestic and use of the system in industrial applications is investigated. It is concluded that resorption systems have substantial advantages than other conventional cooling systems thanks to their techno-economic superiors. Furthermore, it is deduced that use of the renewable energy powered resorption systems will provide alternative solutions to the problems related to energy use in national and global scale.

Keywords
Resorption, Cooling, Renewable Energy.

Geliş Tarihi : 28.09.2018
Kabul Tarihi : 06.02.2019

Pastakkaya, B., Evsel ve Endüstriyel Soğutma Uygulamalarında Resorbsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Kullanımının İncelenmesi, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, sf. 327-338, 17-20 Nisan 2019.

1. GİRİŞ

Küresel ölçekli enerji ihtiyacının artışı ve enerji ihtiyacının önemli bir kısmının fosil yakıtlardan karşılanması nedeni ile enerji kullanımına bağlı sorunlar geleceğimizi tehdit etmektedir. Enerjinin verimli kullanılması kadar, enerjinin temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması da oldukça önemlidir. Bu nedenle evsel ve endüstriyel alanda enerji ihtiyacının temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayan, uygulanabilir nitelikli teknolojilerin kullanılması, söz konusu sorunların çözümünde önemli çözüm alternatifleri sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklı soğutma sistemlerinin tasarım ve projelendirilmesinde gereken hesaplamaların doğru bir şekilde yapılması, hem sistemden sağlanacak katma değerin artışı hem de sistemin güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir [1]. Bu noktada sistem tasarımların için sunulan rehber kaynaklar [2-5], yenilenebilir enerjinin kullanımının yaygınlaştırılması ve sistem ile ilgili araştırma-geliştirme faaliyetlerinin sağlanması konusunda önemli yararlar sağlamıştır. Konu ile ilgili yapılan araştırma çalışmalarında [6-19] yenilenebilir enerji kaynaklı soğutma sistemleri deneysel ve sayısal analize dayalı incelenerek, elde edilen sonuçlar ile farklı tasarımların hayata geçirilmesine önemli katkılar sağlanmıştır.

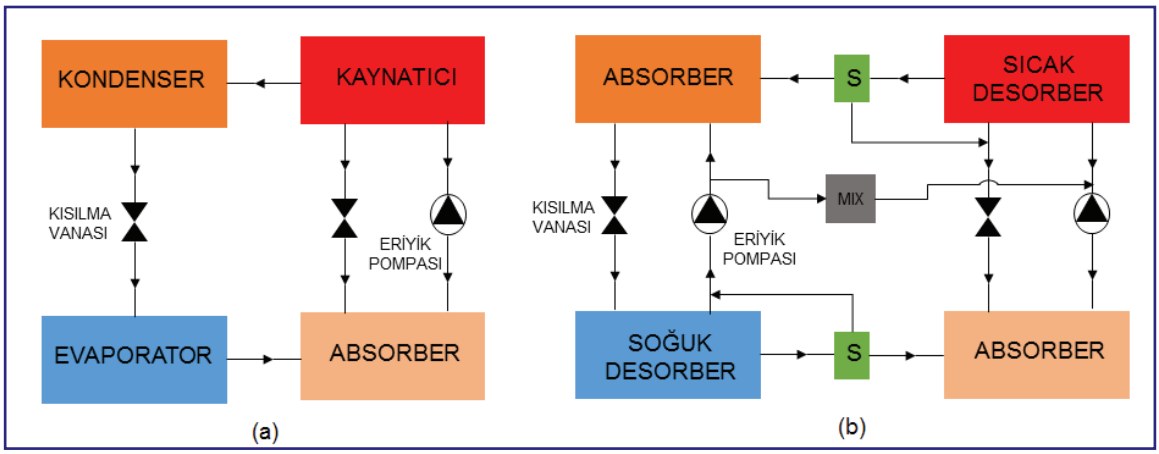
Soğurmalı soğutma sistemleri, soğutma olayını ısıl enerji kullanarak gerçekleştirirler ve uygun sıcaklıktaki güneş enerjisi ve jeotermal enerji gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışabilirler. Söz konusu sistemlerin soğutma tesir katsayıları geleneksel buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerine göre daha düşük seviyelerde olsa da, elektrik enerjisi ihtiyacının ve hareketli parça sayısının az olması nedeni ile işletme ve bakım maliyetleri açısından kullanıcısına önemli avantajlar sağlamaktadırlar. Ancak ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu ve çalışma özelliklerine bağlı olarak karşılaşılan teknik zorluklar nedeni ile geleneksel buhar sıkıştırmalı soğutma sistemleri ile rekabet edememektedirler. Resorbsiyonlu soğutma çevrimi, diğer sıvı soğurmalı soğutma sistemlerine göre önemli farklılıklar taşımaktadır [20]. Resorbsiyonlu sistemler diğer soğurmalı sistemlere göre daha az bilinen ve daha sofistike özellikli bir yapıda olup, literatür incelendiğinde resorbsiyonlu sistemler ile ilgili yapılan çalışmalar [21-26] absorbsiyonlu ya da adsorbsiyonlu sistemlere göre oldukça az sayıdadır. Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinde soğutucu akışkan olarak su yerine farklı derişimlerdeki amonyak-su karışımı kullanılmaktadır. Bu nedenle sistemin çalışma basınçları diğer absorbsiyonlu soğutma sistemlerine göre çok daha düşük seviyelerdedir ve buna bağlı olarak ilk yatırım maliyetleri daha uygun, teknik açıdan daha üstün ve daha güvenli soğutma uygulamaları hayata geçirilebilmektedir. Ayrıca resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin çalışması için gereken ısıl enerjinin sıcaklık değeri, diğer absorbsiyonlu soğutma sistemlerine göre daha düşük seviyelerde olduğundan, bu sistemler yenilenebilir enerji kaynaklı soğutma uygulamaları için alternatiflerine göre çok daha uygulanabilir niteliktedir.

