

ISI DEĞİŞTİRİCİ ETKENLİĞİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN TAGUCHİ METODUYLA OPTİMİZASYONU

Ceyda KOCABAŞ*, Ahmet Fevzi SAVAŞ**

*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Üretimde Kalite Kontrol Programı
11230 Gölümbe, Bilecik, ceyda.pak@bilecik.edu.tr

** Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi
11230 Gölümbe, Bilecik, ceyda.pak@bilecik.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, ısı değiştirici kullanılan bir atık ısı geri kazanım sisteminde ısı transfer performansını etkileyen faktörler ve optimum çalışma koşulları araştırılmıştır. Havadan havaya ısı geçişine imkân veren bir ısı geri kazanım cihazı imal edilerek içerisinde polimer plakalı ısı değiştirici yerleştirilmiştir. Optimum tasarım parametreleri ve seviyelerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Isıl etkenlik, performans parametresi olarak seçilmiştir. Değişen hava akış hızı, taze ve egzoz havası giriş sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Isıl performans üzerinde etkili olan bu üç faktörün her biri için üçer seviye belirlenerek Taguchi'nin $L_9(3^3)$ standart ortogonal dizisi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda optimum parametre kombinasyonları ortaya konmuş, ANOVA analizi ile parametrelerin performans parametresi üzerindeki etki dereceleri belirtilmiştir. Sonuçlar; hava akış hızının, üç faktör içerisinde termal etkenliği etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermektedir. Son olarak doğrulama testi gerçekleştirilmiş ve önerilen optimum parametre kombinasyonunun en yüksek etkenlik değerini sağladığı kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı geri kazanımı, Plakalı ısı değiştirici, Optimizasyon, ANOVA, Taguchi metodu.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS THAT EFFECT HEAT EXCHANGER EFFECTIVENESS BY THE TAGUCHI METHOD

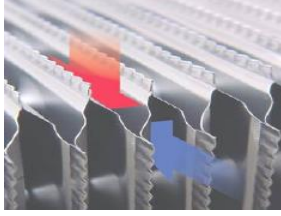
Abstract: In this study, the factors affecting the heat transfer performance in a waste heat recovery system using a heat exchanger and optimum working conditions were investigated. A heat recovery device has been designed which allows heat transfer from air to air and a polymer plate heat exchanger was installed in it. Taguchi experimental design method was used to determine optimum design parameters and levels. Thermal effectiveness was chosen as the performance parameter. Experiments were performed at varying air flow rate, exhaust and fresh air inlet temperatures. Three levels of each of the three factors affecting thermal performance were determined and Taguchi's $L_9(3^3)$ standard orthogonal sequence was used. As a result of the study, optimum parameter combinations were determined by the help of ANOVA, the effect levels of the parameters on the performance parameter were specified. Results; shows that the air flow rate is the most important factor affecting thermal effectiveness among the three factors. Finally, the verification test had been carried out and the proposed optimum parameter combination had been proven to provide the highest effectiveness value.

Keywords: Heat recovery, Plate heat exchanger, Optimization, ANOVA, Taguchi method.

GİRİŞ

Enerji, yirminci yüzyılın son çeyreğinde, ülkelerin sosyal ve ekonomik yaşantısında önemli bir faktör haline gelmiştir. Enerji teknolojisi alanındaki her yeni gelişme ve adım, hayatı her geçen gün daha geniş ölçüde etkilemekte ve bizleri çok daha fazla enerji kullanımına doğru itmektedir. Dünya ülkelerinin enerji politikası sürdürülebilirlik üzerinedir. Sürdürülebilir enerji çalışmaları doğrultusunda atılabilecek adımlardan biri de kullanılmış ve atmosfere verilecek olan ısının tekrar geri kazanılmasıdır.

Özellikle yüksek miktarda enerji kullanan endüstriyel sistemler büyük ısı geri kazanım potansiyeline sahiptirler. Isının geri kazanılmasında plaka tipi değiştiriciler yaygınlıkla kullanılmaktadır. Savaş ve Madan, bir seramik fabrikasında kurutma ve yanma prosesleri sonucu açığa çıkan atık ısının geri kazanımını ısı değiştiriciler kullanılarak sağlamışlardır (Savaş ve Madan, 2015). Plakaların bir yüzünden taze hava diğerinden egzoz havası geçirilerek taze ve egzoz havasının birbirine karışması önlenmiş olur. Şekil 1'de hava akış yönleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Plakalar arası sıcak ve soğuk hava akış yönleri (<http://www.immak.eu/Admin/photos/belgelerkucuk/634671386075318750.pdf>).

Deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu kullanılarak hangi girdi faktörünün deney sonucunu ne ölçüde etkilediği tespit edebilir ve en iyi çıktı eldesi için bu faktörlerin hangi parametre değerlerinin seçilmesi gerektiğine kolaylıkla karar verebilir. Bu yöntem, daha az sayıda deney yaparak daha kısa sürede ve daha az maliyetle istenilen sonuca ulaştırdığından günümüzde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Literatür incelendiğinde Taguchi yöntemiyle gerçekleştirilen birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Aşağıda ısı değiştiricilerin ısı performansının değerlendirilmesinde Taguchi yönteminin uygulanmasına yönelik literatür örneklerine yer verilmiştir. Jeom-Yul Yun ve Kwan-Soo Lee, Taguchi metodunu kullanarak bir ısı eşanjöründeki tasarım parametrelerinin optimum değerlerini belirleyerek sistematik olarak bu parametrelerin ısı transferi ve basınç düşümünü özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir (Jeom-Yul ve Kwan-Soo, 2000). Şahin ve diğ. dikdörtgen kanatlı bir ısı eşanjöründeki çeşitli tasarım parametrelerinin ısı transferi üzerindeki etkilerini Taguchi metodu kullanarak araştırmışlardır (Şahin vd, 2005). Yakut yaptığı çalışmada, Taguchi yöntemini kullanarak altıgen kanatlı ısı değiştiriciler için çeşitli tasarım parametrelerinin ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini sistematik olarak analiz etmiştir. Performans istatistiği olarak Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünü kullanmıştır (Yakut vd, 2006). Qi ve diğ. oluklu kanatçıklara sahip bir ısı değiştiricisinin ısı transferini ve basınç düşümünü etkileyen beş deneysel faktör belirlemişler ve tasarım parametrelerini Taguchi metodu kullanarak optimize etmişlerdir (Qi vd, 2007). Buna benzer çeşitli çalışmalardan elde edilen sonuçlar Taguchi yaklaşımının, ısı eşanjöründe optimum tasarım parametrelerini belirlemek için başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir (Şahin ve Demir, 2008; Turgut vd, 2012; Hsieh and Jang, 2012; Kotcioğlu vd, 2013; Junqi vd, 2013; Hsieh vd, 2013; Du vd, 2015; Bilen vd, 2001) .

Çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Osmaneli Meslek Yüksek Okulu iklimlendirme ve soğutma laboratuvarında yapılmıştır. Atık ısıdan geri kazanım elde etmemizi sağlayacak ısı geri kazanım cihazı tasarlanarak deney düzeneği hazırlanmıştır. Isı transferini gerçekleştirmek için çapraz akışlı plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır. Isıl performans üzerinde etkili olduğu düşünülen hava akış hızı, taze hava ve egzoz havası giriş sıcaklıkları için farklı değerler kullanılarak değiştiricinin ısı performansındaki değişimler saptanmıştır. Daha az deney yaparak etkin sonuçlara

ulaşmak amacıyla Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede hem deneye harcadığımız zamandan tasarruf sağlanmış hem de hangi parametrenin ısı geri kazanım üzerinde daha etkili olduğu bilgilerine ulaşılmıştır. Çalışma sonunda bu çalışma için optimum proses parametre değerleri ortaya konmuştur.

DENEY KURULUMU VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

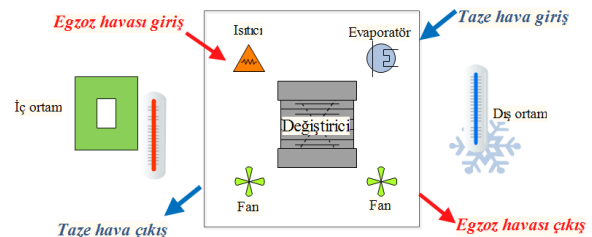
Özellikle kış şartlarında dışarıdaki temiz hava iç ortamdaki kirli hava göre oldukça soğuk olmaktadır. İç mahalleri havalandırmak istediğimizde içeriye temiz hava alırken ortamı da soğutmuş olmaktadır. Soğuyan iç mahali normal ortam koşullarına getirmek için daha fazla ısıyı tekrar tekrar transfer etmek zorunda kalırız ve transfer edilmesi gereken ısı miktarı iç ve dış ortam sıcaklık farkı arttıkça artacaktır. Burada iç ortama verilmesi gereken ısıdan kazanç elde etmek amacıyla dışarıya atılan kirli havanın sahip olduğu enerjinin bir kısmının içeriye verilecek olan temiz havaya geçişi sağlanabilir. Böylece atık ısıdan geri kazanım gerçekleştirmiş oluruz.

Havadan havaya doğru ısı transferinin gerçekleştirileceği sistemde kirli iç ortam havasının taze dış ortam havasına karışmasının önlemek amacıyla çapraz akışlı plakalı ısı değiştirici kullanımı tercih edilmiştir. Sistemde kullanılan plakanın boyutları 20*20*30 cm olup Şekil 2’de gösterilmiştir. Çalışmada polimer malzemeden üretilmiş ısı değiştirici kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneide kullandığımız polimer ısı değiştirici (Kocabaş, 2014).

Deney düzeneğinin ana bileşenlerini ısı değiştirici, ısıtıcı, evaporatör ve fanlar oluşturmaktadır. Test bölümünün dışı, ısı kaybına karşı izolasyon sağlamak için cam yünü ile kaplanmıştır. Plakalı ısı değiştirici düzeneğin ortasına yerleştirilmiştir. Düzeneğin şematik resmi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Deney Düzeneğinin şematik olarak gösterimi (Kocabaş, 2014; Kocabaş ve Savaş, 2015).

Testler, değişen hava akış hızı, taze ve egzoz havası giriş sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Biri egzoz havası emmek, diğeri temiz hava üflemek için iki adet 2500/2700 RPM fan sisteme yerleştirilmiştir. Fanların hızı tek fazlı bir hız kontrol cihazı vasıtasıyla ayarlanmıştır. Sisteme giren hava akımının hızını belirlemek için bir anemometre temin edilmiştir. Sıcak hava eldesi için lamel dirençli ısıtıcılar ve soğuk hava elde etmek için ise kompresörlü soğutma grubu sisteme eklenmiştir. Dijital termostatlar kullanılarak, taze ve egzoz havası giriş sıcaklıkları farklı sıcaklık değerlerine ayarlanmıştır. Düzenekte kullandığımız cihazlar ve doğrulukları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının ölçüm aralıkları ve doğrulukları (Kocabaş ve Savaş, 2015).

Ölçüm Aleti	Marka	Ölçüm Aralığı	Doğruluk
Anemometre	Prova AVM-07	0-45 m/s	± 3%
Termostat	Emko ESM-3710	(-40) (+85) °C	± 1%
Termostat	Evko EVKB 21	(-50) (+130)°C	± 1%

Sistemin çalışma prensibi şu şekildedir: Plakanın bir tarafından sıcak egzoz havası geçerken karşı tarafından ise soğuk taze hava fanlar vasıtasıyla geçirilir. Sıcak ve soğuk hava birbirine temas etmeden plakaların arasından geçerek ısı transferi gerçekleşir. Sistem çalıştırıldığında iç ortama dışarı hava sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa sahip taze hava verilirken dış ortama ise sıcaklığı biraz düşmüş olan egzoz havası bırakılmış olur. Atılan kirli havanın ısı yükü, ısı değiştirici vasıtasıyla emilen taze havaya geçirilir. Atılan kirli havanın ısı, dışarıdan emilen taze havaya transfer olur. Bu işlem ek bir enerji harcamadan gerçekleştirilir (Kocabaş ve Savaş, 2015). Deneyde kullanılan ısı geri kazanım cihazı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Deneyde kullandığımız ısı geri kazanım cihazı (Kocabaş, 2014; Kocabaş ve Savaş, 2015).

