

Üçgen Kanatlı Yüzeylerin Isı Transfer Performansının Taguchi Yöntemiyle Deneysel İncelenmesi

Onur YEMENİCİ^{1*} 

Öz

Bu çalışmada ısıtılmış üçgen kanatlı yüzeyler üzerinden akışta Reynolds sayısı, kanat yüksekliği ve kanatlar arasındaki mesafenin ısı transfer performansı üzerindeki bileşik etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu değişkenlerin en uygun koşulları Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar, yüksekliği 5, 10 ve 15 mm ve kanatlar arası mesafesi 20, 25 ve 30 mm olan ardışık 9 adet üçgen kanada sahip bakır yüzeyler üzerinde 6.38×10^4 , 1.28×10^5 ve 2.55×10^5 Reynolds sayıları için düşük hızlı bir rüzgâr tüneline yapılmıştır. Hız ve sıcaklık ölçümleri için sırasıyla kızgın tel anemometresi ve termal çiftler kullanılmıştır. Deneysel parametreleri Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak belirlenmiş ve en uygun sonuçlar sinyal-gürültü (S/N) oranı ve ANOVA yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Performans parametresi olarak ısı taşınım katsayısı dikkate alınmıştır. Sonuçlar kanat yüksekliği ve Reynolds sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığını, kanatlar arasındaki mesafenin ise artmasıyla ise azaldığını göstermiştir. Isı transferi performansında en etkili parametre Reynolds sayısı iken, en az etkili parametre kanat yüksekliği olarak tespit edilmiştir. En iyi sonuç 15 mm kanat yüksekliği, 20 mm kanatlar arası mesafe ve 2.55×10^5 Reynolds sayısında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Üçgen kanatlı yüzey, Taguchi yöntemi, Isı taşınım katsayısı, Isı transferi, Ayrılmış akış.

Experimental Investigation of The Heat Transfer Performance of Triangular Riblet Surfaces by Taguchi Method

Abstract

In this study, the combined effects of Reynolds number, riblet height, and distance between riblets on the heat transfer performance flow over heated triangular riblet surfaces were investigated experimentally. The optimum conditions of these variables were determined using the Taguchi method. The experiments were carried out in a low-speed wind tunnel for Reynolds numbers of 6.38×10^4 , 1.28×10^5 , and 2.55×10^5 on copper surfaces with 9 consecutive triangular riblets with heights of 5, 10, and 15 mm and distances between riblets of 20, 25, and 30 mm. Hot-wire anemometry and thermal couples were used for velocity and temperature measurements, respectively. Experimental parameters were determined using the Taguchi L9 orthogonal array, and optimum results were analyzed using the signal-to-noise (S/N) ratio and ANOVA method. The heat transfer coefficient was considered as the performance parameter. The results showed that heat transfer increased with increasing riblet height and Reynolds number, and decreased distance between riblets. The most effective parameter in heat transfer performance was Reynolds number, while riblet height was determined as the least effective parameter. The optimum result was obtained with a riblet height of 15 mm, distance between riblets of 20 mm, and Reynolds number of 2.55×10^5 .

Keywords: Triangular riblet surface, Taguchi method, Convective heat transfer coefficient, Heat transfer, Separated flow.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, oseckin@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Birçok mühendislik problemleri ve tasarımları için kanatlı yüzeyler üzerindeki akış ve ısı transferi analizleri büyük önem taşımaktadır. Bu yüzeyler üzerinden ısı transferi enerji verimliliğini artırmak, sistemlerin çalışma verimliliğini optimize etmek veya istenmeyen ısıyı uzaklaştırmak amacıyla yapılır. Bu yüzeyler termik santrallerden kimya sanayisine, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinden ısıtma uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Örneğin, türbin kanatları, ısı değiştiriciler, taşıtlar, elektronik soğutma sistemleri, ısı depolama sistemleri, biyomedikal cihazlar, buhar kazanları, soğutma çevrimleri, havalandırma sistemleri ve enerji santralleri gibi mühendislik uygulamaları için büyük önem taşımaktadır.

