

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of The Effect of Processing Parameters on Air Fluid Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance by Taguchi Method

Ramazan Çakıroğlu^{a*}, Abdusselam Eken^b, Adem Acır^c

Submitted: 02.05.2022 Revised: 05.07.2022 Accepted: 25.07.2022 doi:10.30855/gmbd.0705013

ABSTRACT

Keywords: Vortex tube, Taguchi, ANOVA, Temperature difference

^{a*} Gazi University,
Vocational School of Technical Sciences
06374 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3120-1599
e mail: rcakiroglu@gazi.edu.tr

^b Gazi University,
Institute of Science and Technology,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6025-1288

^c Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9856-3623

*Corresponding author:
rcakiroglu@gazi.edu.tr

In this study, the feasibility of maximum temperature gradient performance in an air flow Ranque-Hilsch vortex tube was investigated with the help of the Taguchi method. 27 experiments were conducted using three different nozzle types (Inclined, Flower and S type), three different nozzle numbers (4, 5 and 6) and three different system inlet pressure (100, 200 and 300 kPa) parameters. The experiments were carried out using different nozzle types, number of nozzles and inlet pressure to the system. Depending on the determined parameters, maximum temperature differences (ΔT) were obtained. Depending on the experimental data obtained, the highest ΔT values were determined for the most suitable process parameters with the help of the Taguchi method. As a result, for maximum ΔT , the most suitable operating parameters in the Ranque-Hilsch vortex tube with air flow were obtained as A1B1C3 with nozzle type inclined, nozzle number "4" and inlet pressure "300 kPa". In addition, with the ANOVA statistical analysis, the parameter that most affected the ΔT maximum temperature difference was the nozzle type with approximately 92%, while the vortex pressure input was the second parameter with approximately 6%. This study made a significant contribution to the determination of the effects of different types of designed nozzles on ΔT .

Akışkanlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü Performansına İşlem Parametrelerinin Etkisinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi

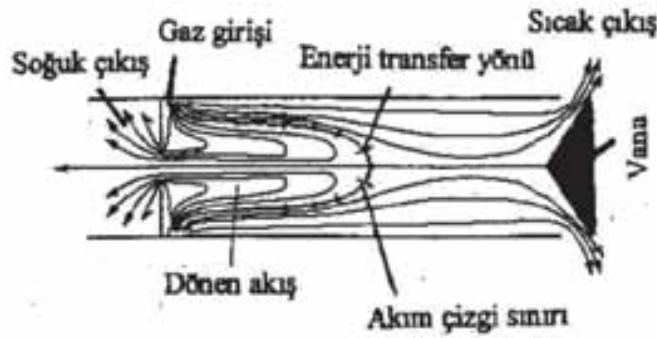
ÖZ

Bu çalışmada, Taguchi metodu yardımıyla hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüpünde maksimum sıcaklık gradyan performansı elde edilebilirliği incelenmiştir. Üç farklı nozul tipi (Eğimli, Çiçek ve S tipi), üç farklı nozul sayısı (4, 5 ve 6) ve üç farklı sisteme giriş basınç (100, 200 ve 300 kPa) parametreleri kullanılarak 27 deney yapılmıştır. Belirlenen parametrelere bağlı olarak maksimum sıcaklık farkları (ΔT) elde edilmiştir. Elde edilen deney verilerine bağlı olarak en yüksek ΔT değerleri Taguchi metodu yardımıyla en uygun işlem parametreleri için belirlenmiştir. Sonuç olarak, maksimum ΔT için hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüpünde en uygun işlem parametreleri nozul tipi eğimli, nozul sayısı "4" ve giriş basıncı "300 kPa" olmak üzere A1B1C3 olarak elde edilmiştir. Ayrıca ANOVA istatistiksel analiz ile ΔT maksimum sıcaklık farkını en fazla etkileyen parametre yaklaşık % 92'lik oranla nozul tipi olurken, vorteks basınç girişi yaklaşık % 6 ile ikinci etki eden parametre olmuştur. Bu çalışma, farklı tiplerde tasarlanan nozulların ΔT üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde önemli katkı sağlamıştır.

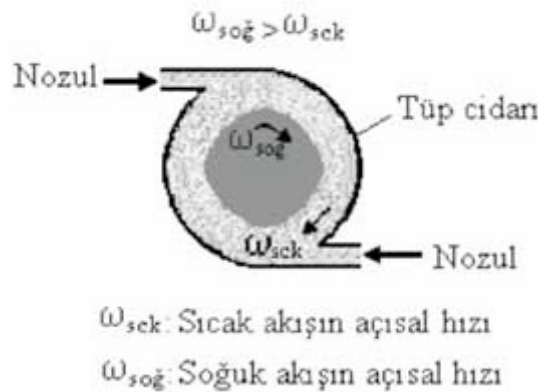
Anahtar Kelimeler: Vortex tüp, Taguchi, Varyans analizi, Sıcaklık farkı