MATERYAL VE METOD

Isı Transferi

Bir ısı değiştiricisinin ısı hesabını yapabilmek için biri ortalama logaritmik sıcaklık farkı (LMTD) yöntemi, diğeri etkenlik aktarım birim sayısı (ϵ -NTU) yaklaşımı olmak üzere iki yöntem geliştirilmiştir. Eğer ısı değiştirici tasarımı yapılacaksa LMTD yöntemi çok daha kullanışlıdır. Ancak ısı değiştiricisinin türü, boyutları, akışkanların debileri ve giriş sıcaklıkları belirli olup çıkış sıcaklıkları ile ısı geçiş performansı bulunması amaçlandığında ise ϵ -NTU yöntemi tercih edilir. Ayrıca

bu yöntem, aynı ortamda kullanılacak değiştiriciler arasından en uygun alternatifin seçimine imkan sağlar (Genceli, 2005). Bu çalışmada ısı değiştirici belirli olup ısı transfer performansı araştırıldığı için ϵ -NTU kullanımı tercih edilmiştir. Hesaplamalarda gizli ısı transferi ve basınç düşümleri ihmal edilmiş, dış ortama herhangi bir ısı kaybı olmadığı varsayılmıştır.

Isı değiştirici etkenliği, bir ısı değiştiricisinde meydana gelen ısı transferinin, mümkün olabilecek maksimum ısı transferine oranı olarak tanımlanabilir ve ϵ ile gösterilir (Danışman, 2010).

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (1)$$

Transfer edilen ısı miktarı; sıcak akışkanın verdiği yada soğuk akışkanın aldığı ısılardan bulunabilir.

$$Q = C_1(T_{hi} - T_{ho}) \text{ ya da } Q = C_2(T_{co} - T_{ci}) \quad (2)$$

$$C_1 = \dot{m}_h c_{p,h} \text{ (Sıcak akışkanın ısı kapasitesi)} \quad (3)$$

$$C_2 = \dot{m}_c c_{p,c} \text{ (Soğuk akışkanın ısı kapasitesi)} \quad (4)$$

Q_{\max} değeri; mümkün olan maksimum ısı transfer miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer; C_1 ve C_2 ısı kapasite debilerinden küçük olan seçilerek soğuk akışkan ile sıcak akışkanın giriş sıcaklıkları arasındaki fark ile çarpılarak bulunabilir (Kocabaş, 2014; Kocabaş ve Savaş, 2015).

$$C_1 < C_2 \rightarrow Q_{\max} = C_1(T_{hi} - T_{ci}) \quad (5)$$

$$C_2 < C_1 \rightarrow Q_{\max} = C_2(T_{hi} - T_{ci}) \quad (6)$$

$$Q_{\max} = C_{\min}(T_{hi} - T_{ci}) \quad (7)$$

Bir ısı değiştiricisi için geçiş transfer sayısı NTU ısı değiştiricisinin büyüklüğünün bir göstergesi olup boyutsuz bir sayıdır. Şu şekilde tanımlanır;

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (8)$$

Etkenlik değeri, ısı transfer birim sayısı (NTU), $C^* = C_{\min}/C_{\max}$ ısı kapasite oranı değerleri ile akış karakteristiğine bağlı bir fonksiyon olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\epsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}, \text{ akış karakteristiği} \right) \quad (9)$$

İki akışkanın da karışmadığı çapraz akışlı ısı değiştiricisi için $0 < \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \leq 1$ ise Etkenlik:

$$\epsilon = 1 - \exp\left[\frac{\exp\left(\frac{C_{\min}}{C_{\max}}(NTU)^{0,78}\right) - 1}{\frac{C_{\min}}{C_{\max}}(NTU)^{-0,22}}\right] \quad (10)$$

Isı değiştiricisinin türü, boyutları ve akışkanların debileri bilindiğinden, NTU ve (C_{\min}/C_{\max}) oranı hesaplanıp ve Eş. (10)'da verilen formül kullanılarak, etkenlik değeri bulunur. Daha sonra aşağıda verilen Eş. (11) ve Eş. (12) kullanılarak her iki akışkanın çıkış sıcaklıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerle deneyden elde edilen değerler karşılaştırılmış ve sonuçların yaklaşık

aynı olduğu görülmüştür. Bu tanımlamalara göre ısı değiştiricisi etkenliği şu şekilde hesaplanır (Kocabaş ve Savaş, 2015) :

$$\varepsilon = \frac{C_1(T_{hi}-T_{ho})}{C_{min}(T_{hi}-T_{ci})} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{C_2(T_{co}-T_{ci})}{C_{min}(T_{hi}-T_{ci})} \quad (12)$$

DENEY TASARIMI VE TAGUCHI METODU

Bir prosesin çıktılarındaki değişiklikleri tespit etmek amacıyla girdi faktörlerinin bilinçli bir şekilde değiştirilmesiyle gerçekleştirilen deneylere tasarlanmış deney denmektedir. Tam faktöriyel ve kısmi faktöriyel deney tasarımı olmak üzere temelde ikiye ayrılır. Bir deneyi etkileyen tüm parametrelerin her seviyesiyle ilgili gerekli tüm deneylerin yapıldığı tasarım tam faktöriyel deney tasarımıdır. Ancak parametre sayısı ve seviyeleri yeterince düşük olduğunda kullanışlı olur. Örneğin 2 parametreye sahip ve her parametrenin 3 seviyesinin bulunduğu bir deneyde $3^2 = 9$ tane deney yapılması gerekir. Burada az sayıda yeterli olduğundan tam faktöriyel deney tasarımı rahatlıkla kullanılabilir. Fakat 8 parametre ve her parametre için 3 seviyeye sahip bir çalışmada $3^8=6561$ tane deneyi gerçekleştirmek çok uzun zaman alacağından ve değerlendirme yapması çok zor olacağından dolayı tam faktöriyel tasarımı kullanmak mümkün görünmemektedir. Kısmi faktöriyel tasarımda ise deneylerin sadece bir kısmı yapılmaktadır. Deney sayısını azaltma miktarı tamamen çalışmayı yapanın inisiyatifindedir. Ancak bu yöntemin gerçek sonuçları yansıtmama ve seçilen grubun farklılığına bağlı olarak sonuçların farklı çıkması gibi sakıncaları mevcuttur. Bu durumda bir kısmi faktöriyel deney tasarım yöntemi olan Taguchi yöntemi kullanımı tercih edilebilir.