Literatürde kanatlı yüzeylerin farklı geometrileri üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Choi ve Orchard (1997) üçgen kanatlı yüzeylerin ısı transfer karakteristiklerini incelemek amacıyla düşük hızlı bir rüzgâr tüneline deneyler gerçekleştirmiş ve üçgen kanatlı yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısının düz bir yüzeye göre %10 arttığını tespit etmişlerdir. Benhalilou ve Kasagi (1999) üçgen kanatlı yüzeyler üzerinden türbülanslı bir kanal akışındaki akış ve ısı transferi karakteristiklerini nümerik olarak incelemişlerdir. Sonuçlar üçgen kanatlı yüzeylerin yüzey sürtünmesini azaltırken ısı transferini arttırdığını göstermiştir. Dubief ve ark. (1997) üçgen kanatlı yüzeyler üzerindeki türbülanslı sınır tabakada hız gradyanı ölçümleri yapmıştır. Stalio ve Nobile (2003) üçgen kanatlı yüzeylere sahip bir kanal içinde tam gelişmiş laminar ve türbülanslı akışı ve ısı transferini, sırt açısı ve kanat açıklığının etkisi altında, nümerik olarak incelemişlerdir. Karabulut ve Alnak (2023) yaptıkları çalışmada dikdörtgen kesitli kanalların içindeki çatı ve ters yamuk desenli bakır yüzeylerin, farklı jet giriş genişliklerinde soğutulmasını incelemişlerdir. Wang ve ark. (2000) üçgen kanatlı yüzey üzerindeki türbülanslı akışın akış özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, pürüzsüz bir yüzey üzerindeki akış ile karşılaştırıldığında viskoz alt tabaka ve tampon bölgenin kalınlığının daha büyük olduğunu göstermiştir. Walsh ve Weinstein (1979) tarafından üçgen kanatçıklar üzerinde türbülanslı bir akışta yapılan çalışmada, kanatçıkların varlığının yüzey sürtünmesini azalttığı ve ısı transferini arttırdığı belirlenmiştir. Karabulut ve Alnak (2021) dikdörtgen kanallardaki üçgen ve düz basamaklı yüzeylerden ısı transferini üç tane hava jeti akışı kullanarak araştırmışlardır. Sonuç olarak düz basamaklı yüzeyin Nusselt sayısının, üçgen basamak model yüzeyden %45,18 büyük olduğu tespit edilmiştir. Lindemann (1985) üçgen kanatlı, dalgalı yüzeyler gibi çeşitli yüzey geometrileri üzerinde akışı araştırmış ve üçgen yüzeylerin ısı transfer katsayısında en fazla %36'lık bir artış gösterdiğini tespit etmiştir. Kanallardaki farklı yüzeyli modellerin üçlü jet etkisi ile soğutulmalarının ve akış karakteristiğinin analizi Karabulut ve Alnak (2023) tarafından yapılmıştır. Choi ve Hamid (1991) iki farklı kanatçık yüzeyi üzerinden Reynolds sayısına bağlı olarak yaptıkları deneysel bir çalışmada, kanatçıkların sürüklenmeyi azaltırken ısı transferini arttırdığını belirlemişlerdir. Alnak

(2022) üçgen biçimli kanatçık yüzeylerde ısı geçişini farklı kanatçık açıları, kanatçık boyutları ve Reynolds sayılarında nümerik olarak incelemiştir. Kanatlı yüzeyler üzerinde akış ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmaların sistematik analizi için Taguchi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem elde edilen veriler üzerine etki eden parametrelerin en uygun koşullarının değerlendirilmesi için kullanılarak, hızlı ve minimum maliyetli deneysel çalışmalara uygulanabilir. Isı pompalarında R22 ve R404A soğutucu karışımlarında en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi için Comakli ve ark. (2009) tarafından Taguchi yöntemi kullanılmıştır. . Hava jeti çarpma tekniği kullanılarak elektronik bileşen yüzeylerinin ısı transferinin iyileştirilmesi çalışması Karabulut (2019) tarafından yapılmıştır. Türkan ve Etemoğlu (2020) Taguchi metodunu kullanılarak gıda kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyonu yapmışlardır. Optimum yalıtım kalınlığı üzerindeki etkili parametreler teorik olarak ve Taguchi yöntemi ile Arslanoglu ve Yigit (2017) tarafından araştırılmıştır. Ünverdi ve Küçük (2019) hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve Taguchi yöntemi ile oluşturulan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarını karşılaştırmıştır. Karabulut ve Alnak (2024) farklı hava jet çarpma uygulamaları ile elektronik sistem yüzeylerindeki ısı transferi artışını incelemişlerdir.

Yukarıda belirtilen literatürde kanatlı yüzeyler üzerinden akışla ilgili yapılan araştırmalar, akışın karmaşıklığından dolayı genellikle nümeriktir. Mevcut çalışma, bu boşluğu kapatmak için, akış şartları ve kanat geometrisinin ısı transferi üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. İlk olarak akış hızının, kanatlar arası mesafesinin ve kanat yüksekliklerinin ısı transferi iyileştirmesi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve daha sonra bu parametrelerin optimizasyonu Taguchi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deneyler kanat yüksekliği 15, 20 ve 25 mm, kanatlar arası mesafesi 20, 25 ve 30 mm olan üçgen kanatlara sahip bakır yüzeyler üzerinde 6.38×10^4 , 1.28×10^5 ve 2.55×10^5 kanal yüksekliği Reynolds sayıları (Re_H) için yapılmıştır. Üçgen kanatlı ve düz yüzeyler üzerinden akışta ortalama ısı taşınım sayısının Reynolds sayısı ile değişimi farklı kanatlar arası mesafe ve kanat yükseklikleri için incelenmiştir. Kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısı olmak üzere 3 farklı değişkenin 3 farklı seviyesinin ısı taşınım katsayısı üzerine etkileri ve bu katsayı üzerinde hangisinin daha etkin olduğu Taguchi metodu ve ANOVA varyans analizi ile belirlenmiştir.

