



Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri ve Isıl Verim Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi

Gamze Karanfil^{1,2**}, Selmin Ener Ruşen^{1,2}, Şeyma Nur Poyraz¹, Mustafa Can¹

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye

²Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Enerji Verimliliği Araştırma ve Uygulama Merkezi, Akademik Enerji Araştırma Grubu (AKEN), Karaman, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7941-9853; 0000-0003-3389-5739)

(İlk Geliş Tarihi 18 Mart 2020 ve Kabul Tarihi 23 Mayıs 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.705762)

ATIF/REFERENCE: Karanfil, G., Ruşen, S. E., Poyraz, Ş. N. & Can, M. (2020). Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri ve Isıl Verim Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 127-137.

Öz

Günümüzde enerjiye olan ihtiyacın artması, kullanılan fosil enerji kaynaklarının sınırlı miktarda ve çevreye zararlı olması alternatif enerji kaynakların yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Bu alternatif enerji kaynakları arasında en güvenilir, kolay ulaşılabilir ve ucuz olan enerji kaynağı, enerjinin verimli kullanılması olarak tüm dünyada kabul görmektedir. Bu bağlamda enerji verimliliği, üretim kalitesi ve miktarının düşmesine sebebiyet vermeden enerji tüketiminin azaltılması olarak tanımlanmaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen enerjinin büyük bir kısmı sanayi sektöründe kullanılmaktadır. Sanayide enerjinin verimli kullanılması, kayıp ve kaçakların önlenmesi ve atık enerjinin geri kazanımı gibi yöntemlerle enerji maliyetinin düşürebileceği ve verimliliğinin arttırılacağı öngörülmektedir. Aynı zamanda enerjinin verimli kullanılması ülke ekonomisine ve çevrenin korunmasına da büyük katkı sağlayacaktır. Sanayi sektöründe, özellikle atık ısının kullanılmaması kayıp enerjinin en önemli sebeplerinden biridir. Bu çalışmada atık ısı geri kazanım sistemleri tanımlanarak, sanayide en çok kullanılan iki tip atık ısı geri kazanım sisteminin (ısı tekeri ve reküperatör) ısıl verimi üzerindeki etki eden parametreler deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen sistemde verimliliğin arttırılması amacıyla optimum şartların belirlenmesi için Taguchi metodu kullanılmış ve analizler gerçekleştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Isı tekeri için optimum koşullar % 100 ısı tekeri devir hızı, % 60 Fan 1 hızı ve % 80 Fan 2 hızı olarak bulunurken, reküperatör için 50 °C hava giriş sıcaklığı, % 60 Fan 1 hızı ve % 80 Fan 2 hızı olarak bulunmuştur. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen en yüksek verim değerleri ısı tekeri ve reküperatör sistemleri için sırasıyla % 97 ve % 73 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, yapılan tüm deneyler içerisinde en yüksek verim değerleri olarak kaydedilmiş ve Taguchi metodunun uygulanabilirliği ile yapılan analizlerin doğruluğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Enerji Verimliliği, Atık Isı, Taguchi Metodu

Experimental Investigation of Waste Heat Recovery Systems and Heat Yield Parameters

Abstract

Today, the energy needs are increasing, but the limited amount of fossil energy resources existing and its harmful to the environment has led to the spread of alternative energy sources. The most reliable, easily accessible and inexpensive energy source among these alternative energy sources is accepted worldwide as the efficient use of energy. In this context, energy efficiency is defined as the reduction of energy consumption without causing a decrease in production quality and quantity. Most of the energy obtained from different sources is used in the industry sector. It is anticipated that energy efficiency can be reduced and efficiency will be increased through methods such as efficient use of energy in the industry, prevention of losses and leaks and recovery of waste energy. At the same time, efficient use of energy will make a great contribution to the economy of the country and the protection of the environment. In the industrial sector, especially not using waste heat is one of the most important causes of lost energy. In this study, the waste heat recovery systems are defined and the parameters affecting the thermal efficiency of the two types of waste heat recovery systems (heat wheel and recuperator) most used in the industry are investigated experimentally. Taguchi method was used to determine the optimum conditions in order to increase efficiency in the system examined, and the results were interpreted by analyzing. The optimum conditions for the heat wheel are found as 100% heat wheel turnover rate, 60% Fan 1 speed and 80% Fan 2 speed, while the recuperator is 50 °C air inlet temperature, 60% Fan 1 speed and 80% Fan 2 speed. The highest efficiency values obtained as a result of verification experiments were calculated as 97% and 73% for heat wheel and recuperator systems, respectively. These values were recorded as the highest efficiency values in all experiments and showed the accuracy of the analyzes performed with the applicability of the Taguchi method.

Keywords: Energy, Energy Efficiency, Waste Heat, Taguchi Method

* Sorumlu Yazar: Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye, ORCID: 0000-0002-7941-9853, gamzekaranfil86@gmail.com

1. Giriş

Artan enerji talebini karşılamak için hâlihazırda kullanılan fosil kaynakların sürdürülebilir olamaması ve çevresel olumsuz etkileri nedeniyle alternatif enerji kaynakları günümüzde giderek yaygınlaşmıştır. Alternatif enerji kaynakları arasında değerlendirilen enerji verimliliği ise ucuz, temiz ve kolay uygulanabilmesi nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu bağlamda pek çok ülkede enerjinin verimli kullanılması ve çevrenin korunmasında dair planlamalar, kanun ve yönetmelikler uygulanmaktadır. Ülkemizde ise, 2 Mayıs 2007 tarih ve 26510 sayılı Resmî gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren, 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve 25 Ekim 2008 tarih ve 27035 sayılı Enerji Kaynakları ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik gereğince enerjinin her alanda etkin kullanımı ve verimliliğinin artırılması belirtilmiştir (Ener Rusen ve Koç, 2019).