Bu çalışmada resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin çalışma ve kullanım özellikleri tanıtılarak, evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında kullanımı incelenmiştir. Resorbsiyonlu soğutma cihazları ile oluşturulan farklı uygulama örnekleri ve uygulamalar kapsamında elde edilen veriler sunulmuştur. Çalışma sonucunda resorbsiyonlu sistemlerin sahip oldukları tekno-ekonomik üstünlükleri nedeni ile diğer geleneksel soğutma sistemlerine göre önemli avantajlara sahip olduğu sonucuna varılmıştır Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklı resorbsiyonlu sistemlerin kullanımının, enerji kullanımına bağlı ekonomik, ekolojik ve sosyal nitelikli birçok soruna, alternatif çözümler sağlayacağı tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Resorbsiyonlu Soğutma Sistemi Çalışma Prensibi

Soğurmalı soğutma sistemlerinde soğutma enerjisi, ısıl enerji aracılığı ile sağlanır ve buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma sistemlerindeki mekanik işlemler yerine fiziko kimyasal işlemlerden yararlanılır. Soğurmalı soğutma sistemlerinin en bilinen türleri absorbsiyonlu ve adsorbsiyonlu soğutma sistemleridir. Absorbsiyonlu soğutma sistemleri, alternatiflerine göre daha yüksek soğutma tesir katsayılarına sahip olmaları ve çalışma özellikleri nedeni ile adsorbsiyonlu soğutma sistemlerine göre daha yaygın kullanılmaktadır. Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinde biri soğutucu akışkan, diğeri ise taşıyıcı akışkan olmak üzere iki farklı akışkan dolaşmaktadır ve amonyak eriyikli çevrimlerde soğutucu akışkan olarak amonyak (NH_3) taşıyıcı akışkan olarak da su (H_2O) kullanılır [27].



Şekil 1. Absorbsiyonlu (a) ve resorbsiyonlu (b) soğutma çevrimleri

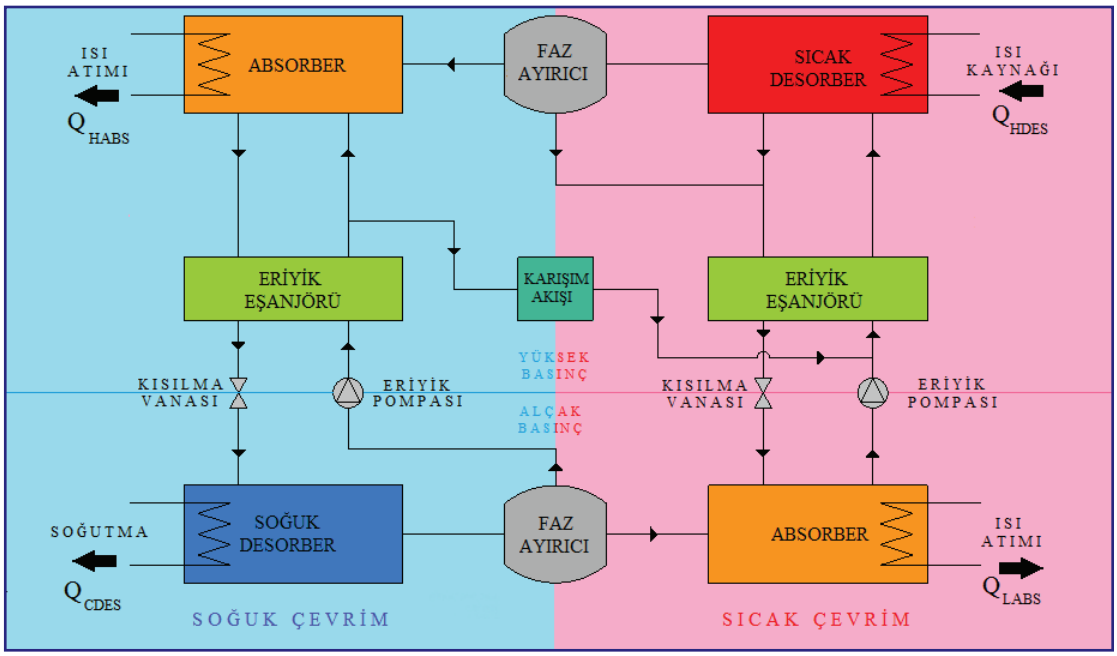
Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinde ise, amonyak eriyikli absorbsiyonlu soğutma sistemlerinden farklı olarak soğutucu akışkan amonyak değil, farklı derişimlerdeki amonyak su karışımıdır. Bu nedenle çevrimin çalışma basınçları, absorbsiyonlu sisteme göre oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır ve bu sayede sistemin çalışması için gereken ısıl enerjinin sıcaklık seviyesi, absorbsiyonlu sistemlere göre daha düşük olmaktadır. Resorbsiyonlu soğutma çevriminde absorbsiyonlu çevrimden farklı olarak fazladan bir eriyik pompası ve bir karışım hattı yer almaktadır. Şekil 1'de absorbsiyonlu ve resorbsiyonlu soğutma çevriminin şematik görüntüsü yer almaktadır.

Resorbsiyonlu sistemlerin çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir. Sıcak desorber adı verilen ısı değiştiricisi içerisindeki amonyak-su çözeltisi, uygun sıcaklıktaki bir enerji kaynağından sağlanan ısıl enerji (Q_{HDES}) vasıtasıyla buharlaşarak, bir faz ayırıcıdan geçer ve soğuk çevrimde yer alan yüksek basınçlı absorbere gelir (Şekil 2.). Bu ısıl enerjinin sıcaklık değeri genellikle 70ºC - 90ºC aralığındadır [28]. Sıcak desorberde buharlaşan gaz fazındaki amonyak, yüksek basınçlı absorbere gelir ve burada amonyak-su çözeltisi tarafından yutulur/absorbe edilir. Bu esnada açığa çıkan atık ısı (Q_{HABS}), ısı atım hattı aracılı ile dışarı atılır. Yüksek basınçlı absorberde ısı atarak yoğuşan amonyak-su çözeltisi sırasıyla, ısı geri kazanımı sağlayan bir eriyik ısı değiştiricisinden ve bir kısılma vanasından geçer. Basıncı, alçak basınç seviyesine düşürülen sıvı fazdaki amonyak-su çözeltisi, soğuk desorber adı verilen ısı değiştiricisine gelir. Burada çektiği ısı vasıtasıyla (Q_{CDES}) içerisinde yer alan amonyak buharlaşır ve bu sayede soğutma olayını gerçekleştirir. Soğuk desorberde buhar fazına dönüşen soğutucu akışkan bir faz ayırıcıdan geçerek sıcak çevrimde yer alan alçak basınçlı absorbere gelir ve burada sıcak desorberden gelen ve basıncı düşük basınca indirgenmiş amonyak-su çözeltisi tarafından absorbe edilir. Bu esnada oluşan atık ısı (Q_{LDES}), yüksek basınçlı absorberdekine benzer şekilde, aynı ısı atım hattı ile sistemden uzaklaştırılır. Sistemde, sıcak ve soğuk çevrim arasında yer alan karışım akış hattı sayesinde, soğuk çevrimdeki amonyak-su çözeltisinin, amonyak açısından zenginleşmesini engellemek amacı ile amonyak konsantrasyon değerlerinin dengelenmesini sağlanır.