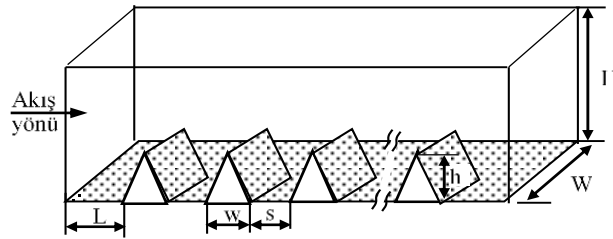
2. Materyal ve Metot

2.1. Deney düzeneği ve ölçüm teknikleri

Deneyler, Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan üfleme tipindeki düşük hızlı bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Maksimum akış hızı 30 m/s ve türbülans yoğunluğu %0.7' dir. 6 kW' lık bir aksel fan ardından düz akış çizgileri ve düşük türbülans yoğunluğu için kesit alanı $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ ve kalınlığı 0.15 m olan bal peteği bir kanal ve sınır

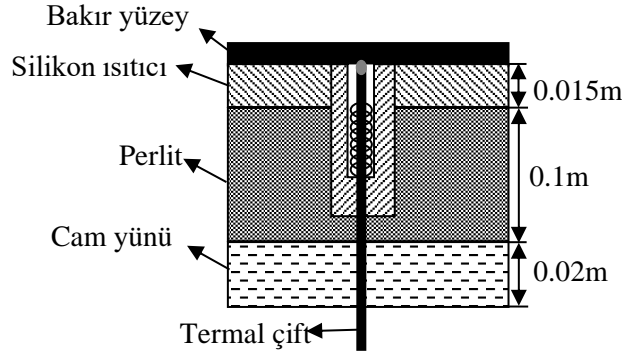
tabaka ayrılmasını önlemek için 1.5:1 daralma oranına sahip bir lüle kullanılmıştır. Lülenin devamında test bölümünden önce akışı düzenlemek için 0.4 m uzunluğa ve $0.3 \times 0.2 \text{ m}^2$ giriş alana sahip düz kanal bulunmaktadır. Test bölümü 0.8 m uzunluğunda, 0.3 m genişliğinde ve 0.2 m yüksekliğinde dikdörtgen bir kanaldır ve yan yüzeyleri akış alanının tam görünürlüğüne sağlamak için pleksiglass malzemedan yapılmıştır. Test bölümünün üst yüzeyine ölçüm aletlerinin hareketini sağlamak için kanallar açılmıştır.

Düz yüzey üzerinde akışta ölçümler 0.24 m genişliğinde, 0.75 m uzunluğunda ve 0.001 m kalınlığında bakır düz bir levha üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üçgen kanatlı yüzeylerde ölçümler ise düz yüzey ile aynı boyutlara sahip, kanat yüksekliği ve kanatlar arası mesafesi değişen dokuz farklı bakır yüzey üzerinde yapılmıştır. Şekil 1’ de test bölümü içindeki üçgen kanatlı bir yüzeyin sistematik diyagramı verilmiştir. Kanat yüksekliği (h) 5, 10 ve 15 mm ve kanatlar arası mesafe (s) 20, 25 ve 30 mm olarak değişmektedir. Kanat genişliği (w), kanat sayısı ve test bölümünün girişinden ilk kanada kadar olan uzunluk (L) tüm ölçümlerde sırasıyla 0.03 m, 9 ve 0.03 m olarak sabitlenmiştir.



Şekil 1. Üçgen kanatlı bakır bir yüzeyin sistematik diyagramı

Şekil 2’ de yerel ve ortalama ısı transferi ölçümleri için uygulanan sabit ısı akısı modeli gösterilmiştir. Bu modelde üçgen kanatlı bakır levhanın altı 0.015 m kalınlığında silikon ısıtıcı ile kaplanmıştır. Silikon ısıtıcı seri bağlı ısıtma elemanlarına alternatif akım uygulanarak ısıtılmıştır. Silikon ısıtıcının altında sırasıyla 0.1 m ve 0.02 m kalınlığında perlit ve cam yünü ile yalıtım sağlanmıştır. Termal çiftler bakır levhaların altına bir yay yardımıyla monte edilmiştir. Düz yüzey sıcaklık ölçümleri, akış yönünde 0.01, 0.06, 0.18, 0.3, 0.42, 0.54 ve 0.66 m mesafesinde olmak üzere yedi noktadan alınmıştır. Kanatlı yüzeylerde ise termal çiftler her bir kanadın yan yüzeylerine, kanatlar arasındaki boşluklara, ilk kanatların önüne ve son kanadın arkasında birer adet olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 2. Sabit ısı akısı modeli