Enerjinin en yoğun kullanıldığı alanlar arasında sanayi sektörü tüm dünyada önemli bir yerde bulunmaktadır. Bu bağlamda, küresel ısınmanın önlenmesi ve dolayısıyla sera gazı salınımlarının azaltılması için sanayi sektöründeki enerjinin kullanım biçimi incelenmelidir. Dünya çapındaki nihai enerjinin yaklaşık % 38’i sanayide kullanılmaktadır. Bu nedenle endüstriyel proseslerin enerji tüketimi mümkün olduğunca azaltılmalıdır (Brueckner vd., 2014). Günümüzde, tüm dünyada sera gazı salınımını azaltmak için yapılan çalışmalar ve çıkarılan mevzuatlar nedeniyle özellikle sanayideki enerji tüketiminin azaltılması anahtar faktörlerden biri haline gelmiştir. Bunun yanı sıra, enerji verimliliğindeki iyileşmelerin daha düşük işletme maliyeti ve artan karlılık ile sonuçlandığı da bilinmektedir (Varga ve Palotai, 2017). Ancak çoğu zaman ısı sistemleri optimize edilmiş işletmelerde bile yüksek sıcaklıkta olan atık ısı dışarı atılmaktadır. Atık ısının değerlendirilmesi için doğrudan kullanım sağlayan veya egzoz ısı teknolojileri uygulayarak ısı veya elektrik üretmek için kullanılan uygulamalar vardır (Brueckner vd., 2014).

Sanayide kullanılan enerjinin neredeyse % 26’lık bir kısmı sıcak gazlar ve sıvılar olarak atılmaktadır. Kaybedilen bu enerji, atık ısı geri kazanımıyla büyük ölçüde azaltılabilir. Atık ısı geri kazanım sistemlerine yapılacak yatırımın asgari sürede kendini amorti edebilmesi rekabet ortamında avantajlar sağlamaktadır (Çomaklı ve Terhan, 2011). Endüstriyel atık ısı geri kazanım sistemleri önemli ölçüde enerji tasarrufu ve sera gazı salınımlarında önemli azalmalar sağlayabilen sistemlerdir (Editorial, 2018). Bu bağlamda, endüstriyel süreçlerde atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanılması yakıt tüketimini azaltmak, zararlı gaz salınımlarını azaltmak ve üretim verimliliğini artırmak için önemli araştırma alanlarından biri olmuştur (Jouhara vd., 2018; Ener Rusen, 2019). Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında, endüstriyel işletmelerin kendilerine uygun atık ısı geri kazanım sistemlerini kurmalarının önemi açıkça görülmektedir.

Geri kazanılmak istenen atık ısı kaynağı belirlendikten sonra bu ısının nerede ve ne amaçla kullanılacağı tespit edilerek geri kazanım ile faydalanılacak ısı miktarı ve uygun olan sistem seçilmelidir. Ancak geri kazanılmak istenen atık ısı miktarı ne kadar fazla olursa kullanılacak sistemin kapasitesi ve buna bağlı olarak da yatırım maliyeti yüksek olacaktır. Atık ısı geri kazanım sisteminin belirlenmesi etkileyen temel faktörlerin başında, akışkanların sıcaklıkları, ısı transfer kapasitesi, akışkanları nitelikleri ve hacimsel debileri gelmektedir (Uysal, 2019).

Sanayide genellikle karşılaşılan hava-hava (gaz-gaz) tipi ısı geri kazanımı için çeşitli teknikler bulunmaktadır (Ener Rusen vd., 2018). En yaygın hava-hava tipi ısı geri kazanımı cihazları ısı tekerleri, plakalı ısı değiştiricileri (reküparatörler gibi) ve ısı borularıdır. ısı tekerleri sistemlerinde, biri sıcak atık hava diğeri ise soğuk hava içeren iki paralel kanalın üzerine yerleştirilmiş dönen gözenekli bir disk kullanılmaktadır. Yüksek ısı kapasiteli bir malzemeden oluşan bu disk, iki kanal arasında döner ve ısıyı sıcak hava kanalından soğuk hava kanalına aktarır. ısı tekerleri kullanımı genellikle yüksek sıcaklıkların yarattığı olumsuz termal stres nedeniyle düşük ve orta sıcaklıktaki uygulamalarla sınırlıdır (Manikantha vd., 2017; Shahsavar ve Khanmohammadi, 2019). Reküparatörler ise paralel akışlı, çapraz akışlı ve zıt akışlı ısı değiştiricileri olarak sınıflandırılır. En yaygın reküparatörler, çapraz akış plakalı ısı değiştiricilerdir (Karanfil vd., 2019) Taze ortam havası ve atık nemli kirli hava bu tip ısı değiştiricisinde birbirine karışmaz, çünkü bu hava akışları farklı kanallardan geçmektedir (Oğulata, 2004).