1. Giriş (Introduction)

Vorteks tüpü 1931 yılında George Joseph Ranque tarafından bulunmuş sonrasında Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiş ve bu iki araştırmacının ismini alarak Ranque-Hilsch vorteks tüpü olarak adlandırılmıştır [1]. Vorteks tüpü, kontrol vanası dışında herhangi bir hareketli parçası olmayan sadece tüpe giren basınçlı gaz akışkan kullanılarak çalışan basit bir sistemdir. Bu sistem tüpe teğetsel olarak giren basınçlı gaz akışkanı, sıcak ve soğuk iki farklı akışa ayırarak aynı anda hem ısıtma hem de soğutma işlemi gerçekleştirmektedir [2-4]. Vorteks tüpünün ısıtma ve soğutma fonksiyonunu temel çalışma prensibi Şekil 1 ve 2 'de görüleceği üzere basınçlı akışkan tüpe teğetsel olarak girmektedir. Tüp girişinde basıncın düşürülerek akış hızının artması amacıyla nozul kullanılır. Akış nozuldaki geçtikten sonra hızın artmasıyla akış tüpün silindirik yapısından dolayı dönmeye başlar. Merkezde yüksek açısız hızla dönen akış merkezkaç kuvvetine bağlı olarak tüp cidarına doğru açılır. Böylelikle tüp merkezindeki akışkan ile tüp cidarındaki akışkan arasında basınç farkı oluşur. Momentumun korunumu ilkesi gereği merkezdeki akışın açısız hızı daha yüksek olmaktadır. Dolayısıyla vorteks tüp içerisinde iki farklı hızda dönen akış oluşmaktadır. Merkezdeki akışın daha yüksek hızda olması nedeniyle cidardaki akışı ivmelendirmeye zorlamaktadır. Bu şekilde merkezdeki akıştan cidardaki akışa doğru mekanik enerji transferi gerçekleşir. Mekanik enerjisi azalan merkezdeki akış soğuk akış, merkezden aldığı mekanik enerjiden dolayı cidardaki akış sıcak akış olmaktadır [5].



Şekil 1. Karşıt akışlı vorteks tüp (Counter flow vortex tube) [5]



Şekil 2. Vorteks tüp içerisindeki sıcak ve soğuk akış hareketleri (Hot and cold flow movements in the vortex tube) [5]

Literatürde vorteks tüp performansını etkileyen bazı parametreler üzerinde birden fazla çalışmalar yapılmıştır. Mohammadi ve Farhadi [6] tarafından yapılmış olduğu çalışmada vorteks tüpte performansa etki eden optimum nozul sayısı ve nozul çapının performansa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda, nozul çapları 2, 2.5, 3, 4 mm giriş çaplarına sahip nozullar arasında ise en yüksek performansı sağlayan nozul giriş çapı 2mm olan vorteks tüpün en yüksek performansa sahip olduğu görülmüştür. Pinar vd [7] tarafından yapılan çalışmada Ranque- Hilsch Vorteks tüp performansı Taguchi metodu ile analiz optimize edilmiştir. Yapılan optimizasyonda oksijen, argon ve nitrojen akışkanları için performansa etki eden en iyi vorteks tüp parametreleri belirlenmiştir. Kırmacı [8] tarafından yapılan çalışmada farklı nozul sayısı ve giriş basınçlarında oksijen ve hava için Ranque-Hilsch Vorteks tüplerinde enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda sıcak ve