Isıtılmış bakır yüzeylerin sıcaklık ve taşınım ile ısı transfer oranları bir varyak yardımıyla kontrol edilmiştir. Bu yüzeyler ile serbest akış arasındaki 10 °C' lik sıcaklık farkını sağlamak için gerekli güç tüketimi, seçilen Reynolds sayılarında elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak ısı taşınım katsayısı (h) Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$h = q / (T_w - T_0) \quad (1)$$

Burada (q) net ısı akısı, T_w yüzey sıcaklığı ve T_0 serbest akış sıcaklığıdır. Kanatlı yüzeyler üzerinde akışta elde edilen deneysel ısı taşınım katsayıları düz yüzey deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak, kanatlı yüzeylerin ısı transfer performansı belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan değişkenler için deneysel belirsizlikler Kline ve McClintock metodu (1953) kullanılarak Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$\beta_R = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \beta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \beta_2 \right)^2 \dots \dots \dots \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \beta_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Burada f , bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, fonksiyonu, β_R sonuçtaki belirsizlik ve $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ bağımsız değişkenlerdeki belirsizliklerdir. Isı taşınım katsayısının ölçümündeki belirsizlik, ısı akısı, serbest akış hızı ve sıcaklık ölçümündeki belirsizlikleri kullanılarak tespit edilmiştir. Hız ölçümündeki belirsizlik elektronik gürültü, prob konumlandırma, A/D çözünürlüğü ve çevresel hatalardan kaynaklanırken, sıcaklık ölçüm belirsizliği, konvektör kart, bağlantı ve deneysel hatalardan kaynaklanmaktadır. Maksimum hız ve sıcaklık ölçümlerinin belirsizlikleri sırasıyla $\pm\%2.5$ ve 4.6 olarak elde edilirken, Reynolds sayısı ve ısı taşınım katsayılarının belirsizlikleri sırasıyla $\pm\%3.2$ ve 5.6 olarak bulunmuştur.

2.2. Taguchi yöntemi ve deneysel plan

Deneysel çalışmalarda her değişen parametre ile yeni testlerin yapılması maliyetli olmasının yanı sıra zaman kaybına da neden olmaktadır. Bu nedenle en uygun deney tasarımı için ortogonal

dizileri içeren Taguchi yöntemi kullanılır. Taguchi yöntemi sırasıyla parametrelerin ve seviyelerinin belirlenmesi, uygun ortogonal dizinin seçilmesi, dizinin sütunlarına parametrelerin atanması, verilerin analizi ve parametrelerin etkinliğinin belirlenmesi adımlarını içerir.

Bu çalışmada en uygun kanatlı yüzey tasarımının yapılabilmesi için kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısı olmak üzere üç farklı parametrenin ısı transferi performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 1’ de verilmiştir. Analizlerde kanat yüksekliği 5, 10 ve 15 mm, kanatlar arası mesafe 20, 25 ve 30 mm ve Reynolds sayısı 6.38×10^4 , 1.28×10^5 ve 2.55×10^5 olarak alınmıştır. Her bir parametre için 3 seviye seçilmiş, parametrelerin seviyelerinden 1 çıkarılmasıyla serbestlik dereceleri 2 olarak bulunmuş ve serbestlik değerlerinin toplanmasıyla 6 toplam serbestlik derecesi elde edilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan parametre ve seviyeler.

Parametreler	Serb. der.(Sev.1)	Seviye1	Seviye2	Seviye3
Kanat yüksekliği(mm)	2	5	10	15
Kanatlar arası mesafe(mm)	2	20	25	30
Reynolds sayısı(-)	2	6.38×10^4	1.28×10^5	2.55×10^5
Top. serb. der.	6			

Taguchi yönteminde toplam serbestlik derecesi için uygun bir ortogonal dizi seçilmektedir. Bu çalışmaya en uygun deneysel plan olan Taguchi L9 dizisi kullanılarak seçilen deney sırası Tablo 2’ de verilmiş ve 9 farklı değer ile Taguchi analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Taguchi ortogonal L9 dizisi deney planı.

Ortogonal dizisi	Kanat yüksekliği(mm)	Kanatlar arası mesafe(mm)	Reynolds sayısı(-)
111	5	20	6.38×10^4
122	5	25	1.28×10^5
133	5	30	2.55×10^5
212	10	20	1.28×10^5
223	10	25	2.55×10^5
231	10	30	6.38×10^4
313	15	20	2.55×10^5
321	15	25	6.38×10^4
332	15	30	1.28×10^5

Taguchi yönteminde deneylerin sonuçları sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülür ve bu oran gürültü faktörlerinin varlığında seçilen parametrelerin performans değişkenliğinin bir ölçüsüdür. S/N oranı yüksek değerler aldıkça ürünün kalitesi artacağından, gürültü faktörlerini en aza indirmek performansı olumlu etkilemektedir. Bu oranının analizi için “daha küçük olan daha iyidir”, “daha

büyük olan daha iyidir” ve “nominal olan daha iyidir” şeklinde üç farklı performans özelliği bulunmaktadır. Üçgen kanatlı yüzeylerin kullanılmasının amacı maksimum ısı transferinin sağlanmasıdır. Bu nedenle ısı taşınım katsayısı performans parametresi olarak seçilmiş ve Denklem (3)’ de verilen “daha büyük olan daha iyidir” S/N denklemi kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

Burada; n ve y sırasıyla gözlem sayısını ve gözlemlenen verileri göstermektedir.