Dr. Genichi Taguchi' nin 1941'de geliştirdiği teknikte yapılması gereken deney sayısı büyük oranda azaltılmıştır. Çok fazla deney gerektiren çalışmalarda can simidi görevi gördüğü için çok çeşitli alanlarda kullanım alanı bulmuştur. Taguchi; Matematikçi Hadamard'ın ortaya koyduğu ortogonal dizimleri kısmi deney tasarımına uyarlamıştır. Hangi deneyde hangi faktörlerin ve bunların hangi seviyelerinin kullanılacağını ortogonal dizimleri esas alarak belirlemiştir. Taguchi, uzun süren çalışmalar neticesinde deney planlarını standart hale getirmiştir. Ayrıca bu planlar kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarının tam faktöriyel deney yapıldığında ortaya çıkan sonuçlarla aynı olacağı kanaatine varmış ve haklı olduğunu bir çok uygulamada ispatlamıştır. Ayrıca daha gerçekleştirilmemiş olan deneylerin sonuçlarının maksimum ve minimum değer aralıklarının bu yöntemle tahmin edilebileceğini ifade etmiştir (Tan ve Zaimoğlu, 2004).

Taguchi'ye göre bir süreçten elde edilen performans kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerden etkilenmektedir. Parçanın boyutu, akışkanın sıcaklığı, malzemenin türü veya kullanılan malzeme miktarı gibi

değişkenler üzerinde kontrolümüz olan faktörlerdir. Taguchi metodunun da asıl üzerinde durduğu konu bu faktörlerin en uygun seviyelerinin tespit edilmesidir. Ortamın sıcaklığı ve basıncı, nem, gürültü, titreşim, toz, ürünün aşınması gibi kontrol altında tutulması çok zor yada çok maliyetli olan değişkenler ise kontrol edemediğimiz faktörlerdendir ve gürültü olarak adlandırılır (Taguchi and Wu, 1989). Taguchi, proses üzerinde değişkenlik yaratan ve kontrol edemediğimiz faktörlere karşı, kontrol edemediğimiz faktörlerin düzeylerini en uygun değerde seçerek, prostedeki değişkenliği azaltmaya çalışan bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca, bu sayede faktörlerin proses çıktısı üzerindeki etkilerini saptamak ve varyasyon meydana getiren faktörlere karşı önlemler almak, daha tasarım aşamasında mümkün olmaktadır.

Ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranı; Taguchi yaklaşımında kalite göstergelerinin ölçülüp değerlendirilmesi için temel bir istatistik ölçüt olarak geliştirilmiştir. Sinyal; sistemden alınan ve ölçülmesi amaçlanan gerçek değer, gürültü ise deney sonucu içindeki istenmeyen faktörlerin payını ifade eder (Özçelik ve Özbay, 2011). Performans göstergelerinin hedeflediğimiz değerden sapmasına neden olan tüm değişkenler gürültü kaynağı olarak adlandırılabilir. Bu durumda S/N oranındaki N ile gösterilen gürültü faktörü değeri ne kadar az olursa hedeflenen değere o oranda yaklaşılmış olur (Turgut ve Dikici, 2011). S/N oranı, değeri "Büyük olan değer en iyi", "Küçük olan değer en iyi" ve "Hedef değer en iyi" olmak üzere istenen kalite hedefine göre üç farklı şekilde seçilip hesaplanabilir. Hangisi seçilmiş olursa olsun amaç S/N oranını en büyük yapmaktır (Özçelik ve Özbay, 2011). Böylece, sinyali bir yandan artırırken, varyansı da diğer yandan azaltmış oluruz.

Bu çalışmada hedefimiz ısı değiştirici etkenliğini en büyük yapmaktır. Bu amaçla "En büyük değer en iyi" seçilecektir. Bunun için gerekli S/N bağıntısı şöyledir:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (13)$$

Verilen eşitlikte y_i ; Performans karakteristiğinin ölçüm değerini, n ise deney sayısını ifade etmektedir. Hesaplanan S/N değerlerinin istatistiklerini elde etmek, bu değerlerle ilgili yorum yapabilmek ve hangi deneysel faktörün deney sonucunu ne oranda etkilediğini saptamak için ANOVA analizi yapılabilir. Bu sayede elde edilen sonuçların güven seviyesi de ortaya konmuş olur (Özçelik ve Özbay, 2011).

DENEY SONUÇLARININ TAGUCHI YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Bu deneysel çalışmada, polimer malzemeden imal edilmiş ısı değiştiricisinin farklı parametre değerlerindeki ısı geri kazanım performansları karşılaştırılmıştır. Performans göstergesi olarak ısı etkenlik ε değeri seçilmiştir. Etkenlik üzerinde etkisi

olduğunu düşündüğümüz üç parametre belirlenmiştir. Bunlar: taze hava giriş sıcaklığı, hava akış hızı ve egzoz havası giriş sıcaklığıdır. Bu faktörler sırasıyla A, B ve C harfleri ile simgelenmiştir. Her bir faktör için üçer seviye belirlenmiş ve bunlar ait veriler Tablo2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Her bir ısı değiştiriciye ait faktörler ve seviyeleri.

	Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Taze hava giriş sıcaklığı	0 °C	5 °C	10 °C
B	Hava hızı	1,2 m/s	1,6 m/s	2 m/s
C	Egzoz havası giriş sıcaklığı	28°C	34°C	40°C

Faktör sayısı 3 ve her bir faktör için 3’er seviye olduğundan $3^3= 27$ adet deney yapmamız gerekecektir. Burada Taguchi’nin önerdiği ortogonal dizilimlerden bizim için uygun olan L_9 deney planını kullanmayı tercih ettik. Böylece gerçekleştirmemiz gereken deney sayısı 9’a inmiş oldu. Bu çalışmada kullandığımız L_9 (3 parametrelili ve 3 seviyeli) ortogonal dizisi Tablo 3 ’te verilmiştir. Tablodaki A, B ve C harfleri, seçtiğimiz faktörleri, her deney satırındaki 1, 2 ve 3 rakamları ise faktörlerin seviyelerini göstermektedir.