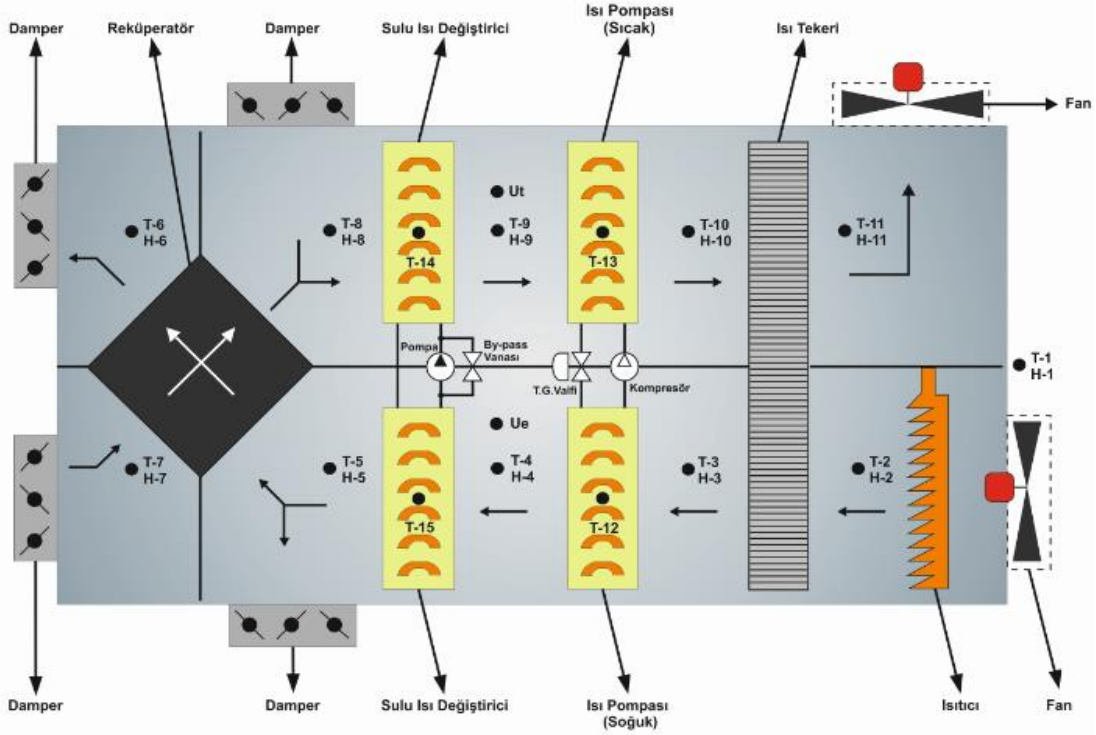
Yapılan bu çalışmada, sanayide en çok karşılaşılan hava-hava tipi ısı geri kazanım cihazı olan ısı tekeri ve reküparatörün ısı verimleri üzerinde akış hızları, egzoz havası sıcaklığı ve devir sayısı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. ısı verimleri etkileyen bu parametrelerin etkisini bir arada incelemek ve en etkin parametreleri belirlemek için Taguchi optimizasyon metodu kullanılmıştır. Taguchi metodunun sonuçlarının desteklenmesi ve daha detaylı analiz edilmesi için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Hava-hava tipi ısı geri kazanım cihazları olan ısı tekeri ve reküparatörün ısı verimleri üzerine etki eden parametrelerin incelenmesi için Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Enerji Verimliliği Eğitim Laboratuvarı’nda bulunan ve Şekil 1’de verilen atık ısı geri kazanım ünitesi kullanılmıştır. Deneysel incelemede kullanılan atık ısı geri kazanım ünitesinde toplam 4 tane geri kazanım sistemi bulunmaktadır. Bunlar: ısı tekeri, sulu ısı değiştiricisi (ekonomizer), ısı pompası, plakalı ısı değiştiricisi (reküparatör)’dir. Ayrıca sistemde bir adet ısıtıcı, 2 adet fan, 4 adet damper bulunmaktadır. Sistem üzerinde toplam 11 ayrı noktada sıcaklık ve nem kontrolü yapılabilmektedir. Deneysel incelemede kullanılan atık ısı geri kazanım ünitesinin şematik gösterimi, elemanları ve sıcaklık-nem ölçüm

noktaları detaylı olarak Şekil 1’de verilmektedir. Şekil 1’de ilk sıcaklık T-1 ve nem H-1, son sıcaklık T-11 ve nem H-11 olmak üzere ölçüm noktaları sırasıyla gösterilmiştir.

Sistemde deneye başlamadan önce kontrol ekranından ilgili deney parametreleri (sıcaklık, fan1 ve fan2 hızı, ısı tekeri devir hızı vb.) ayarlanmıştır. Yapılacak deneye ilişkin ayarlamalar yapıldıktan sonra, ısıtıcı ve fanlar açılmıştır. Sistem kararlı hale geldikten sonra ölçüm değerleri kontrol ekranından okunarak kaydedilmiştir. Isı tekeri ölçümlerinde karşıt akış sağlanması için üst ve alt damperler açık tutulurken, reküperatör ölçümlerinde çapraz akışı sağlayabilmek için yan kısımdaki damperler açılmıştır.



Şekil 1. Atık ısı geri kazanım ünitesinin şematik gösterimi (<http://kmu.edu.tr/akademikenerji>)

Atık ısı geri kazanım sisteminin (ısı değiştiricisinin) performansının saptanması için toplam ısı geçişini belirten bir bağıntıya ihtiyaç duyulmaktadır. Isı kaybının olmadığını kabul ederek; termodinamik ve ısı geçiş prensiplerini kullanarak bir ısı değiştiricisi için Denklem (2.1) yazılabilmektedir (Çengel, 2011):

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (2.1)$$

Burada U = Toplam ısı transfer kat sayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A = Isı transfer yüzeyi (m^2) ve ΔT_{LM} = Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ($^\circ C$) şeklindedir. Isı değiştiricisinden çevreye ısı kaybı olmadığı durumda, kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edildiğinde farklı sıcaklıkta bulunan iki akışkanın ısı transfer denkliği Denklem (2.2) ile verilmektedir.

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_g - h_\zeta) \quad (2.2)$$

Burada \dot{m} = Akışkanın kütleli debisi (kg/s) ve h_g, h_ζ = Akışkanın sıcaklığa bağlı giriş ve çıkış entalpileri (kJ/kg) şeklindedir.

Bu denklemi sıcak ve soğuk akışkan için yazarsak, sıcak akışkandan soğuk akışkana gerçekleşen ısı transferi Denklem (2.3) elde edilmektedir:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{sıcak}(h_{sıcak,g} - h_{sıcak,\zeta}) \quad (2.3)$$

Soğuk akışkandan sıcak akışkana gerçekleşen ısı transferi ise Denklem (2.4) kullanılarak bulunur.

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{soğuk}(h_{soğuk,\zeta} - h_{soğuk,g}) \quad (2.4)$$

Burada, $\dot{m}_{sıcak}, \dot{m}_{soğuk}$ = Sıcak ve soğuk akışkanın kütleli debileri (kg/s), $h_{sıcak,g}, h_{sıcak,\zeta}$ = Sıcak akışkanın giriş ve çıkış entalpileri (kJ/kg) ve $h_{soğuk,g}, h_{soğuk,\zeta}$ = Soğuk akışkanın giriş ve çıkış entalpileri (kJ/kg) olarak tanımlanmaktadır.