Resorbsiyonlu soğutma sisteminin soğutma tesir katsayısı (STK) değeri, birim enerji başına yapılan soğutma olarak tarif edilir. Buna göre soğutma tesir katsayısı, sistemin soğuk desorber ısıl gücünün sıcak desorber ısıl gücüne oranı olarak ifade edilebilir.

$$STK = \frac{Q_{CDES}}{Q_{HDES}} \quad (1)$$

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerin, yüksek ve düşük basınçlı absorberlerinde oluşan atık ısının, ısıtma uygulamalarında ya da endüstriyel ısıl proseslerde kullanmak mümkündür. Resorbsiyonlu soğutma sisteminin ısıtma tesir katsayısı (ITK) değeri, birim enerji başına yapılan ısıtma olarak tarif edilir ve sistemin yüksek ve düşük basınçlı absor-



Şekil 2. Resorbsiyonlu soğutma çevrimi çalışma prensibi

berlerinin ısıl güçleri toplamının, sıcak desorber ısıl gücüne oranı olarak ifade edilebilir.

$$ITK = \frac{Q_{HABS} + Q_{LABS}}{Q_{HDES}} \quad (2)$$

2.2. Sayısal Analiz Programı

Soğutma sistemlerinin projelendirilmesinde kullanılan bilgisayar destekli hesaplamalar, daha uygulanabilir projelerin hayata geçirilmesi ve daha doğru sonuçların elde edilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerin fikir aşamasından uygulama aşamasına geçişinde, öngörülen şartlarında sistem veriminin ve ilk yatırım maliyetlerinin doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bu sayede sistemin kullanıcısına sağlayacağı katma değer önemli ölçüde arttırılmakta ve sistemin çalışma özellikleri iyileştirilebilmektedir.

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin simülasyonu amacı ile Refprop [35] programı ile oluşturulan yazılım sayesinde, farklı çalışma koşullarında resorbsiyonlu sistemin soğutma performansının ve sistem bileşenlerin çalışma özelliklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada resorbsiyonlu sistemin, evsel ve endüstriyel amaçlı kullanımında, farklı çalışma koşullarındaki sistem performansının belirlenmesi için geliştirilen yazılım ile gerçekleştirilen nümerik analizler de incelenmiş ve sunulmuştur. Program, farklı derişimlerdeki amonyak-su çözeltisinin termofiziksel özelliklerini saptayarak, çevrim boyunca sistemde yer alan her bileşene ait değerlerin hesaplanmasını sağlamaktadır. Program sayesinde sistemin çalışma sıcaklıkları, soğutma performansı, soğutma kapasitesi ve çevrimdeki basınç değerleri gibi birçok önemli teknik bilgi elde edilebilmektedir ve daha önce yapılan bilimsel çalışmalarda (31-34) başarı ile kullanılmıştır.

2.3. Resorbsiyonlu Soğutma Sistemi Uygulama Örnekleri

Resorbsiyonlu soğutma sistemleri ile evsel ya da endüstriyel amaçlı soğutma ihtiyacı verimli bir şekilde karşılanabilmektedir. Çalışmanın bu bölümünde, resorbsiyonlu soğutma sistemi ile yapılan uygulama örnekleri tanıtılmıştır. Bu sayede sistemin kullanımının yaygınlaşması ve hem ulusal hem de küresel ölçekte sağlayacağı katma değerin arttırılması amaçlanmıştır. Tanıtılan örneklerin tümü endüstriyel kullanım amaçlı olsa da, düşük kapasiteli soğutucu sistemlerin kolaylıkla evsel soğutma amaçlı olarak kullanılabildiği bilinmek-

tedir. Bu nedenle farklı soğutma kapasitelerine sahip resorbsiyonlu cihazlarla oluşturulan soğutma sistemleri, hem evsel hem de endüstriyel kullanım amaçlı projeler için örnek teşkil etmektedir.

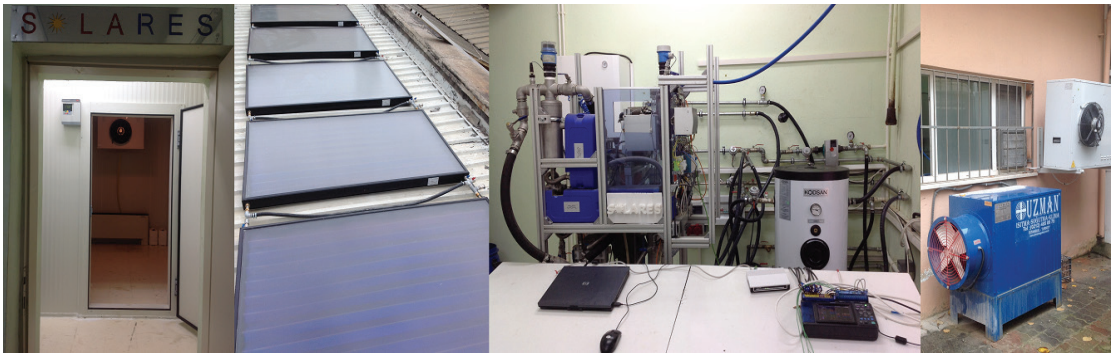
Resorbsiyonlu soğutma çevriminde, soğuk desorberde gerçekleştirilen soğutmanın sıcaklık değeri 0 °C'nin altına inebildiğinden, resorbsiyonlu sistem ile derin dondurma uygulamaları ve buzda enerji depolama işlemleri gerçekleştirilebilir. Bu sayede ısıl enerjinin elde edilemediği ya da sıcaklık değerinin, sistemi çalıştırmak için yetersiz kaldığı durumlarda, buzda depolanan enerji vasıtasıyla soğutma olayının kesintisiz şekilde sürdürülmesi sağlanabilmektedir. Bu durum özellikle güneş enerjisi kaynaklı evsel ve endüstriyel soğutma sistemlerinin kullanımda önemli faydalar sağlamaktadır. Şekil 3'de Jaehner ve Grund (2014) tarafından yapılan ve resorbsiyonlu sistem ile trijenerasyon uygulamasını inceleyen deneysel çalışmada kullanılan, 25 kW soğutma gücündeki bir resorbsiyonlu soğutma sistemi ile buzda depolama uygulaması görülmektedir.