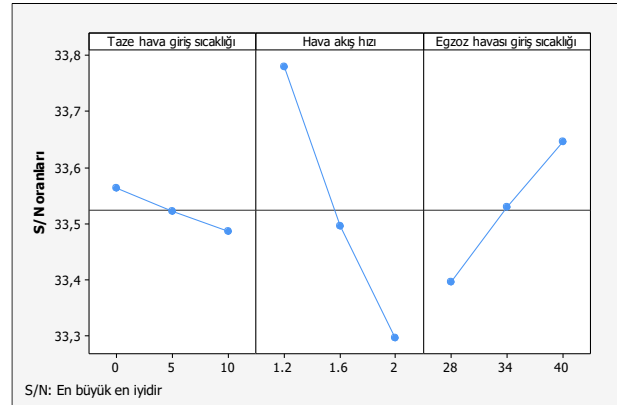
Tablo 3. Ortogonal Dizin $L_9(3^3)$.

Deney No	Faktörler ve Seviyeleri		
	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

L_9 deney planına göre, seçtiğimiz üç faktörün farklı düzeylerdeki kombinasyonları kullanılarak 9 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Diğer faktörler ise sabit tutulmuştur. Her deney iki kez tekrarlanarak elde edilen

ortalamalar değerlendirmeye alınmıştır. Sonuçların S/N oranları Tablo 4’te verilmiştir.

Analiz sonucunda Sinyal – Gürültü (S/N) oranının yüksek olması tercih edilir. Şekil 5’ten de görüldüğü gibi etkenlik değeri (S / N oranı), temiz hava giriş sıcaklığı ve hava akış hızı arttıkça düşmekte, egzoz hava giriş sıcaklığını arttıkça da artmaktadır. Bu konuda gerçekleştirilen önceki çalışmalar, bu yorumu destekler niteliktedir (Kocabaş ve Savaş, 2015; Mardiana ve Riffat, 2013; Kocabaş ve Savaş, 2018). Bu durumda taze hava giriş sıcaklığının birinci seviyesi olan 0 °C (A_1), hava hızının birinci seviyesi olan 1,2 m/s (B_1) ve egzoz havası giriş sıcaklığının üçüncü seviyesi olan 40 °C (C_3) yapılan çalışma için optimum tasarım parametreleri olarak seçilebilir ($A_1B_1C_3$).



Şekil 5. Faktörlerin ve bunların farklı seviyelerinin etkenlik değeri üzerindeki etkileri.

Daha sonra her bir faktörün her bir düzeydeki etkisinin ayrıştırılması amacıyla her biri için S/N oranlarının ortalaması ayrı ayrı alınır. Örneğin hava hızı için 1. Seviye (1,2 m/s) seçildiği durumda Tablo 4 incelenir ve bu tabloya göre 1, 4 ve 7 nolu deneylere ait S/N oranı ortalamaları alınır $(33,68+ 33,80+ 33,86) / 3 = 33,78$). Egzoz havası giriş sıcaklığının 3. seviyesi (40°C) için 3, 5 ve 7 nolu deney sonuçlarının ortalaması alınır $(33,48+ 33,61+33,86=33,65)$. Tüm faktörler ve düzeyleri için bu yöntemle hesaplanan ortalama değerler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 4. L_9 Deney tasarımına göre etkenlik değerleri ve S / N oranları.

Deney No	FAKTÖRLER			ETKENLİK	S/N
	A Taze hava giriş sıcaklığı (°C)	B Hava hızı (m/s)	C Egzoz havası giriş sıcaklığı (°C)		
1	0	1,2	28	48,3	33,68
2	0	1,6	34	47,5	33,53
3	0	2	40	47,2	33,48
4	5	1,2	34	49	33,8
5	5	1,6	40	47,9	33,61
6	5	2	28	45,5	33,16
7	10	1,2	40	49,3	33,86
8	10	1,6	28	46,5	33,35
9	10	2	34	46	33,26

Tablo 5. Tüm faktörler ve düzeyleri için hesaplanan ortalama değerler.

Ortalama Değerler								
Taze Hava Giriş Sıcaklığı			Hava Hızı			Egzoz Havası Giriş Sıcaklığı		
1.Seviye	2. Seviye	3. seviye	1.Seviye	2. Seviye	3. seviye	1.Seviye	2. Seviye	3. seviye
33,68	33,80	33,86	33,68	33,53	33,48	33,679	33,534	33,479
33,53	33,61	33,35	33,80	33,61	33,16	33,160	33,804	33,607
33,48	33,16	33,26	33,86	33,35	33,26	33,349	33,255	33,857
33,56	33,52	33,49	33,78	33,50	33,30	33,40	33,53	33,65
Ortalama S/N								33,525

Seçtiğimiz parametrelerin hedeflenen performans değeri üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu ve parametrelerin farklı düzeylerinin bu etkiyi ne ölçüde değiştirdiğinin belirlenmesi amacıyla ANOVA analizlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda elde edilen S/N oranları kullanılarak ANOVA analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle S/N oranının toplam değişkenliğini belirten SS_T (Toplam Karelerin Toplamı) hesaplanmalıdır (Savaşkan vd, 2004).

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2$$

η_i = sinyal/gürültü oranı

η_m = sinyal/gürültü oranlarının ortalaması,

n = toplam deney sayısı

SS_T değeri her bir faktörün ayrı ayrı karelerinin toplamı olan SS_A , SS_B ve SS_C değerleri ile SS_e olarak adlandırdığımız hata payının kareleri toplamından oluşmaktadır (Savaşkan vd, 2004). Her bir faktörün karelerinin toplamı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$SS_A = n_{A_i} \sum_{i=1}^{k_A} (\eta_{A_i} - \eta_m)^2$$

k_A = A faktörünün seviye sayısı

η_{A_i} = A faktörünün i seviyesindeki deney sayısı

η_A = A faktörünün i seviyesindeki S/N oranı

η_m = Ortalama S/N oranı

A, B ve C faktörlerinin kareleri toplamı:

$$SS_{A=} = 3 * [(33,56 - 33,525)^2 + (33,52 - 33,525)^2 + (33,49 - 33,525)^2] = 0,0089$$

$$SS_{B=} = 3 * [(33,78 - 33,525)^2 + (33,5 - 33,525)^2 + (33,3 - 33,525)^2] = 0,3519$$

$$SS_{C=} = 3 * [(33,4 - 33,525)^2 + (33,53 - 33,525)^2 + (33,65 - 33,525)^2] = 0,095$$

Öncelikle Tablo 4'te verilen 9 deneydeki sinyal gürültü oranı, sinyal/gürültü oranlarının ortalamasından çıkartılarak karesi alınır ve sonra hepsi toplanarak SST toplam karelerin toplamı hesaplanır :

$$SST: [(33,68-33,525)^2 + (33,53- 33,525)^2 + (33,48-33,525)^2 + (33,8-33,525)^2 + (33,61- 33,525)^2 + (33,16-33,525)^2 + (33,86 - 33,525)^2 + (33,35- 33,525)^2 + (33,26 - 33,525)^2] = 0,4574$$

Tablo 6. SST kareler toplamı.