Denkliklerde kullanılan havanın kütleli debisi ise Denklem (2.5) ve (2.6) kullanılarak hesaplanabilir;

$$\dot{m}_{sıcak} = \dot{V}_1 / v_g \quad (2.5)$$

$$\dot{V}_1 = A \cdot u \quad (2.6)$$

Burada, \dot{V}_1 = Hacimsel debi (m^3/s), A = Isı transfer yüzey alanı (m^2) ve u = Akışkanın hızı (m/s) olmak üzere V_g ; girişteki havanın özgül hacmidir ve birimi m^3/kg 'dir.

Isıl verimlilik ise Denklem (2.7) kullanılarak;

$$\eta = \dot{Q}_2 / \dot{Q}_1 \quad (2.7)$$

şeklinde bulunur. Akışkanın entalpi ve özgül hacim değerleri, giriş ve çıkış noktalarında ölçüm sırasında alınan kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem değerlerine bağlı olarak psikometrik diyagramdan okunmuştur.

2.1. Isı Tekerinin Isıl Verimliliğinin Bulunması

Deney sistemindeki parametreler ve literatürdeki çalışmalar ışığında ısı tekerinin atık ısı geri kazanım verimini bulmak için belirlenen parametreler ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Isı tekeri ısı verimliliği deney parametreleri

	Devir Sayısı (%) (A)	Fan 1 Hızı (%)	Fan 2 Hızı (%)
1	60	60	60
2	80	80	80
3	100	100	100

Isı tekerinin ısı verimliliği için belirlenen deney parametreleri ve seviyeleri incelendiğinde 3 seviyeli 3 faktörden oluşan bir deney tasarımına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Geleneksel yol tercih edildiğinde deney sayısının $3^3 = 27$ tane olması gerekmektedir. Deney sayısının azaltılması ve optimum sonuçların elde edilebilmesi için Taguchi tarafından gerçekleştirilen 9 denemeli L_9 ortogonal dizisi bu deney için seçilmiştir. Bu yöntem kullanılarak yapılması zorunlu olan 9 deney ile istenilen analizler gerçekleştirilmiş ve toplam 27-9=18 deneyin yapılmasına gerek kalmamıştır. 18 tane deneyin yapılması için geçecek süre ve maliyet kullanılmayarak tasarruf edilmiştir.

Tablo 2'te deneylerde kullanılan L_9 ortogonal dizini verilmiştir. Bu tabloya göre parametreler sütunlara yerleştirilmiştir.

Tablo 2. L_9 ortogonal dizini

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Isı tekerinin ısı verimliliğinin hesaplanması için belirlenen sistem parametrelerinin sütunlara yerleşimi sırasıyla Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Isı tekeri sistemi deney tasarımı

Deney No	A	B	C
1	60	60	60
2	60	80	80
3	60	100	100
4	80	60	80
5	80	80	100
6	80	100	60
7	100	60	100
8	100	80	60
9	100	100	80

2.2. Reküparatörün Isıl Verimliliğinin Bulunması

Deney sistemindeki parametreler ve literatürdeki çalışmalar ışığında reküparatörün atık ısı geri kazanım verimini bulmak için belirlenen parametreler ve seviyeleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Reküparatör ısı verimliliği deney parametreleri

	Hava Giriş Sıcaklığı (°C) (A)	Fan 1 Hızı (%)	Fan 2 Hızı (%)
1	30	60	60
2	40	80	80
3	50	100	100

Reküparatörün ısı verimliliği için belirlenen deney parametreleri ve seviyeleri incelendiğinde 3 seviyeli 3 faktörden oluşan bir deney tasarımına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Benzer şekilde, geleneksel yol tercih edildiğinde deney sayısı $3^3 = 27$ olmaktadır. Taguchi tarafından gerçekleştirilen 9 denemeli L_9 ortogonal dizisi bu deney için de seçilmiştir. Yapılacak 9 deney ile istenilen analizler yapılabilmektedir ve $27-9=18$ deney yapmak için geçen süre ve maliyetten tasarruf edilmiştir.. Deney tasarımı için yine Tablo 2'te verilen modifiye L_9 ortogonal dizini kullanılmıştır.

Reküparatörün ısı verimliliğinin hesaplanması için belirlenen sistem parametrelerinin sütunlara yerleşimi sırasıyla Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Reküparatör sistemi deney tasarımı

Deney No	A	B	C
1	30	60	60
2	30	80	80
3	30	100	100
4	40	60	80
5	40	80	100
6	40	100	60
7	50	60	100
8	50	80	60
9	50	100	80

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Isı Tekerinin Isıl Verimlilik Sonuçları

Isı tekeri sistemi için Taguchi optimizasyon metodu ile belirlemiş olan deney tasarımı neticesinde gerçekleştirilen deneylerin ölçüm sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda bulunan T ve H ölçümleri sırasıyla, Şekil 1'de verilen noktalardaki kuru termometre sıcaklıklarını ve bağıl nemleri göstermektedir. u_t taze hava hızını ve u_e egzoz hava hızını vermektedir.