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinde soğutucu akışkan olarak saf amonyak yerine amonyak-su eriyiği kullanıldığından, sıcak desorberdeki soğutucu akışkanı buhar fazına geçirmek için gereken ısıl enerji kaynağının sıcaklık değeri, diğer amonyak eriyikli absorbsiyonlu sistemlere göre daha düşük olmaktadır [30]. Söz konusu absorbsiyonlu sistemlerde bu sıcaklık değeri 90 °C ve üzeri iken, resorbsiyonlu sistemlerde 70 °C'ye kadar düşülebilmektedir. Bu sıcaklık seviyesi, alternatiflerine göre daha düşük maliyetli olan düz tip güneş toplayıcıları tarafından kolaylıkla elde edilebildiğinden, resorbsiyonlu sistemlerin güneş enerjisi kaynaklı kullanımında önemli tekno-ekonomik avantajlar sağlanmaktadır. Bu sayede, yenilenebilir enerji sistemlerinin en büyük dezavantajlarından biri olan ilk yatırım maliyetleri önemli oranda azalmakta, sistemin amortisman süresi kısalmakta ve sistemin kullanıcısına sağlayacağı katma değer önemli ölçüde artmaktadır.

Şekil 4'te Pastakkaya ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen; 4 kW soğutma gücüne sahip resorbsiyonlu soğutma cihazı ve düz tip güneş topla-



Şekil 3. Buzda depolama uygulaması yapılan bir resorbsiyonlu soğutma sistemi [29]



Şekil 4. SOLARES güneş enerjisi kaynaklı resorbsiyonlu endüstriyel soğutma sistemi [31]

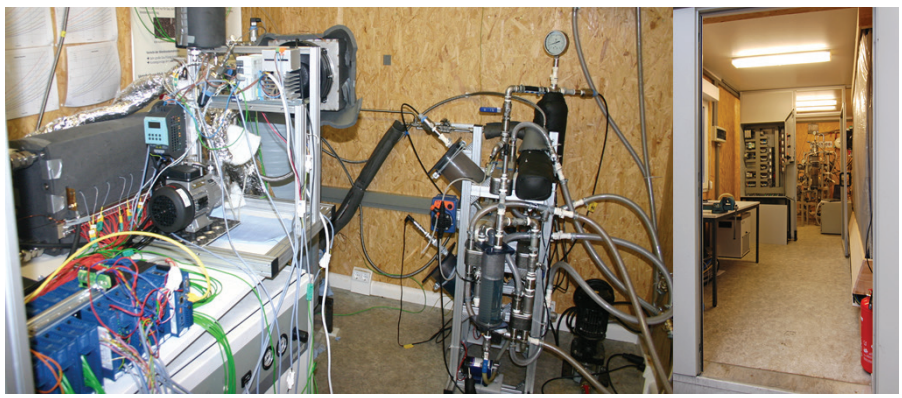
yıcıları ile oluşturulmuş SOLARES güneş enerjisi kaynaklı resorbsiyonlu soğutma sistemi görülmektedir. Bu sistemde güneş enerjisi kaynaklı resorbsiyonlu soğutma sistemi ile tarımsal ürünlerin soğuk depolaması işlemi gerçekleştirilmektir. Sistemde yer alan buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma sistemi aracılığı ile, resorbsiyonlu sistemin diğer soğutma sistemleri ile hibrit kullanımı araştırılmaktadır. SOLARES güneş enerjisi kaynaklı resorbsiyonlu soğutma sisteminde kullanılan soğutucu cihazın nominal soğutma kapasitesi yaklaşık 4 kW olduğundan, sistemin evsel soğutma amaçlı olarak kullanılması da mümkündür.

Resorbsiyonlu sistemlerde sıcak desorber sıcaklığının düşük olması, sistemin endüstriyel alanlarda oluşan atık ısıyı kullanarak soğutma yapmasını da mümkün kılmaktadır. Özellikle tekstil endüstrisinde oluşan uygun sıcaklıktaki atık ısı kullanılarak soğutma uygulamasını gerçekleştirmek mümkün olmaktadır. Ayrıca atık ısının geri kazanımı ile enerji verimliliğine önemli ölçüde katkı sağlanmakta ve enerji ile ilintili sorun iyileştirilmesinde alternatif çözümler sunulmaktadır. Şekil 5'te atık ısı ile çalışan bir resorbsiyonlu soğutma sistemi görülmektedir. Helle (2014) tarafından tanıtılan resorbsiyonlu soğutma sisteminde [32], yüksek ve düşük sıcaklıklı proton değişim membranlı yakıt hücresinde oluşan atık ısı kullanılarak soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Maksimum soğutma kapasitesinin 1,8 kW olduğu sistemde, soğutma tesir katsayısı değerinin 0,4'ün üzerine çıkabildiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, ısı atım hattı sıcaklığının 20 °C olması durumunda, 65 ilâ 80 °C sıcaklık aralığındaki ısıl enerji kaynağı ile 3-8 °C sıcaklık aralığında soğutma işleminin mümkün olabildiği görülmüştür [28].

Yakıt pillerinde oluşan atık ısı ile çalışan düşük soğutma kapasiteli resorbsiyonlu soğutma sistemleri, özellikle evsel soğutma uygulamaları için oldukça uygulanabilir alternatifler sunmaktadır.

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinde sistemin çalışma basıncı, amonyak eriyikli sistemlere göre oldukça düşük seviyelerdedir. Bu sayede, amonyak kullanan soğutma sistemlerindeki amonyak kaçağı riski, resorbsiyonlu sistemlerde asgariye indirilmiştir. Amonyak insan ve çevre sağlığı için tehlikeli bir maddedir. Sistemde oluşacak amonyak kaçağı oldukça risklidir ve bunu önlemek için çeşitli tedbirler almak gerekmektedir. Weimar'ın (2014) bildirdiğine göre, resorbsiyonlu soğutma sisteminin çalışma basıncı, amonyak eriyikli absorbsiyonlu soğutma sistemine göre yaklaşık 5 kat daha düşük değerdedir ancak her iki sistemin de soğutma tesir katsayıları 0,6'dır ve yaklaşık olarak aynı değeri almaktadır [33]. Bu nedenle hijyen ve ürün kalitesinin büyük önem arz ettiği gıda endüstrisinde, resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin kullanımı ile daha güvenli uygulamaları hayata geçirmek mümkün olmaktadır. Şekil 6'da gıda endüstrisindeki soğuk zincir uygulamasında kullanılan 80 kW soğutma kapasitesine sahip resorbsiyonlu soğutma sistemi görülmektedir.