ANOVA varyans analizi, deneysel hataları değerlendirerek farklı parametrelerin etkisini kavramak için anlamlılık testi yapmaktadır. Analiz edilen parametrelerle ilişkili bir regresyon modeline uygulanır ve çıkış değişkenindeki farklılığı açıklar. Bu çalışmada da kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısının ısı transferi üzerine etkilerini değerlendirmek için ANOVA analizi kullanılarak, hangi parametrenin ne kadar etkin olduğu belirlenmiştir.

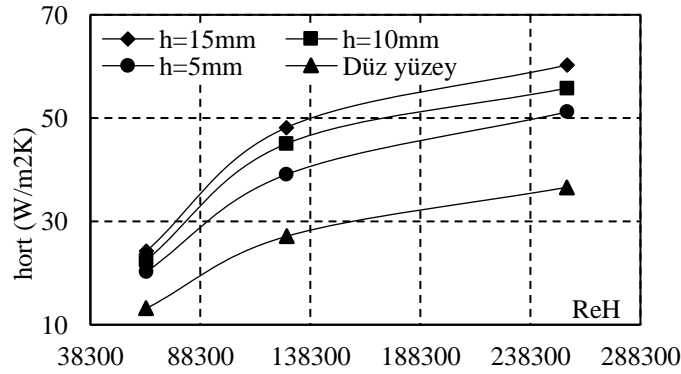
3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde ısıtılmış üçgen kanatlı yüzeyler ve düz yüzey üzerinde akış deneyleri 6.38×10^4 , 1.28×10^5 ve 2.55×10^5 Reynolds sayısı, 5, 10 ve 15 mm kanat yükseklikleri ve 20, 25, 30 mm kanatlar arası mesafe için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmaya en uygun deneysel tasarım olan Taguchi L9 dizisi kullanılarak, bu değişkenlerin ısı transferi üzerine bileşik etkileri ve hangisinin daha etkin olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçları ve Taguchi analizi ayrı ayrı detaylandırılmıştır.

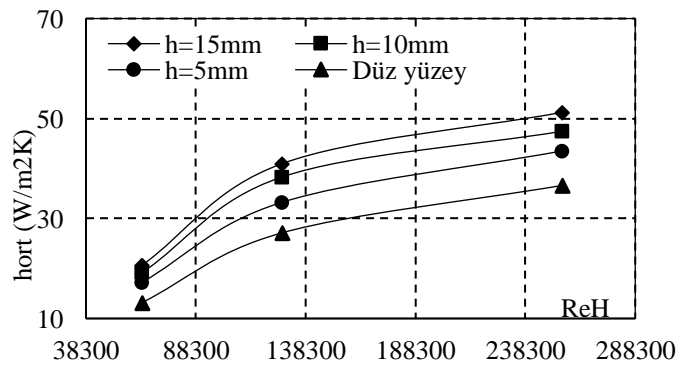
3.1. Deneysel sonuçları

Şekil 3 (a), (b) ve (c)’ de üçgen kanatlı ve düz yüzeyler üzerinden akışta ortalama ısı taşınım sayısının kanal yüksekliği ile elde edilen Reynolds sayısı ile değişimi 20, 25 ve 30 mm kanatlar arası mesafe için sırasıyla verilmiştir. Sonuçlar tüm üçgen kanatlı yüzeylerin ısı taşınım katsayısı değerlerinin düz yüzey değerlerinden daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu durum kanatların varlığının termal sınır tabakanın gelişimini engellemesiyle ve ısı taşınım katsayısını, karışma uzunluğunu ve türbülans seviyesini arttırmasıyla açıklanabilir. Kanatlar arası mesafe 20 mm olarak alındığında, ortalama ısı taşınım katsayıları $Re_H=6.38 \times 10^4$ değerinde h=5, 10 ve 15 mm için sırasıyla düz yüzeyinkinden %49, %65 ve %80 ve $Re_H=2.55 \times 10^5$ için ise %39, %52 ve %65 daha yüksek elde edilmiştir. Kanatlar arası mesafe sabit iken kanat yüksekliğinin artması ısı transferini arttırmış ve bu artışın düşük Reynolds sayısında daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Isı transferinin kanat yüksekliği ve Reynolds sayısı ile artmasının nedeni, Yuan (2000)’ nin yaptığı çalışmada da belirttiği gibi, türbülans yoğunluğu ve girdap gücünün artmasıdır. Reynolds sayısı 1.28×10^5 olarak sabit tutulduğunda, blok yüksekliğinin 5 mm değerinde ortalama ısı taşınım katsayısı düz yüzeyinkiyle