Deney No	1. seviye	2. Seviye	3. Seviye	Etkenlik	S/N oranı	SST (Kareler Toplamı)
1	0	1,2	28	48,3	33,68	0,024
2	0	1,6	34	47,5	33,53	0,000
3	0	2	40	47,2	33,48	0,002
4	5	1,2	34	49	33,80	0,078
5	5	1,6	40	47,9	33,61	0,007
6	5	2	28	45,5	33,16	0,133
7	10	1,2	40	49,3	33,86	0,110
8	10	1,6	28	46,5	33,35	0,031
9	10	2	34	46	33,26	0,073

Tablo 5. Tüm faktörler ve düzeyleri için hesaplanan ortalama değerler.

Ortalama Değerler								
Taze Hava Giriş Sıcaklığı			Hava Hızı			Egzoz Havası Giriş Sıcaklığı		
1.Seviye	2. Seviye	3. seviye	1.Seviye	2. Seviye	3. seviye	1.Seviye	2. Seviye	3. seviye
33,68	33,80	33,86	33,68	33,53	33,48	33,679	33,534	33,479
33,53	33,61	33,35	33,80	33,61	33,16	33,160	33,804	33,607
33,48	33,16	33,26	33,86	33,35	33,26	33,349	33,255	33,857
33,56	33,52	33,49	33,78	33,50	33,30	33,40	33,53	33,65
Ortalama S/N								33,525

Seçtiğimiz parametrelerin hedeflenen performans değeri üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu ve parametrelerin farklı düzeylerinin bu etkiyi ne ölçüde değiştirdiğinin belirlenmesi amacıyla ANOVA analizlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda elde edilen S/N oranları kullanılarak ANOVA analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle S/N oranının toplam değişkenliğini belirten SS_T (Toplam Karelerin Toplamı) hesaplanmalıdır (Savaşkan vd, 2004).

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2$$

η_i = sinyal/gürültü oranı

η_m = sinyal/gürültü oranlarının ortalaması,

n = toplam deney sayısı

SS_T değeri her bir faktörün ayrı ayrı karelerinin toplamı olan SS_A , SS_B ve SS_C değerleri ile SS_e olarak adlandırdığımız hata payının kareleri toplamından oluşmaktadır (Savaşkan vd, 2004). Her bir faktörün karelerinin toplamı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$SS_A = n_{A_i} \sum_{i=1}^{k_A} (\eta_{A_i} - \eta_m)^2$$

k_A = A faktörünün seviye sayısı

η_{A_i} = A faktörünün i seviyesindeki deney sayısı

Tablo 6. SST kareler toplamı.

Deney No	1. seviye	2. Seviye	3. Seviye	Etkenlik	S/N oranı	SST (Kareler Toplamı)	
1	0	1,2	28	48,3	33,68	0,024	
2	0	1,6	34	47,5	33,53	0,000	
3	0	2	40	47,2	33,48	0,002	
4	5	1,2	34	49	33,80	0,078	
5	5	1,6	40	47,9	33,61	0,007	
6	5	2	28	45,5	33,16	0,133	
7	10	1,2	40	49,3	33,86	0,110	
8	10	1,6	28	46,5	33,35	0,031	
9	10	2	34	46	33,26	0,073	
					Σ	301,72	0,4574
					Ortalama	33,525	

η_A = A faktörünün i seviyesindeki S/N oranı

η_m = Ortalama S/N oranı

A, B ve C faktörlerinin kareleri toplamı:

$$SS_{A=} = 3 * [(33,56 - 33,525)^2 + (33,52 - 33,525)^2 + (33,49 - 33,525)^2] = 0,0089$$

$$SS_{B=} = 3 * [(33,78 - 33,525)^2 + (33,5 - 33,525)^2 + (33,3 - 33,525)^2] = 0,3519$$

$$SS_{C=} = 3 * [(33,4 - 33,525)^2 + (33,53 - 33,525)^2 + (33,65 - 33,525)^2] = 0,095$$

Öncelikle Tablo 4'te verilen 9 deneydeki sinyal gürültü oranı, sinyal/gürültü oranlarının ortalamasından çıkartılarak karesi alınır ve sonra hepsi toplanarak SST toplam karelerin toplamı hesaplanır :

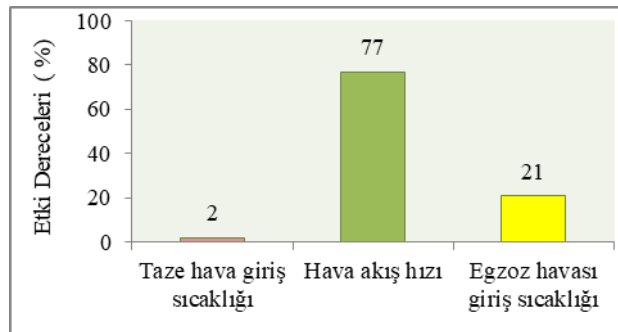
$$SST: [(33,68-33,525)^2 + (33,53- 33,525)^2 + (33,48-33,525)^2 + (33,8-33,525)^2 + (33,61- 33,525)^2 + (33,16-33,525)^2 + (33,86 - 33,525)^2 + (33,35- 33,525)^2 + (33,26 - 33,525)^2] = 0,4574$$

Tablo 7. Taguchi L9 deney tasarımına göre ANOVA tablosu.