Tablo 6. Isı tekeri sistemi ölçüm sonuçları

Deney no	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Devir sayısı (%)	60	60	60	80	80	80	100	100	100
Fan1 Hızı (%)	60	80	100	60	80	100	60	80	100
Fan2 Hızı (%)	60	80	100	80	100	60	100	60	80
T ₂ (°C)	41	39,5	40,1	39,9	39,3	39,0	39,1	39,1	39,2
H ₂ (%)	15,2	12,9	15,6	11,6	12,8	13,0	12,1	11,9	13,3
T ₃ (°C)	33,3	28,8	30,9	26,5	27,6	32,0	26,0	31,1	30,1
H ₃ (%)	23,1	23,6	25,9	24,1	24,5	19,7	24,5	19,5	22,1
T ₁₀ (°C)	31,2	26,0	27,7	25,2	25,2	25,8	25,2	26,0	26,0
H ₁₀ (%)	23,6	26,9	30,1	25,4	27,4	26,7	25,0	24,5	26,9
T ₁₁ (°C)	40,9	34,4	37,4	34,8	34,7	35,5	33,1	35,7	37,0
H ₁₁ (%)	15,4	17,3	18,3	15,6	16,8	16,2	16,8	14,9	15,4
u _t (m/s)	0,38	0,61	0,68	0,64	0,83	0,29	0,80	0,30	0,56
u _c (m/s)	0,57	0,75	0,88	0,58	0,75	1,00	0,58	0,81	0,90

Taguchi optimizasyon metodu ile oluşturan deney tasarımı neticesinde, belirlenen parametreler ve seviyelerine göre deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda psikrometrik diyagram kullanılarak entalpi ve özgül hacim (v_{gt} taze havanın özgül hacmini ve v_{ge} egzoz havasının özgül hacmini göstermektedir) değerleri okunmuştur. Değerler okunduktan sonra eşitlikler kullanılarak ısı yük hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Psikrometrik diyagramdan okunan değerler ve yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Isı tekeri sistemi hesaplama sonuçları

Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h ₂ (kJ/kg)	61,0	53,0	59,0	53,8	53,0	54,0	52,0	53,0	54,3
h ₃ (kJ/kg)	52,0	42,0	43,0	41,5	37,0	47,0	39,0	45,1	46,0
h ₁₀ (kJ/kg)	48,7	39,0	49,0	39,0	39,0	40,0	39,0	39,8	40,0
h ₁₁ (kJ/kg)	58,0	49,0	56,0	49,0	49,0	50,0	47,2	49,0	52,0
v _{gt} (m ³ /kg)	0,901	0,892	0,897	0,893	0,891	0,892	0,891	0,891	0,892
v _{ge} (m ³ /kg)	0,899	0,879	0,889	0,879	0,879	0,882	0,897	0,882	0,887
Q ₁ (kJ/s)	0,252	0,338	0,688	0,360	0,592	0,343	0,367	0,316	0,365
Q ₂ (kJ/s)	0,177	0,296	0,238	0,32	0,41	0,14	0,320	0,138	0,324
η (%)	70	87	34	90	69	40	87	43	90

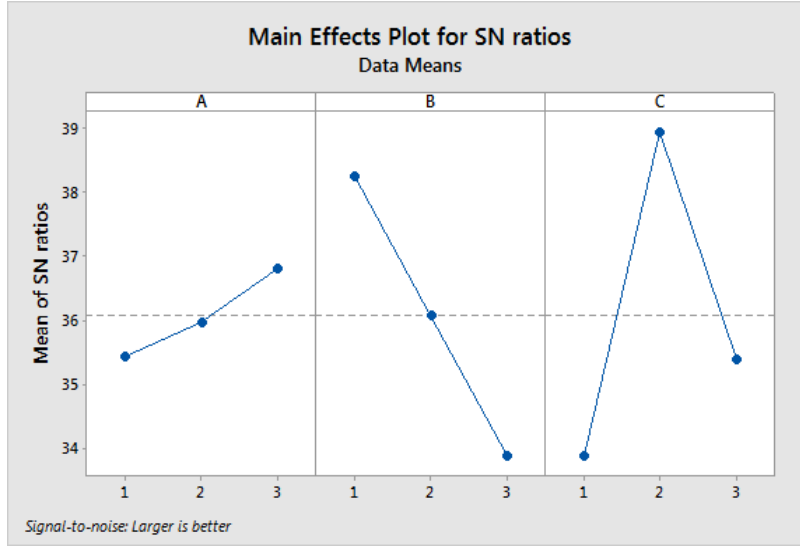
Tüm parametrelerin, ısı tekeri ısı verimliliği üzerindeki etkisinin araştırılması için Taguchi tarafından belirlenen Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanarak, ANOVA analizi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler ile hesaplanan ısı verimlilik değerleri ve bunların ‘en büyük-en iyi’ yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranları Tablo 8’de verilmiştir. En-büyük-en-iyi yaklaşımıyla S/N oranının hesaplanması Denklem (4.1) ile gerçekleştirilmiştir (Karanfil, 2020).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.1)$$

Tablo 8. Isı tekeri sisteminin S/N oranları

	A	B	C	Verim (%)	S/N
1	60	60	60	70	36,90
2	60	80	80	87	38,79
3	60	100	100	34	30,63
4	80	60	80	90	39,08
5	80	80	100	69	36,78
6	80	100	60	40	32,04
7	100	60	100	87	38,79
8	100	80	60	43	32,67
9	100	100	80	90	38,99

Taguchi analizi ile her bir parametre için S/N oranları hesaplanıp, her bir parametrenin ısı tekeri ısı verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesi için oluşturulan S/N grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Elde edilen grafiklerden yola çıkarak optimum koşullar; ısı tekeri için A3B1C2 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak doğrulama deneyinin ısı tekeri için % 100 ısı tekeri devir hızı, % 60 Fan 1 hızı ve % 80 Fan 2 hızı şartlarında gerçekleştirileceği belirlenmiştir.



Şekil 2. Isı tekeri S/N oranı grafikleri

Belirlenen parametrelerin ve seviyelerinin ısı tekeri sisteminin ısı verimliliği üzerindeki etkisinin araştırılması için S/N oranı tablosu ve ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar sırasıyla Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 9. Isı tekeri verimliliğinin S/N oranları

Seviye	A	B	C
1	35,44	38,26	33,87
2	35,97	36,08	38,95
3	36,82	33,89	35,40
Delta	1,38	4,37	5,08
Kademe	3	2	1

Tablo 10. Isı tekeri verimliliğinin ANOVA analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-değeri
A	2	138,7	69,33	0,20
B	2	1184,0	592,00	1,74
C	2	2212,7	1106,33	3,25
Hata	2	680,7	340,33	
Toplam	8	4216,0		

S/N oranları ve ANOVA analizi sonuçlarına göre ısı tekeri verimliliğinde en etkili faktör Fan 2 hızı, yani taze hava hızıdır. Bunu sırayla Fan 1 hızı ve ısı tekeri devir hızı takip etmektedir.