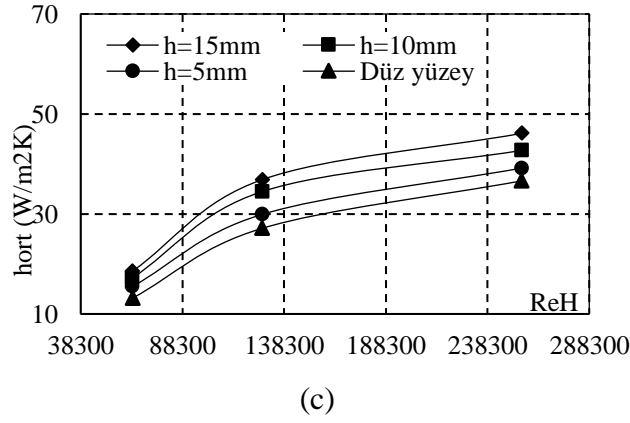
karşılaştırıldığında $w=20, 25$ ve 30 mm için sırasıyla %44, %23 ve %10 artarken, $h=15$ mm için %78, %51 ve %36 artmıştır. Kanatlar arasındaki mesafenin artması ısı transferinde azalmaya sebep olmuştur. Çünkü kanatlar arasındaki dolaşım bölgesinin büyüklüğü artmakta ve dolayısıyla ısı transferi üzerine negatif etkileri artmaktadır. Ayrıca yerel ısı taşınım katsayıları sonuçlarına göre, kanatlı yüzey üzerindeki en büyük ısı taşınım katsayısı, çarpmanın etkisiyle maksimum hızın elde edildiği ilk kanat üzerindeki tepe noktasında oluşmuş ve daha sonra ki kanatlar üzerinde azalarak devam etmiştir. Kanatlar arasındaki boşluklarda oluşan dolaşım bölgelerinden dolayı buralarda kanat yüzeylerine göre daha düşük ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. En düşük ısı transferi değerleri ise, uzun yeniden dolaşım bölgesi ve ters basınç değişimleri nedeniyle, son kanadın arkasında oluşmuştur. Kanal girişindeki basınç ilk kanada kadar yavaşça artarken, bu kanadın tepe noktasında çarpmanın etkisiyle keskin bir şekilde düşer. En düşük basınç değerleri en büyük hız değerlerinde elde edilirken, en büyük değerler kanatlar arasında ve en son kanattan sonra oluşan yeniden dolaşım bölgelerinde oluşmuştur. Artan Reynolds sayılarıyla birlikte basınç değerleri akışkanın daha yüksek momentumundan dolayı azalırken, basınç düşüşü de önemli derecede artar. Kanatların varlığı kanaldaki basınç düşüşünün artmasına neden olabilir, dolayısıyla sistemin ısıl-hidrolik performansını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, kanatların tasarımı ve yerleşimi dikkatlice değerlendirilmelidir.



(a)



(b)



Şekil 3. Kanatlı ve düz yüzeyler için ortalama ısı taşınım katsayılarının Re_H ile değişimi (a) $w=20$, (b) 25 ve (c) 30 mm

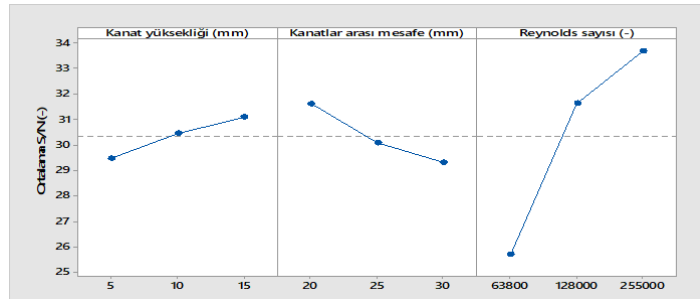
3.2. Taguchi analizi

Bu çalışmada deneyler Reynolds sayısı, kanat yüksekliği ve kanatlar arası mesafe olmak üzere 3 farklı değişken için ve Reynolds sayısı 6.38×10^4 , 1.28×10^5 ve 2.55×10^5 , kanat yükseklikleri 5, 10 ve 15 mm ve kanatlar arası mesafe 20, 25, 30 mm olmak üzere her bir parametrede 3 farklı seviye için yapılmıştır. Bu değişkenlerin ısı taşınım katsayısı üzerine etkileri ve bu katsayı üzerinde hangisinin daha etkin olduğu Taguchi metodu ve ANOVA varyans analizi ile belirlenmiştir. Analizler 3 parametre ve 3 seviye için en uygun deneysel tasarım olan Taguchi L9 dizisi kullanılarak 9 farklı deney üzerinden yapılmıştır.