Amonyak eriyikli soğurmalı soğutma sistemlerinde amonyak kullanımına bağlı olarak, sistem ekipmanları paslanmaz çelik malzemeden imal edilmektedir ve bu nedenle alternatiflerine göre hem daha maliyetli hem de daha ağır ve hantal olmaktadırlar. Resorbsiyonlu çevrimlerde çalışma basıncının, diğer amonyak eriyikli soğutma sistemlerine göre düşük olması nedeni ile sistemde kullanılan bileşenler, daha ince cidarlı paslanmaz çelik malzeme kullanılarak oluşturulabilmektedir.



Şekil 5. Atık ısı kaynaklı resorbsiyonlu soğutma sistemi [32]

Bu sayede resorbsiyonlu sistem alternatiflerine göre daha kompakt, daha hafif ve daha ekonomik, dolayısıyla daha uygulanabilir nitelikte olmaktadır ve kullanıcısında daha çok katma değer sağlamaktadır [30]. Ayrıca bu durum nedeni ile resorbsiyonlu sistemlerin, frigorifik araçlarda soğutma gibi mobil uygulamalarda da önemli faydalar sağladığı görülmüştür.

Pastakkaya ve Ünlü (2018) tarafından bildirildiğine göre resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin, frigorifik araçların soğutma ihtiyacının karşılanmasında kullanımı, teknik ve ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Resorbsiyonlu sistemlerin çalışması için gereken termal enerjinin, frigorifik araçların motorundan sağlanan atık ısı ile elde edilebildiği ve bu sayede araç içerisinde taşınacak ürünlerin soğutma ihtiyacının, 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda bile verimli bir şekilde karşılanabileceği bildirilmiştir. Ayrıca resorbsiyonlu sistemlerin araçlarda soğutma ihtiyacının karşılanmasında kullanımı ile ciddi anlamda yakıt tasarrufu elde edilebileceği, resorbsiyonlu sistemlerin kullanımı ile dışa bağımlı olan enerji ihtiyacının azaltılarak ülke ekonomisine önemli katma değerler sağlanmasının ve taşımacılık sektörü nedeni ile oluşan CO_2 salınımında da azalma sağlanarak, çevre ve insan sağlığı açısından önemli katkıların elde edilmesin mümkün olduğu belirtilmiştir [34]

Pastakkaya ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada; resorbsiyonlu sistemin 90 °C sabit sıcaklık değerindeki bir jeotermal enerji kaynağı ile çalışması öngörülerek, nominal çalışma şartlarında resorbsiyonlu sistem ile geleneksel buhar sıkıştırmalı soğutma sisteminin elektrik tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre iki farklı soğutma sisteminde yer alan ekipmanlar ve elektrik tüketim



Şekil 6. Soğuk zincir uygulamasında kullanılan resorbsiyonlu soğutma cihazı [33]

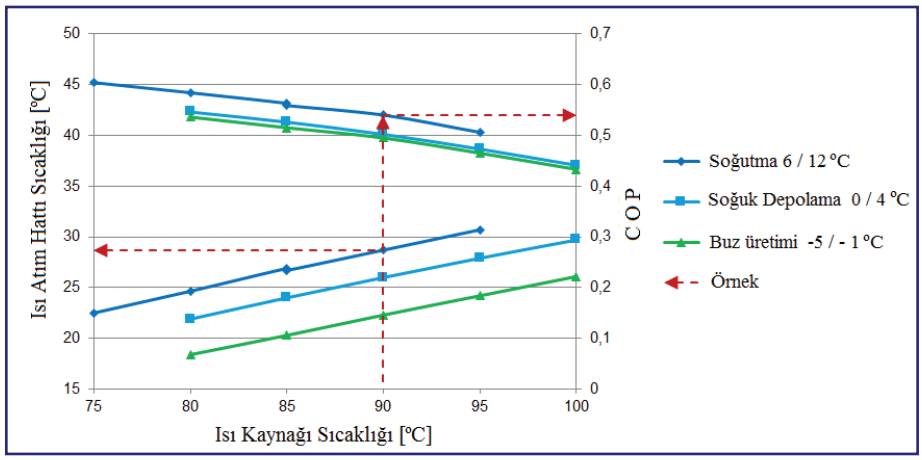
değerleri ile resorbsiyonlu sistemin kullanımı ile sağlanan elektrik enerjisi tasarruf miktarı halinde sunulmuştur (Tablo 1). Çalışma sonucunda soğuk hava deposunun soğutma ihtiyacının resorbsiyonlu soğutma sistemi ile karşılanmasında 1 kW soğutma başına yaklaşık 0,45 kWhe değerinde yani %68 oranında enerji tasarrufu sağladığı sonucuna varılmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma dâhilinde, resorbsiyonlu sistemin evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında kullanım özelliklerinin ve sağlayacağı faydaların araştırılması amacı ile, yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar derlenerek, elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında

Tablo 1. Resorbsiyonlu Soğutma Sisteminin Geleneksel Soğutma Sistemi ile Karşılaştırılması [36]

Solares Resorbsiyonlu Soğutma Sistemi 4 kW		Geleneksel Buhar Sıkıştırmalı Mekanik Soğutma Sistemi 4 kW	
Cihazlar ve Özellikleri	**Enerji tüketim değeri [kWe]**	**Cihazlar ve Özellikleri**	**Enerji tüketim değeri [kWe]**
Isı Atım Hattı Ekipmanları	0,4	Kompresör	2,09
Isı Dağıtım Hattı Ekipmanları	0,17	İç ve Dış Üniteler	0,54
Isıtma Kaynağı Hattı Ekipmanları	0,09		
Soğutma Cihazı	0,18		
T O P L A M	0,84	TOPLAM	2,63
1 kW soğutma başına elektrik tüketimi [kWhe]	0,21	1 kW soğutma başına elektrik tüketimi [kWhe]	0,6575



Şekil 7. Resorbsiyonlu soğutma sistemi çalışma sıcaklıkları ve COP değişimi [20]

kullanılan resorbsiyonlu soğutma sistemleri, çalışma özellikleri açısından sahip olduğu üstünlükler nedeni ile hem geleneksel buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerine göre, hem de diğer amonyak eriyikli absorbsiyonlu soğutma cihazlarına göre önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar şu şekilde özetlenebilir.

Resorbsiyonlu soğutma istemlerinde, buhar sıkıştırmalı soğutma sisteminde yer alan kompresör yerine, sıcak desorber, absorber, eriyik pompası ve kısılma vanasından oluşan bir termal kompresör yer almaktadır. Bu nedenle resorbsiyonlu sistemlerin çalışması için gereken elektrik enerjisi ihtiyacı, geleneksel buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerine göre çok daha düşük seviyededir.