Taguchi analizi sonucunda optimum koşullar; A3B1C2 olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneyinin verileri ve psikrometrik diyagramdan okunan değerleri ile hesaplanan ısı yükleri Tablo 11 ve 12'de sırasıyla verilmiştir.

Tablo 11. Isı tekeri doğrulama deneyi ölçüm sonuçları

Doğrulama Deneyi	
T ₂ (°C)	40,6
H ₂ (%)	14,6
T ₃ (°C)	26,7
H ₃ (%)	32,0
T ₁₀ (°C)	24,8
H ₁₀ (%)	35,1
T ₁₁ (°C)	37,4
H ₁₁ (%)	18,1
u _t (m/s)	0,57
u _e (m/s)	0,59

Tablo 12. Isı tekeri doğrulama deneyi hesaplama sonuçları

Doğrulama Deneyi	
h_2 (kJ/kg)	59,0
h_3 (kJ/kg)	47,0
h_{10} (kJ/kg)	44,0
h_{11} (kJ/kg)	56,0
v_{gt} (m ³ /kg)	0,899
v_{ge} (m ³ /kg)	0,899
Q_1 (kJ/s)	0,348
Q_2 (kJ/s)	0,336
η (%)	97

Optimum koşullar altında gerçekleştirilen deneyde ısı verim % 97 olarak bulunmuş ve bu değer elde edilen en yüksek verim olarak kaydedilmiştir (Ener Rusen vd., 2017a). Antonellis ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada duyulur verimliliği maksimum, basınç düşüşünü ise minimum yapmak için ısı tekerlerinin ayrıntılı bir optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon çalışmasını, ısı tekeri uzunluğu, kanal tabanı, yükseklik ve kalınlık gibi ana tasarım parametrelerinin değişimi ile farklı çalışma koşulları için, yani hava yüzeyi hızı ve devir sayısı ile gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda maksimum ısı tekeri duyulur verimini % 79 olarak bulmuşlar ve optimizasyon çalışması ile % 83 civarlarına çıkarmışlardır. Wallin ve Claesson (2014) yaptıkları çalışmada ısı tekerinin kullanıldığı bir hava kontrol ünitesinde ısı pompası kullanarak ısı geri kazanımını arttırmayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışmada ısı tekerinin ısı verimi % 63 olarak bulunurken, toplam ısı verimlilik % 87 olarak hesaplanmıştır. Isı pompası, kompresör ve ısı tekerinin baz alındığı tüm sistemin ısı verimi ise % 97 olarak belirlenmiştir. Çalışmalarımızda kullanılan sistemin daha küçük kapasiteli olması ve kayıplarının minimuma indirgenmiş olması sebebiyle daha yüksek verimliliğe sahip olması mantıklı bir sonuç olmakla birlikte literatürle uyumluluk da göstermektedir.

3.2. Reküparatörün Isıl Verimlilik Sonuçları

Reküparatör sistemi için Taguchi optimizasyon metodu ile belirlemiş olan deney tasarımı neticesinde gerçekleştirilen deneylerin ölçüm sonuçları Tablo 13'te verilmiştir. Tablodaki T ve H sırasıyla, Şekil 1'de verilen noktalardaki kuru termometre sıcaklıklarını ve bağıl nemleri göstermektedir. u_t taze hava hızını ve u_e egzoz hava hızını vermektedir.

Tablo 13. Reküparatör sistemi ölçüm sonuçları

Deney no	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	30	30	30	40	40	40	50	50	50
Fan1 Hızı (%)	60	80	100	60	80	100	60	80	100
Fan2 Hızı (%)	60	80	100	80	100	60	100	60	80
T ₅ (°C)	30,6	30,6	30,6	38,8	39,9	40,6	49,3	49,1	48,0
H ₅ (%)	20,8	21	21,6	11,5	11,1	10,9	9,4	9,4	9,8
T ₆ (°C)	28,2	28,6	28,6	30,3	32,5	36,5	34,7	42,3	41,5
H ₆ (%)	23,5	23,1	23,6	17,6	15,8	13,0	18,9	12,7	13,2
T ₇ (°C)	26,5	27,0	27,2	25,2	26,2	26,5	27,1	28,3	29,1
H ₇ (%)	25,9	25,7	26,0	23,6	22,7	22,5	27,5	26,9	25,3
T ₈ (°C)	28,9	28,9	29,0	32,1	33,3	36,5	37,6	42,8	41,0
H ₈ (%)	22,5	23,0	23,5	16,1	15,4	13,2	15,7	12,7	13,5
u_t (m/s)	0,31	0,54	0,64	0,54	0,70	0,28	0,72	0,26	0,54
u_e (m/s)	0,53	0,77	0,82	0,67	0,96	1,24	0,68	1,09	1,13

Taguchi optimizasyon metodu ile oluşturan deney tasarımı neticesinde, belirlenen parametreler ve seviyelerine göre deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda psikrometrik diyagram kullanılarak entalpi ve özgül hacim değerleri okunmuştur. Değerler okunduktan sonra eşitlikler kullanılarak ısı yük hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Psikrometrik diyagramdan okunan değerler ve yapılan hesaplamaların sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Reküparatör sistemi hesaplama sonuçları