Isıtılmış üçgen kanatlı yüzeylerin ortalama ısı taşınım sayısı değerleri, ortalama S/N oranları ve her deneyin aynı koşullar altında üç kez tekrarlanarak elde edilen standart sapma değerleri Tablo 3' te verilmiştir. Şekil 4' te ise Reynolds sayısı, kanat yüksekliği ve kanatlar arası mesafeye bağlı olarak ortalama S/N değerleri sunulmuştur. En yüksek ısı transferi değeri en büyük ortalama S/N oranlarına sahip 15 mm kanat yüksekliği ve 20 mm kanatlar arası mesafeye sahip üçgen kanatlı yüzey üzerinde 2.55×10^5 Reynolds sayısında elde edilmiştir. 5 mm kanat yüksekliği, 30 mm kanatlar arası mesafe ve en düşük Reynolds sayısında ise en düşük ortalama S/N oranı dolayısıyla en düşük ısı transferi değeri tespit edilmiştir. Sonuç olarak en yüksek ve en düşük ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri sırasıyla 313 ve 231 ortogonal dizilerinde elde edilmiştir. Isı transferi kanat yüksekliği ve Reynolds sayısının artmasıyla artarken, kanatlar arasındaki mesafenin artmasıyla azalmıştır.

Tablo 3. Üçgen kanatlı yüzeyler için ortalama h , ortalama S/N ve standart sapma değerleri

Ortogonal dizisi	Deney no	Ort. h (W/m^2K)	Ort. $S/N(-)$	Standart sapma (-)
111	1	202.699	26.137	0.0001144
122	2	332.435	304.341	0.0050194
133	3	391.715	318.594	0.0021884
212	4	450.776	330.792	0.0033693
223	5	474.521	335.251	0.0030375
231	6	172.085	247.148	0.011953
313	7	602.909	35.605	0.001339
321	8	206.121	262.824	0.0170999
332	9	368.779	313.353	0.0029734

**Şekil 3.** Kanatlı yüzeyler için farklı parametrelerin ortalama S/N oranları

Kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısına bağlı olarak S/N oranları için çıkış değerleri Tablo 4’ de verilmiştir. Bu çıkış değerlerine göre ısı transferi üzerinde en etkili parametrenin Reynolds sayısı olduğu tespit edilirken, en az etkili parametrenin kanat yüksekliği olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. Üçgen kanatlı yüzeyler için ortalama h , ortalama S/N ve standart sapma değerleri

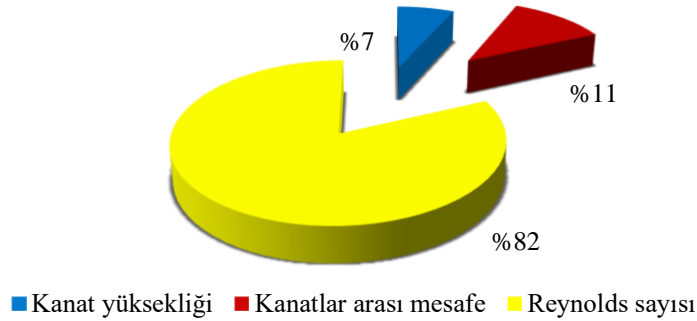
Seviye	Kanat yüksekliği(mm)	Kanatlar arası mesafe (mm)	Reynolds sayısı (-)
1	29.48	31.61	25.71
2	30.44	30.08	31.62
3	31.07	29.3	33.66
Delta	1.6	2.3	7.95
Rank	3	2	1

Bu çalışmada üçgen kanatlı yüzeyler üzerinde akışta kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısının ısı taşınım katsayısı üzerine katkısı varyans analizi ANOVA ile incelenmiştir. Bu analiz üç ve daha fazla bağımsız ortalama arasındaki farkı katlanmış olarak karşılaştırılarak anlamlı sonuçları elde eder. Tablo 5’ de S/N oranları için varyans analizi sonuçları verilirken, farklı

parametrelerin ısı transferi üzerine etki yüzdeleri Şekil 5 ile gösterilmiştir. *S/N* oranları için çıkış değerlerinde olduğu gibi varyans analizinde de ısı taşınım katsayısı değişiminde en anlamlı parametrenin Reynolds sayısı olduğu tespit edilmiştir. Matematiksel modelin güvenilirliğini ifade eden determinasyon katsayısının (R^2) değeri %96.22 olarak hesaplanmıştır ve bu değer parametrelerin ısı transferi üzerine etkilerinin doğru ifade edildiğini göstermektedir. Isı taşınım katsayısı üzerine kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısının etkisi sırasıyla %7, %11 ve %82 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5. *S/N* oranları için ANOVA değerleri

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Kanat yüksekliği	2	109.43	54.714	13.64	0.068
Kanatlar arası mesafe	2	190	94.815	23.63	0.041
Reynolds sayısı	2	1.351	675.661	168.42	0.006
Hata	2	8	4.012		
Toplam	8	1.658			
Model özeti					
	S	R^2	R^2 (adj)		
	2.003	%96.22	%98.06		