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinde soğutucu akışkan olarak amonyak-su eriyiği kullanıldığından, çalışma şartlarına bağlı olarak -10 °C altında soğutma uygulamalarını gerçekleştirmek mümkündür (Şekil 7). Bu nedenle, resorbsiyonlu sistemler derin dondurma ve soğuk depolama uygulamalarında verimli bir şekilde kullanılabilmektedir. Ayrıca sistem ile soğutma enerjisinin gizli ısı formunda buzda depolanması da mümkündür. Bu sayede güneş enerjili soğutma uygulamalarında, güneş enerjisinin bulunmadığı ya da yetersiz kaldığı durumlarda da soğutma ihtiyacının kesintisiz olarak sağlanması mümkün olmakta, yardımcı enerji ihtiyacı minimuma indirgenmektedir [5].

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinde çalışma basınçları, absorbsiyonlu soğutma sistemlerine göre yaklaşık 5 kat daha düşüktür [30]. Pastakkaya ve Ünlü (2018) tarafından bildirildiğine göre aynı çalışma koşullarında resorbsiyonlu sistemin, absorbsiyonlu sisteme daha düşük çalışma basınçlarında, aynı soğutma performansı ile daha düşük sıcaklıklarda soğutma yapabildiği görülmüştür (Tablo 2) [34]. Ayrıca resorbsiyonlu sistemlerde amonyak kaçağı riski, çalışma basınçlarının oldukça düşük seviyelerde olması nedeni minimuma indirgenmiştir. Bu sayede insan sağlığı ve çevre açısından çok daha güvenli bir soğutma sistemi oluşturmak mümkün olabilmektedir. Benzer şekilde, resorbsiyonlu sistemlerde çalışma basıncının düşük olması nedeni ile daha ince cidarlı paslanmaz çelik malzeme kullanılarak sistem oluşturulabilmekte

Tablo 2. Absorbsiyonlu ve Resorbsiyonlu Soğutma Sisteminin Örnek Uygulama İçin Karşılaştırılması [34]

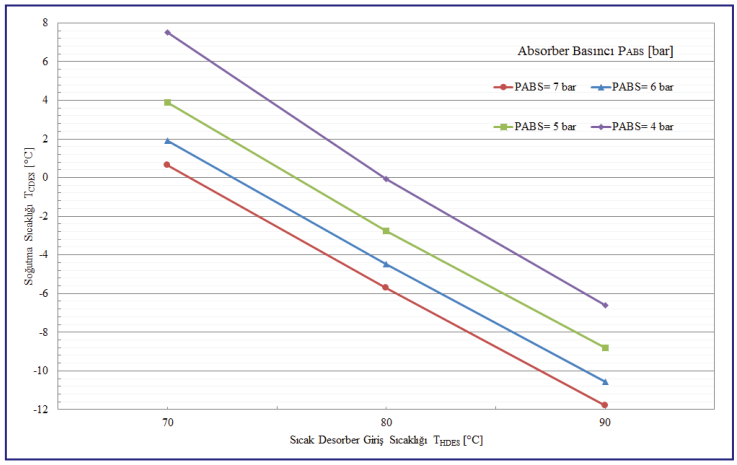
Çalışma Şartları	Absorbsiyonlu soğutma sistemi	Resorbsiyonlu soğutma sistemi
Kaynatıcı / Sıcak Desorber Sıcaklığı [°C]	90	90
Absorber Sıcaklığı [°C]	30	30
Soğutma Sıcaklığı [°C]	10	7,5
Soğutma Tesir Katsayısı [-]	0,526	0,524
Çalışma üst basıncı [bar]	11,6	6

ve resorbsiyonlu sistem, alternatiflerine göre daha kompakt, daha hafif ve daha ekonomik, dolayısıyla daha uygulanabilir nitelikte olabilmektedir.

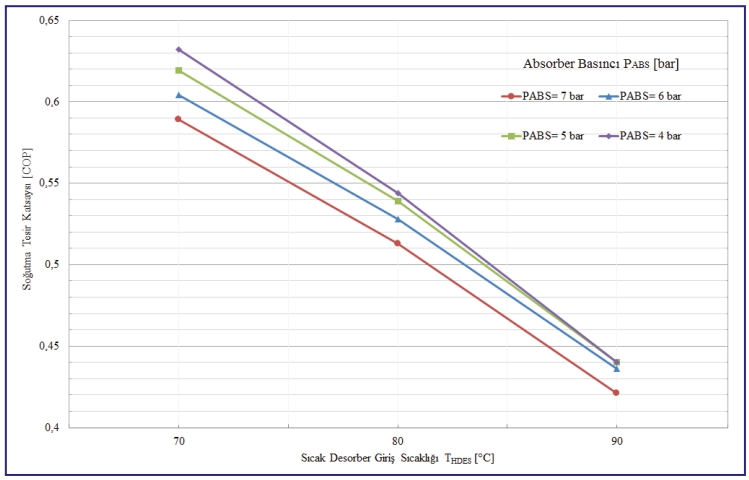
Resorbsiyonlu soğutma sisteminde, çalışma basınçlarının düşük olmasına bağlı olarak, amonyak eriyikli absorbsiyonlu soğutma sistemine göre daha düşük sıcaklıklı termal enerji kullanılarak soğutma yapmak mümkündür. Bu nedenle resorbsiyonlu sistemlerinin yenilenebilir enerji ve atık ısı kaynaklı soğutma uygulamaları için kullanımı oldukça uygulanabilir niteliktedir. Refprop programı ile oluşturulan yazılım sayesinde [10], farklı sıcaklıktaki ısıl enerji ile farklı çalışma basınçlarında sistemin soğutma performansı Şekil 8.'de yer almaktadır. 90°C sıcaklığında termal enerji ile çalışan ve absorber sıcaklığı 20°C olarak belirlenen resorbsiyonlu sistemin, üst basınç değerinin (PHDES) 7 ilâ 4 bar arasında değişmesi durumunda, soğutma/soğuk desorber sıcaklığının (TCDES) değişimi görülmektedir [34].

Resorbsiyonlu sistemin soğutma sıcaklığı değeri, çalışma basıncının ve sıcak desorberi besleyen termal enerji kaynağının sıcaklığı yükseldikçe azalmaktadır. Bu sayede daha düşük sıcaklıklarda soğutma yapmak mümkün olmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, 7 bar çalışma basıncında sıcak desorber sıcaklığının 70 °C seviyesine düşmesi durumunda bile 0 °C'ye yakın sıcaklıklarda soğutma uygulamasının sürdürülebildiği görülmektedir [9].