ETKENLİK	Serbestlik Derecesi	Ortalama Değerler			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi	Önem Sırası
		1.düzye	2. düzey	3. düzey				
Taze Hava Giriş Sıcaklığı	2	33,56	33,52	33,49	0,0089	0,004431	% 2	3
Hava Hızı	2	33,78	33,5	33,3	0,3519	0,175944	% 77	1
Egzoz Havası Giriş Sıcaklığı	2	33,4	33,53	33,65	0,0950	0,047493	% 21	2
Hata	2				0,001657	0,00083	0,00	
Toplam	8				0,4574		100,00	

ANOVA analizinde faktörlerin ısı etkenlik üzerindeki yüzde etkileri hesaplanmıştır. Yüzde etki, ilgili faktörün kareleri toplamının toplam kareler toplamına bölünmesiyle bulunmuştur (Örneğin taze hava giriş sıcaklığı için $0,0089 / 0,4574 = 0,02$). Buna göre en önemli etkiye sahip faktörün % 77'lük oranla hava hızı olduğu görülmüştür. Egzoz havası giriş sıcaklığı ise %21'lik oranla hava hızından sonra en gelen etkili faktördür. Taze hava giriş sıcaklığı %2'lik değer ile deney sonucu üzerinde en düşük etkiye sahip faktör olmuştur.

Tablo 7'de verilen ANOVA tablosundan elde edilen veriler kullanılarak Şekil 6'da verilen grafik oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar veri tabanı ve literatürle uyumludur. Mardiana ve Riffat, hava akış hızının her türlü ısı geri kazanım verimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, hava giriş sıcaklığının ise çok az etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Mardiana ve Riffat, 2013). Niu ve Zhang, etkenliğin besleme havası giriş sıcaklığıyla fazla değişmediğini ifade etmişlerdir (Niu ve Zhang, 2001). Kocabaş ve Savaş, hazırladıkları pareto grafiğinde etkenlik üzerinde en etkili faktörün hava hızı olduğunu, daha sonra bunu sırasıyla egzoz ve taze hava giriş sıcaklığının takip ettiğini göstermişlerdir (Kocabaş ve Savaş, 2018).



Şekil 6. Faktörlerin ısı etkenlik üzerindeki etki dereceleri.

Doğrulama Testleri

Yapılan hesaplama ve oluşan grafiklerde de görüldüğü gibi en yüksek sinyal gürültü oranına sahip düzey hava

hızı için 1,2 m/s, egzoz havası giriş sıcaklığı için 40 °C ve taze hava giriş sıcaklığı için 0 °C dir. O halde bu çalışma için optimum çalışma noktası 1,2 m/s hava hızında 40 °C egzoz havası giriş sıcaklığında ve 0 °C taze hava giriş sıcaklığında seçilebilir. Belirlenen optimum deney şartların gerçekleşmesi durumunda beklenen sinyal gürültü oranını bulmak istersek kullanmamız gereken eşitlik şu şekildedir (Turgut ve Dikici, 2011).

$$\eta = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\eta_i - \eta_m)$$

$\hat{\eta}$ = Beklenen S/N oranı

η_m = Toplam ortalama S/N oranı

$\bar{\eta}_i$ = Optimum seviyedeki ortalama S/N oranı

k = Performansı etkileyen önemli faktörlerin sayısı

Her üç faktör de sistem üzerinde etkili olduğundan her üç faktör de hesaplama dahil edilerek yukarıda verilen eşitlik kullanılır. Beklenen S/N oranı $(33,525 + (33,56 - 33,525) + 33,78 - 33,525) + (33,65 - 33,525) = 33,94$ ve optimum koşullardaki etkenlik değeri $(\sqrt{10^{23,94}} = 49,77)$ hesaplanmıştır. Ayrıca optimum parametre değerlerinde doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleşen ve tahmin edilen S/N oranı ve etkenlik değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 8'de gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi beklenen ve gerçekleşen değerler birbiriyle oldukça uyumludur. Doğrulama sonuçları Taguchi yaklaşımının tasarım parametrelerinin optimizasyonunda güvenle kullanılabileceğini kanıtlamıştır.

Tablo 8. Etkenlik için doğrulama deney sonuçları.

Optimum Düzeyler			
Etkili Faktörler	Düzye	Değer	Ortalama S/N
Taze Hava Giriş Sıcaklığı	1	0 °C	33,56
Hava Hızı	1	1,2 m/s	33,78
Egzoz Havası Giriş Sıcaklığı	3	40 °C	33,65

Toplam ortalama S/N oranı	33,525	
	Beklenen	Gerçekleşen
Beklenen S/N oranı	33,94	34
Optimum Etkenlik	49,77	50,1

SONUÇ

Bu çalışmada değişen taze hava giriş sıcaklığı, hava hızı ve egzoz havası giriş sıcaklığının bir ısı değiştiricinin ısı geri kazanım performansına etkileri Taguchi metoduyla araştırılmıştır. Maksimum ısıl etkenlik elde etmek için kullanılması gereken optimum parametre kombinasyonu S/N oranı analizi yapılarak elde edilmiştir. Daha sonra ANOVA analizi yapılarak hangi parametrelerin deney sonucuna ne oranda katkı yaptıkları tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda da Taguchi yönteminin geçerliliği doğrulama testleri yapılarak sınanmıştır. Çalışmayı özetleyecek olursak:

1. Geleneksel tam faktöriyel deney tasarımı kullanıyor olsaydık yapılması gereken deney sayısı 27 iken Taguchi yöntemi sayesinde bu sayı 9'a indirilmiştir. Böylece zaman ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır.
2. Tüm deney sonuçlarına ait S/N oranları hesaplanmış her bir faktörün değişen düzeylerinin S/N oranını ne şekilde etkilediği grafiklerle gösterilmiştir. Buna göre artan taze hava giriş sıcaklığı ve hava hızı bu oranı olumsuz yönde etkilerken artan egzoz havası giriş sıcaklığı S/N oranını oldukça artırmaktadır. Buna göre maksimum ısı transferi için optimum seviyeler $A_1(0\text{ }^\circ\text{C})$, $B_1(1,2\text{ m/s})$ ve $C_3(40\text{ }^\circ\text{C})$ olarak tespit edilmiştir.
3. ANOVA analizi yapılarak faktörlerin ısıl etkenlik üzerindeki etki dereceleri tespit edilmiştir. Isı transferi üzerindeki en etkili faktörün % 77'lik oranla hava hızı olduğu tespit edilmiştir.
4. Son olarak doğrulama testleri yapılarak Taguchi yaklaşımıyla bulunan tahmin değerleri ile gerçek değerler birbiriyle kıyaslanmıştır. Tahmin edilen değerler ile gerçekleşen değerler arasında çok iyi uyum olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar Taguchi yaklaşımının; ısı değiştiricinin kullanıldığı bir ısı geri kazanım sisteminde optimum tasarım parametrelerinin tespit edilmesi amacıyla başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