Şekil 5. Kanatlı yüzeyler için farklı parametrelerin etki yüzdeleri

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada ısıtılmış üçgen kanatlar üzerinde akışta ısı transferi kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısının etkisinde deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca bu değişkenlerin ısı transferi üzerine etkisi ve optimizasyonu Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ısı transferinin üçgen kanatlı yüzeylerin tamamında düz yüzeylere göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Kanatlı yüzeyler üzerinde akışta ısı transferi artışı kanat yüksekliği, kanatlar arası mesafe ve Reynolds sayısına bağlı olarak düz yüzey değerlerinden %7-%84 arasında artmıştır. Kanat yüksekliği ve Reynolds sayısı arttıkça ısı taşınım katsayısı artarken, kanatlar

arasında mesafenin artmasıyla azalmıştır. Isı taşınım katsayısındaki bu değişimlerin düşük Reynolds sayısında daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Optimum ısı transferi değerinin 15 mm kanat yüksekliği ve 20 mm kanatlar arası mesafe sahip üçgen kanatlı yüzey üzerinde 2.55×10^5 Reynolds sayısında olduğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısının ısı transferini arttırmak için en etkili parametre olduğu bulunurken, en az etkili parametre kanat yüksekliği olarak tespit edilmiştir. Isı taşınım katsayısı üzerine kanat yüksekliğinin etkisi %7, kanatlar arası mesafenin etkisi %11 ve Reynolds sayısının etkisi %82 olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar Taguchi yöntemiyle tahmin edilen sonuçlarla uyum göstermiştir.

Teşekkür

Yazarların Katkısı

Tüm çalışma yazar tarafından yapılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Alnak, D. E., and Karabulut, K. (2024). Investigation of Heat Transfer Increment in Electronic System Surfaces by Different Air Jet Impingement Applications. *J. Engin. Thermophys.*, 33, 161-185.
- Alnak, Y. (2022). Üçgen biçimli kanatçık yüzeylerde ısı geçişinin nümerik olarak incelenmesi. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 3(1), 37-49.
- Arslanoglu, N., and Yigit, A. (2017). Investigation of efficient parameters on optimum insulation thickness based on theoretical-taguchi combined method. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1824-1831.
- Benhalilou, M., and Kasagi, N. (1999). Numerical prediction of heat and momentum transfer over micro-grooved surface with a nonlinear k-ε model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2525-2541.
- Choi, K., and Hamid, S. (1991). Heat transfer study of riblets. *In Recent Developments in Turbulence Management*, 25-41.
- Choi, K. S., and Orchard, D. M. (1997). Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15, 109-124.

- Comakli, K., Simsek, F., Comakli, O., and Sahin, B. (2009). Determination of optimum working conditions R22 and R404A refrigerant mixtures in heat-pumps using Taguchi method. *Applied Energy*, 86, 2451–2458.
- Dubief, Y., Djenidi, L., and Antonia, R. A. (1997). The measurement of $\partial u/\partial y$ in a turbulent boundary layer over a riblet surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 18, 183-187.
- Karabulut, K. (2019) Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement. *J Comput Electron*, 18, 1259–1271.
- Karabulut, K., and Alnak, D. E. (2021). Dikdörtgen bir kanaldaki farklı desenli yüzey geometrilerinin ısı transferine olan etkilerinin incelenmesi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 183, 37-49.
- Karabulut, K., and Alnak, Y. (2023). Kanaldaki jet akış sayısına bağlı olarak farklı model yüzeylerinden olan ısı transferi ve akış yapısının analiz. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 49-60.
- Karabulut, K., ve Alnak, Y. (2023). Kanallardaki Farklı Yüzeyle Modellerin Üçlü Jet Etkisi ile Soğutulmalarının ve Akış Karakteristiğinin Analizi. *Teknik Meslek Yüksekokulları Akademik Araştırma Dergisi*, 2 (1), 11-18.
- Kline, S. J., and McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3–8.
- Lindemann, A. M. (1985). Turbulent Reynolds analogy factors for nonplanar surface microgeometries. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 22(5), 581-582.
- Stalio, E., and Nobile, E. (2003). Direct numerical simulation of heat transfer over riblets. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 356–371.
- Türkan, B., and Etemoğlu, A. B. (2020). Taguchi metodu kullanılarak gıda kurutulmasına etki eden parametrelerin optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 654-665.
- Ünverdi, M., and Küçük, H. (2019). Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 373-386.
- Walsh, M. J., and Weinstein, L. M. (1979). Drag and heat transfer characteristics of small longitudinally ribbed surfaces. *AIAA Journal*, 17(7), 770-771.
- Wang, J., Lan, S., and Chen, G. (2000). Experimental study on the turbulent boundary layer over riblets surface. *Fluid Dynamics Research*, 27, 217–229.
- Yuan, Z. X. (2000). Numerical study of periodically turbulent flow and heat transfer in a channel with transverse fin arrays. *International Journal of Numerical Methods Heat Fluid Flow*, 10, 842–861.