Şekil 9'da, 90°C sıcaklığında termal enerji ile çalışan ve absorber sıcaklığı 20°C olarak belirlenen resorbsiyonlu sistemin, üst basınç değerinin (PHDES) 7 ilâ 4 bar arasında değişmesi durumunda, birim enerji başına yapılan soğutmayı ifade eden soğutma tesir katsayısının (STK) değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde soğutma tesir katsayısı değerlerinin, geleneksel amonyak su eriyikli absorbsiyonlu soğutma sistemlerine benzer mertebelerde olduğu görülmektedir, yani her



Şekil 8. Resorbsiyonlu sistemin soğutma sıcaklığının çalışma basıncı ile değişimi [34]



Şekil 9. Resorbsiyonlu sistemin soğutma tesir katsayısının çalışma basıncı ile değişimi [34]

iki sisteminde benzer çalışma şartları altında soğutma performansları benzer değerler almaktadır. Soğutma tesir katsayısının, çalışma basıncı ve sıcak desorber sıcaklığının artışı ile birlikte azaldığı görülmektedir. Ancak benzer şekilde sistemin soğutma sıcaklık değerleri de bu artışa paralel olarak azalmaktadır. Bu nedenle soğutma uygulamasında ihtiyaç duyulan soğutma sıcaklığının doğru bir şekilde belirlenmesi, sistemin soğutma performansının iyileştirilmesi açısından önemlidir.

4. SONUÇ

Resorbsiyonlu soğutma sistemleri, alternatiflerine göre sahip olduğu teknik üstünlükler nedeni ile önemli avantajlara sahiptir. Sistemin çalışması için gereken elektrik enerjisi 1 kW soğutma başına yaklaşık 0,21 kW değerindedir ve geleneksel buhar sıkıştırmalı mekanik soğutma sistemlerine göre %67 oranında daha azdır. Resorbsiyonlu soğutma çevrimlerinde sistemde yer alan çalışma basınçları, absorbsiyonlu soğutma sistemlerine göre yaklaşık olarak %50 daha düşüktür. Bu nedenle resorbsiyonlu soğutma sistemleri ile çok daha güvenli ve çok daha ekonomik ve daha kompakt projeler oluşturmak mümkün olmaktadır.

Resorbsiyonlu sistemin çalışması için ihtiyaç duyulan ısıl enerjinin sıcaklık değerinin yaklaşık 70 – 90 °C aralığında olduğu tespit edilmiştir. Buna göre resorbsiyonlu sistemin, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklı uygulamaların farklı çalışma koşullarında alternatiflerine göre daha iyi bir performans sergileyeceği görülmüştür. Sistemin soğutma tesir katsayısı, çalışma şartlarına göre yaklaşık 0,4 - 0,6 seviyelerindedir ve bu değer geleneksel amonyak eriyikli absorbsiyonlu sistemlerde aynı değerleri almaktadır. Ancak aynı soğutma performansında olmasına rağmen, resorbsiyonlu soğutma sistemleri, evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında absorbsiyonlu soğuma sistemlerine göre tekno-ekonomik açıdan çok daha elverişli durumda olduğu sonucuna varılmıştır.

Resorbsiyonlu soğutma sistemlerinin sahip olduğu avantajların doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve hayata geçirilmesi ile evsel ve endüstriyel soğutma uygulamalarında tekno-ekonomik açıdan katma değer sağlayacak iyileştirmeler yapmak mümkün olmaktadır. Özellikle temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları ve atık ısı ile çalışan resorbsiyonlu soğutma sisteminin kullanımının yaygınlaştırılması ile enerji kullanımına bağlı ulusal ve küresel ölçekli birçok soruna, alternatif çözümler sağlanacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından, "Orhangazi Bölgesinde Tarımsal Soğutma Maliyetlerinin Düşürülmesi Amacıyla Resorbsiyonlu Soğutma Teknolojisinin Kullanımının Araştırılması" (OUAP – OGMYO 2013 – 42) - SOLARES isimli orta ölçekli bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmektedir. Yazar, bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından ötürü Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

[1] Pastakkaya B., Ünlü K., Yamankaradeni R., "Örnek Bir Yapının İklimlendirilmesinde Güneş Enerjisi Kaynaklı Isı Pompasının Simülasyon Tekniği ile İncelenmesi", Mühendis ve Makina, 30-37, Cilt 56, Sayı 666, Temmuz 2015.

[2] Henning H.M., "Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings – A Handbook for Planners", Springer Wien New York, 136 pp., 2007.

[3] Anoni A., "Solar Heating and Cooling of Residential Buildings: Design of Systems", Solar Energy Applications Laboratory Colorado State University, University Press of the Pacific, Hawaii, 632 pp., 2005.

[4] Anoni B., "Solar Heating and Cooling of Residential Buildings: Sizing, Installation and Operation of Systems", Solar Energy Applications Laboratory Colorado State University, University Press of the Pacific, Hawaii, 744 pp., 2005.

[5] Hennıng, H.M., "Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings – A Handbook for Planners", Springer Wien New York, 136 pp.,2007.

[6] Pastakkaya B., Yamankaradeniz N., Coşkun S., Kaynakli Ö., Yamankaradeniz., "Experimental Analysis of a Solar Absorption System with Interior Energy Storage", Journal of Energy in Southern Africa 23: 39-49, 2012

[7] Syeda., Izquierdo M., Rodríguez P., Maidment G., Missenden J., Lecuona A., Tozer R., 2005, "A Novel Experimental Investigation of a Solar Cooling System in Madrid", International Journal of Refrigeration, 28(6): 859–871.

[8] Pastakkaya B., "Bir Konutun Isıtılması ve Soğutulmasında Güneş Enerjisi Kaynaklı Absorbsiyonlu Sistemlerin Kullanımı", U.Ü. Fen-Bil. En. Doktora Tezi,198 s., 2012.

[9] Chinnappa J.C.V., Crees M.R., Murthy S., Srinivasan K., "Solar-Assisted Vapor Compression/Absorption Cascaded Air-Conditioning Systems", Solar Energy, 50(5): 453–458., 1993

[10] Eicker, U., Pietruschka, D., "Design and Performance of Solar Powered Absorption Cooling Systems in Office Buildings", Energy and Buildings, 41(1): 81–91., 2009.

[11] Hidalgo, M.C.R., Aumente, P.R., Izquierdo M., Neumann, A., Mangual, R., "Energy and Carbon Emission Savings in Spanish Housing Air-Conditioning Using Solar Driven Absorption System", Applied Thermal Engineering, 28(14): 1734–1744, 2008.