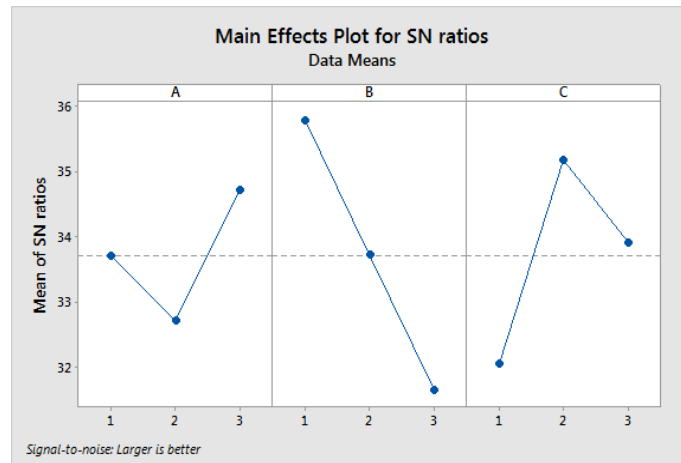
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h_5 (kJ/kg)	45,8	46,0	46,5	53,0	54,0	56,0	69,0	67,5	67,0
h_6 (kJ/kg)	42,5	43,0	43,5	43,0	45,0	48,0	51,0	60,0	58,0
h_7 (kJ/kg)	40,0	42,0	43,0	37,0	39,0	41,0	44,5	45,0	46,5
h_8 (kJ/kg)	43,5	44,0	44,5	45,0	46,5	49,0	54,0	59,0	58,0
v_{gt} (m ³ /kg)	0,863	0,862	0,863	0,871	0,874	0,883	0,888	0,902	0,898
v_{ge} (m ³ /kg)	0,866	0,868	0,869	0,890	0,894	0,895	0,922	0,924	0,918
\dot{Q}_1 (kJ/s)	0,089	0,118	0,125	0,333	0,428	0,490	0,587	0,391	0,490
\dot{Q}_2 (kJ/s)	0,055	0,055	0,049	0,219	0,232	0,112	0,341	0,179	0,306
η (%)	62	47	39	65	54	23	58	45	62

Tüm parametrelerin, reküparatörün ısı verimliliği üzerindeki etkisinin araştırılması için Taguchi tarafından belirlenen Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanarak, ANOVA analizi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler ile hesaplanan ısı verimlilik değerleri ve bunların ‘en büyük-en iyi’ yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranları Tablo 15’te verilmiştir. En-büyük-en-iyi yaklaşımıyla S/N oranının hesaplanması Eşitlik 4.1 ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 15. Reküparatör sisteminin S/N oranları

	A	B	C	Verim (%)	S/N
1	30	60	60	62	35,84
2	30	80	80	47	33,44
3	30	100	100	39	31,82
4	40	60	80	65	36,25
5	40	80	100	54	34,64
6	40	100	60	23	27,23
7	50	60	100	58	35,26
8	50	80	60	45	33,06
9	50	100	80	62	35,84

Taguchi analizi ile her bir parametre için S/N oranları hesaplanıp, her bir parametrenin reküparatör ısı verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesi için oluşturulan S/N grafiği Şekil 3’te verilmiştir. Elde edilen grafiklerden yola çıkarak optimum koşullar; reküparatör için A3B1C2 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak doğrulama deneyinin reküparatör için 50 °C sıcaklık, % 60 Fan 1 hızı ve % 80 Fan 2 hızı şartlarında gerçekleştirileceği belirlenmiştir.



Şekil 3. Reküparatör S/N oranı grafikleri

Belirlenen parametrelerin ve seviyelerinin reküparatör sisteminin ısı verimliliği üzerindeki etkisinin araştırılması için S/N oranı tablosu ve ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar sırasıyla Tablo 16 ve 17’de verilmiştir.

Tablo 16. Reküparatör verimliliğinin S/N oranları

Seviye	A	B	C
1	33,70	35,79	32,05
2	32,71	33,72	35,18
3	34,73	31,63	33,91
Delta	2,01	4,16	3,13
Kademe	3	1	2

Tablo 17. Reküparatör verimliliğinin ANOVA analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-değeri
A	2	94,89	47,44	0,23
B	2	636,22	318,11	1,51
C	2	322,89	161,44	0,77
Hata	2	420,22	210,11	
Toplam	8	1474,22		

S/N oranları ve ANOVA analizi sonuçlarına göre reküparatör verimliliğinde en etkili faktör Fan 1 hızı, yani egzoz havası hızıdır. Bunu sırayla Fan 2 hızı ve sıcaklık takip etmektedir.

Taguchi analizi sonucunda optimum koşullar; A3B1C2 olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneyinin verileri ve psikrometrik diyagramdan okunan değerleri ile hesaplanan ısı yükleri Tablo 18 ve 19'da sırasıyla verilmiştir.

Tablo 18. Reküparatör doğrulama deneyi ölçüm sonuçları

Doğrulama Deneyi	
T ₅ (°C)	50,5
H ₅ (%)	6,3
T ₆ (°C)	37,4
H ₆ (%)	11,7
T ₇ (°C)	27,2
H ₇ (%)	20,2
T ₈ (°C)	39,7
H ₈ (%)	10,6
u _t (m/s)	0,36
u _e (m/s)	0,71

Tablo 19. Reküparatör doğrulama deneyi hesaplama sonuçları

Doğrulama Deneyi	
h ₅ (kj/kg)	67
h ₆ (kj/kg)	52
h ₇ (kj/kg)	40
h ₈ (kj/kg)	53
v _{gt} (m ³ /kg)	0,888
v _{ge} (m ³ /kg)	0,921
Q ₁ (kj/s)	0,511
Q ₂ (kj/s)	0,376
η (%)	73

Optimum koşullar altında gerçekleştirilen deneyde ısı verim % 73 olarak bulunmuş ve bu değer elde edilen en yüksek verim olarak kaydedilmiştir (Ener Rusen vd., 2017b). İlten ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada ısı pompası destekli ısı geri kazanım cihazının deneysel çalışmalarını incelemiş ve oluşan hataların sistem üzerine etkisini araştırmışlardır. Kış koşullarında (ısıtma durumunda) reküparatörün etkinliğini % 70 civarında bulmuşlardır.