SEMBOLLER

- A Isı transfer yüzeyi [m^2]
 C Isıl kapasite debisi
 $C_{p,h}$ Sıcak akışkanın özgül ısısı [$\text{J/kg}^\circ\text{C}$]
 $C_{p,c}$ Soğuk akışkanın özgül ısısı [$\text{J/kg}^\circ\text{C}$]
 ε Etkenlik
 \dot{m}_h Sıcak akışkanın kütleli debisi [kg/s]
 \dot{m}_c Soğuk akışkanın kütleli debisi [kg/s]
 NTU Geçiş transfer sayısı
 Q Isı değiştiricide geçen ısı miktarı [W]

- S/N Sinyal gürültü oranı
 T_{hi} Sıcak akışkanın giriş sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
 T_{ho} Sıcak akışkanın çıkış sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
 T_{ci} Soğuk akışkanın giriş sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
 T_{co} Soğuk akışkanın çıkış sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
 U Toplam ısı transfer katsayısı [$\text{W/m}^2\text{C}$]

KAYNAKLAR

- Bilen K., Yapıcı S. and Çelik C., 2001, A Taguchi Approach for Investigation of Heat Transfer from a Surface Equipped with Rectangular Blocks, *Energy Conversion and Management*, 42, 951-961.
- Danışman C., 2010, *Plakalı Eşanjör Etkenlik Parametrelerinin Deneysel Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Du T., Du W., Che K. and Cheng L., 2015, Parametric Optimization of Overlapped Helical Baffled Heat Exchangers by Taguchi Method, *Applied Thermal Engineering*, 85, 334-339.
- Genceli, O.F., 2005, *Isı Değiştiricileri*, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- Hsieh C.T. and Jang J.Y., 2012, Parametric Study and Optimization of Louver Finned-Tube Heat Exchangers by Taguchi Method, *Applied Thermal Engineering*, 42, 101-110.
- Jamshidi N., Farhadi M., Ganji D.D. and Sedighi K., 2013, Experimental Analysis of Heat Transfer Enhancement in Shell and Helical Tube Heat Exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 51, 644-652.
- Jeom-Yul Y. and Kwan-Soo L., 2000, Influence of Design Parameters on the Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of the Heat Exchanger With Slit Fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2529-2539.
- Junqi D., Yi Z., Gengtian L. and Weiwu X., 2013, Experimental Study of Wavy Fin Aluminum Plate Fin Heat Exchanger, *Experimental Heat Transfer*, 26, 384-396.
- Kocabaş C. and Savaş A.F., 2018, Isı Değiştirici Performansının Deneysel Tasarımı Metoduyla Analizi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 1174-1180.

Mardiana A. and Riffat S. B., 2013, Review on Physical and Performance Parameters of Heat Recovery Systems for Building Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 174-190.

Kocabaş C., 2014, *Farklı Malzemelerden İmal Edilmiş Plakalı Isı Değiştiricilerinin Atık Isı Geri Kazanım Performanslarının Deneysel Analizi*, Yüksek Lisans

Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, Türkiye.

Kocabaş C. and Savaş A.F., 2015, Comparison of Waste Heat Recovery Performances of Plate-Fin Heat Exchangers Produced from Different Materials, *Contemporary Engineering Sciences*, 8(11), 453 – 466.

Kotcioglu I, Cansiz A. and Khalaji M. N., 2013, Experimental Investigation for Optimization of Design Parameters in a Rectangular Duct with Plate-Fins Heat Exchanger by Taguchi Method, *Applied Thermal Engineering*, 50, 604-613.

Niu J.L. and Zhang L.Z., 2001, Membrane-Based Enthalpy Exchanger: Material Considerations and Clarification of Moisture Resistance, *Journal of Membrane Science*, 189, 179-191.

Özçelik B. ve Özbay A., 2011, Plastik Enjeksiyon Kalıp Malzemelerinin Polipropilen Ürünün Mekanik Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi, *Sigma 29 Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 289-300.

Qi Z., Chen J.P. and Chen Z. J., 2007, Parametric Study on the Performance of a Heat Exchanger with Corrugated Louvered Fins, *Applied Thermal Engineering*, 27, 539–544.

Savaşkan M., Taptık Y. and Ürgen M., 2004, Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu, *İtü Dergisi, Mühendislik*, 3(6), 117-128.

Savaş A.F. and Madan E., 2015, Utilization of Stack Gas and Kiln Coolin Air Temperature for Factory Heating Through Heat Recovery Method in Ceramic Kilns, *Technical Gazette*, 22(4), 893-898.

Şahin B., Yakut K., Kotcioglu I. and Çelik C., 2005, Optimum Design Parameters of a Heat Exchanger, *Applied Energy*, 82, 90–106.

Şahin B. and Demir A., 2008, Performance Analysis of a Heat Exchanger Having Perforated Square Fins, *Applied Thermal Engineering*, 28, 621-632.

Taguchi, G. and Wu, Y., 1989, Taguchi Methods Case Studies from the US and Europe, American Supplier Institute Inc., Michigan.

Tan Ö. ve Zaimoğlu A.Ş., 2004, Çimento Enjeksiyonlarında Kullanılan Katkı Malzemelerinin Reolojik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 275-281.

Turgut E. ve Dikici A., 2011, Eş Eksenli Bir Isı Değiştiricisinin Tasarım Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, 278-281.

Turgut E., Çakmak G. and Yıldız C., 2012, Optimization of the Concentric Heat Exchanger with Injector Turbulators by Taguchi Method, *Energy Conversion and Management*, 53, 268–275.

Yakut K., Alemdaroglu N., Sahin B. and Çelik C., 2006, Optimum Design-Parameters of a Heat Exchanger Having Hexagonal Fins, *Applied Energy*, 83, 82–98.

İnternet, 2013, İmmak, *Air To Air Heat Recovery Exchangers Recuperator*, <http://www.immak.eu/Admin/photos/belgelerkucuk/634671386075318750.pdf>.