[12] Lof G.O.G, Tybout R.A., "The Design and Cost of Optimized Systems for Residential Heating and Cooling by Solar Energy", Solar Energy 16(1): 9–18. 1974.

[13] Mateus, T., Oliveira, A.C., "Energy and Economic Analysis of an Integrated Solar Absorption Cooling and Heating System in Different Building Types And Climates", Applied Energy, 86(6): 949–957. 2009.

[14] Mendes, L. F., Pereira, M. C., Ziegler F., "Supply of Cooling and Heating With Solar Assisted Absorption Heat Pumps: An Energetic Approach", International Journal of Refrigeration, 21(2): 116–125. 1998.

[15] Siddiqui, M.A. Economic Analyses of the Operating Costs in Four Absorption Cycles for Optimizing the Generator and Condensing Temperatures, Energy Conversion and Management, 35(6): 517–534., 1994.

[16] Soutullo, S., Sanjuan, C., Heras, M.R., Comparative Study of Internal Storage and External Storage Absorption Cooling Systems, Renewable Energy, 36(5): 1645–1651, 2011.

[17] Pastakkaya B., İşman M.K., Korukçu M.Ö., Yamankaradeniz R., İzmir İli Için Güneş Enerjisi Kaynaklı Absorbsiyonlu Isı Pompası Sistemi İle Isıtma-Soğutma Uygulamasının Sayısal Analizi, 1301-1312 Cilt 2, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye 2013.

[18] Pastakkaya B., Ünlü K., Yamankaradeniz R., Örnek Bir Yapının Isıtma-Soğutma Uygulamasında Güneş Enerjisi Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Simülasyon Tekniği Ile Incelenmesi, 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi İzmir-Türkiye, 2015.

[19] Pastakkaya B., Güneş Enerjisi Kaynaklı Absorbsiyonlu Isı Pompası Sisteminin Farklı Derece-Gün Bölgeleri İçin Isıtma-Soğutma Performansının İncelenmesi, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi İzmir-Türkiye, 2017.

[20] Pastakkaya, B., Cüce E., Cüce P., "Cooling Applications with Renewable Energy Powered Resorption Systems", 14th International Conference on Sustainable Energy Technologies – SET 201, 25th - 27th of August, Vol II., pp.58-64. Nottingham, 2015.

[21] Jiang L.,.P., Roskilly A.P., Wang R.Z., Wang L. W., "Analysis on Innovative Resorption Cycle for Power and Refrigeration Cogeneration", Applied Energy Vol. 218, 15 May Pages 10-21, 2018.

[22] Jiangl., Wangl. W., Liu C.Z., Wang R.Z., "Experimental Study on a Resorption System for Power and Refrigeration Cogeneration", Energy, Volume 97, Pages 182-190., 2016.

[23] Bao H.S., Wang R.Z., Oliveira R.G., Li T.X., "Resorption System for Cold Storage and Long-Distance Refrigeration", Applied Energy, Volume 93, Pages 479-487, 2012.

[24] Teng J., Enqian D., Yanjun D., "Thermodynamic Analysis and Optimization of a Balanced-Type Single-Stage NH_3-H_2O Absorption-Resorption Heat Pump Cycle for Residential Heating Application", Energy, Volume 171, , Pages 120-134, 2019.

[25] Pastakkaya B., Ünlü K., "Biyogaz ile Çalışan Resorbsiyonlu Trijenerasyon Sistemleri", 2nd International Workshop of Composting and Biogas Technologies (IWCB), November 16-18, Antalya, 2017

[26] Ünlü K., Pastakkaya B., "Tarımsal Soğutma Uygulamalarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Resorbsiyonlu Soğutma Sistemleri", 3nd International Congress of Agriculture and Environment (ICAE), November 16-18, Antalya, 2017.

[27] Pastakkaya B., "Atık Isı Kaynaklı Resorbsiyonlu Soğutma Sistemi İle Endüstriyel Soğutma Uygulamaları", IV. Enerji Verimliliği Kongresi, 13-14 Ekim, Kocaeli, 2017

[28] Pastakkaya B., Ünlü K., Gürbüz O., Yaslioğlu E., Gürbüz B., Kiliç İ., "Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Resorbsiyonlu Soğutma Sistemleri",

2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress, 25-27 October, Adana, 2017.

[29] Jaehner T., Grund M., "ResoFreeze", Renewable & Clean Energy Workshop - U.Ü. TTO Tübitak P.No:6130034, Bursa, Türkiye, 2014.

[30] Pastakkaya B., Ünlü K., Gürbüz O., Yaslioğlu E., Gürbüz B., Kiliç İ., "Güneş Enerjisi Kaynaklı Resorbsiyonlu Soğutma Sistemleri ile Soğuk Depo Uygulamaları", International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development, 21st-24th of September, Isparta, 2017.

[31] Pastakkaya B., Ünlü K., Gürbüz O., Yaslioğlu E., Gürbüz İ.B., Kiliç İ., Yamankaradeniz R., Peil S., Helle K., Burhan G.,Cüce E., Cüce P.M."Güneş Enerjisi Kaynaklı Tarımsal Soğutma Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı SOLARES", Uludağ Üniversitesi IV. Bilgilendirme ve ARGE Günleri Bursa –Türkiye, 2014

[32] Helle K., "Experimental Experiences with a Resorption Lab Plant at IUTA", Renewable & Clean Energy Workshop - U.Ü. TTO Tübitak P.No:6130034, Bursa, 2014.

[33] Weimar, T. "Resorption as New Alternative for Cooling at Low temperatures", Renewable & Clean Energy Workshop - U.Ü. TTO Tübitak P.No:6130034, Bursa, Türkiye, 2014.

[34] Pastakkaya B., Ünlü K., "Frigorifik Araçlarda Resorbsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Kullanımının İncelenmesi", 9th International Automative Technologies Congress, Bursa. (OTEKON 2018) 7-8 May, 2018.

[35] Anoni C., "Refprop NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database, https://www.nist.gov/srd/refprop., 2019 (Erişim tarihi 14.01.2019)

[36] Pastakkaya B., Ünlü K., Gürbüz O., Yaslioğlu E., Gürbüz B., Kiliç İ., "Tarımsal Ürünler İçin Soğuk Depo Uygulamalarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Resorbsiyonlu Soğutma Sistemi İle Soğutma Maliyetlerinin Düşürülmesi", V. Uluslararası Gıda ArGe Proje Pazarı, İzmir, 2017.