4. Sonuç

Atık ısı geri kazanımı için kullanılan ısı tekeri ve reküparatörün ısı verimlerinin üzerindeki etkin parametrelerin belirlenmesi için yapılan bu çalışmada, atık ısı geri kazanım şartları Taguchi metodu ile optimize edilerek, deneyler L₉ ortogonal dizinde gerçekleştirilmiştir. Yapılması gereken deney sayısı Taguchi metodu ile 9 olarak belirlenmiş ve optimum sonuçlar elde edilecek şekilde minimum deney sayısı ile analizler yapılmıştır. Analizler için geleneksel yöntemlere göre 18 deney daha az yapılarak zaman ve maliyet tasarrufu yapılmıştır. Isıl verimlilik hesaplamalarının yapılması için deneyler sonucunda elde edilen değerler kullanılarak psikrometrik

diyagramdan entalpi ve özgül hacim değerleri okunmuştur. Denklemler kullanılarak hesaplanan ısı verimleri arasında, optimum atık ısı geri kazanım koşullarının belirlenmesi için Taguchi S/N oranı ve ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Optimum koşullar ısı tekeri için A3B1C2 (% 100 ısı tekeri devir hızı, % 60 Fan 1 hızı ve % 80 Fan 2 hızı) ve reküperatör için A3B1C2 (50 °C sıcaklık, % 60 Fan 1 hızı ve % 80 Fan 2 hızı) olarak bulunmuştur. Isı tekeri için en etkin parametre Fan 2 hızı yani taze hava hızı olarak bulunurken, reküperatör için en etkin parametere Fan 1 hızı yani egzoz havası hızıdır. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen en yüksek verim değerleri ısı tekeri ve reküperatör sistemleri için sırasıyla % 97 ve % 73 olarak bulunmuştur. Bu değerler, yapılan tüm deneyler içerisinde en yüksek verim değerleri olarak kaydedilmiştir. Bu durum yapılan analizlerin doğruluğunu kanıtlamakta ve ileride yapılacak çalışmalara ışık tutmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirildiği sistemin alınmasına TR52/15/YNRKG1/0013 proje numarası ile finansal destek sağlayan Mevlana Kalkınma Ajansı'na (MEVKA) ve Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Antonellis, S., Intini, M., Joppolo, C.M., Leone, C., 2014. "Design optimization of heat wheels for energy recovery in HVAC systems", *Energies*, 7, 7348-7367.
- Brueckner, S., Miro, L., Cabeza, L.F., Pehnt, M., Laevemann, E., 2014. "Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 164-171.
- Çengel, Y.A., 2011. "Isı ve Kütle Transferi-Pratik Bir Yaklaşım", Üçüncü Baskı, Güven Bilimsel, İzmir Güven Kitabevi, İzmir.
- Çomaklı, K. ve Terhan, M., 2011. "Sıcak su üretimi için baca gazı atık enerjinin kullanımı", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 124, 43-51.
- Editorial, 2018. "Editorial: Industrial waste heat recovery", *Energy*, 160, 1-2.
- Ener Rusen, S. ve Koç, M. 2019. "Enerji Tüketim ve CO₂ Salınım Değerlerinin Analizi; Bir Gıda Fabrikası Örneği", *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (4), 1478-1488.
- Ener Rusen, S., 2019. "Elektrik Motorlarının Verimlilik ve CO₂ Emisyon Analizi; Bir Gıda Fabrikası Örneği", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 564-569.
- Ener Rusen, S., Topcu, M.A., Celtek, S.A., Karanfil, G. ve Rusen, A. 2018. "Investigation of energy saving potentials of a food factory by energy audit", *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 7 (1), 848-860.
- ^aEner Rusen, S., Karanfil Celep, G., Poyraz, Ş. N., 2017. "Optimization of system parameters of heat wheel to enhance the thermal efficiency using Taguchi optimization method", *International Conference on Energy and Thermal Engineering: İstanbul 2017*, 281.
- ^bEner Rusen, S., Karanfil Celep, G., Can, M., 2017. "Influence of Inlet Temperature and Flow Rate of Air on The Thermal Yield of Recuperator", *International Conference on Energy and Thermal Engineering: İstanbul 2017*, 279.
- <http://kmu.edu.tr/akademikenerji>
- İlten, N., Muslu, M., Caner, İ., 2019. "Isı pompası destekli ısı geri kazanım cihazında kullanılan parametrelerin hata analizleri", *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (1), 53-62.
- Jouhara, H., Khordehghah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S.A., 2018. "Waste heat recovery technologies and applications", *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268-289.
- Karanfil, G., Ener Rusen, S., Topcu, M.A., Çeltek, S.A. ve Rusen, A., 2019. "Application of Recuperator for Waste Heat Recovery from Exhaust Flue Gas in Hot Water Boiler in a Central Heating Plant", *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 20(1), 112-120.
- Karanfil, G., 2020. "Importance and applications of DOE/optimization methods in PEM fuel cells: A review", *International Journal of Energy Research*, 44, 4-25.
- Manikantha, J.T., Krishna, A.R., Phanisankar, B.S.S., 2017. "Effect on Performance and Emission Characteristics of C.I Engine by Preheating of Intake Air Using Heat Wheel", *International Journal of Thermal Technologies*, 7(4), 211-222.
- Oğulata, R.T., 2004. "Utilization of waste-heat recovery in textile drying", *Applied Energy*, 79, 41-49.
- Shahsavari, A. ve Khanmohammadi, S., 2019. "Energy and economic evaluation and multicriteria optimization of different arrangements of integrated photovoltaic thermal and heat recovery wheel system", *International Journal of Energy Research*, 1-18.
- Uysal, H. L., 2019. "Endüstriyel boyahane tesislerinde baca gazı atık ısısının geri kazanım analizi ve bir uygulama", *Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir Üniversitesi.*
- Wallin, J. and Claesson, J., 2014. "Improving heat recovery using retrofitted heat pump in air handling unit with energy wheel", *Applied Thermal Engineering*, 62, 823-829.
- Varga, Z. ve Palotai, B., 2017. "Comparison of low temperature waste heat recovery methods", *Energy*, 137, 1286-1292.