soğuk çıkışlar için faydalanılabilir enerji parametreleri tespit edilmiştir. Sarifudin ve arkd. [9] tarafından yapılan çalışmada vorteks tüpünün soğuk ve sıcaklık parametrelerini, performans soğutma katsayısını (COP) ve parametrelerin performansa etkisi incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, analizler sonrasında, en optimum soğuk çıkış sıcaklığının basınçlı soğutma uygulanan tüpte 1,5 bar basınç, % 30 ayırışma değerinde 14,07 °C olduğu, optimum COP değerinin basınçlı soğutma uygulanan tüpte 0,5bar basınç ve % 70 ayırışma değerinde 0.119227 olduğu tahmin edilmiştir. Liang vd. [10] tarafından yapılan çalışmada vorteks tüpünde farklı parametreler, nozul sayısı, valf konik açısı ve nozul malzemelerinin soğutma, ısıtma kapasitesi ve ekserji verimliliğini incelenmiştir. Deneylerde reçine paslanmaz çelik, alüminyum alaşım malzemelerden üretilen vorteks üreticilerin verimliliğe etkisi, basınç için 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 MPa, nozul sayısı 2, 3, 4, 5, 6 , soğuk koni açısı 0°, 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, parametreleri uygulanarak en optimum değer gözlemlenmiştir. Subudhi ve Şen [11] tarafından vorteks tüpler üzerine yapılan çalışmalarla ilgili bir derleme yapılmış ve vorteks tüpün optimum performansına yönelik en uygun geometrik ve çalışma parametrelerine (sıcaklık farkı, soğuk kütle fraksiyonu, performans katsayısı ve izentropik verimlilik gibi) göre korelasyonlar sunulmuştur. Dinçer vd. [12] tarafından yapılan çalışmada Ranque- Hilsch Vorteks tüplerde performans analizi yapılmış ve inceleme sonucunda performansa etki eden parametreler belirlenmiştir. Gökçe çalışmasında polyamid ve pirinç malzemelerinden üretilmiş farklı nozul tipi (3, 4, 5 ve 6) ve farklı basınç (200, 350, 500 ve 650 kPa) parametreleri kullanarak deneyler yapmıştır. Deney sonuçlarına göre optimum parametre olarak pirinç malzemede 500 kPa basınçta ve 6 nozul sayısında ΔT değerini (68.4) elde etmiştir. Ayrıca çalışmasında ANOVA ile yaklaşık %92 oranında en etkili parametre olarak basınç parametresinin etki ettiğini ifade etmiştir [13]. Kaya çalışmasında Taguchi metodu yardımıyla üç farklı akışkan türü (hava, oksijen ve karbondioksit), üç farklı giriş basıncı (150, 300 ve 450 kPa) ve üç farklı pirinç ve poliamid malzemeye sahip nozul (3, 4 ve 5) kullanılarak vorteks tüpünün performans göstergesi $\Delta T'$ i hesaplamıştır. Yapılan çalışma sonucunda vorteks tüpünün performansına çalışma basıncı %79.50 oranında etki ettiği belirlenmiştir [14]. Mohammad O. Hamdan vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, boru uzunluğu, çapı ve iç konik açısı vb. parametrelerin vorteks tüpünün enerji ayırışma performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde hava akışkanlı bir vorteks tüpte, hava girişi basıncı 3, 4, 5 ve 6 bar, boru çapları $D=9, 16, \text{ ve } 26 \text{ mm}$ ve boru uzunluğu $L=66, 113 \text{ ve } 158 \text{ mm}$ için optimum performans araştırılmıştır. Yapılan çalışma şartları için optimum performansın 113 mm uzunluk, 16 mm çap ve 4°den küçük iç konik açı için elde edilmiştir [15]. Kaya (2020) tarafından Taguchi yöntemi kullanılarak paralel bağlı vorteks tüpü sisteminin performansını etkileyen faktörler için optimizasyon prosedürü içeren deneysel çalışmada basınçlı akışkan olarak hava, oksijen ve karbondioksitin kullanılmıştır. 3,4 ve 5 nozul numarasına sahip polyamid ve pirinç malzemededen oluşan nozullarla giriş basınç değerleri 150, 300 ve 450 kPa olarak uygulanmıştır. Bu parametreler kontrol parametreleri olarak seçilmiş ve deney tasarımında Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Vorteks tüpünün performans göstergesi olarak ΔT değeri için Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyon çalışmasında yüzde 79.5 değerle en önemli kontrol faktörünün çalışma basıncı olduğu belirtilmiştir. ΔT değeri üzerine etki eden diğer parametrelerin önem sırasıyla; basınçlı akışkan tipi, nozul sayısı ve nozul malzemesi olduğu görülmüştür [14]. Pinar vd (2009) tarafından Taguchi yöntemi ile karşı akışlı bir girdap tüpündeki proses parametrelerinin sıcaklık farkı üzerindeki etkisi ve optimizasyonunun araştırıldığı deneysel çalışmada, giriş basıncı 150, 400, 650kPa, nozul sayısı 2,4, 6 ve 0.5 , 0.6 , 0.7 soğuk kütle fraksiyonu koşulları altında gerçekleştirilen deneyler Taguchi'nin L27 ortogonal dizisine göre planlanmıştır. Varyans analizi ve regresyon analizi ile faktörlerin ve etkileşimlerinin sıcaklık farkı üzerindeki etkileri belirlenmiş ve %93.5 korelasyon katsayısı ile modellenmiştir. Sıcaklık farkının giriş basıncındaki artışla birlikte arttığı, nozul sayısındaki artışla soğuk kütle fraksiyonu ile azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık farkı değeri için optimum parametrelerin 650 kpa'lık bir giriş basıncı, 2'lik bir nozul sayısı ve 0.7'lik bir soğuk kütle fraksiyonu olması gerektiğini ifade etmişlerdir [16]. Gokce (2020) Ø10 mm iç çapa ve 100 mm gövde uzunluğuna sahip sıcak sıvı çıkışı tamamen açık bırakılmış ters akışlı vorteks tüp kullandığı deneysel çalışmasındaki 50 kPa artışlarla 200-550 kPa değerleri arasında değişen basınç değerleri paralel ve seri bağlantı tipi, pirinç ve polyamid malzemededen vorteks üretici, 4 ve 6 nozul sayısı parametreleri ile yaptığı optimizasyonda Taguchi L16 mix tipi deney seti kullanılmıştır. Performans göstergesi olan ΔT değeri için yapılan ANOVA uygulaması sonucunda, ΔT değerinin en çok giriş basıncı değerinden etkilendiği bu değeri etkileyen diğer parametreler bağlantı türü, nozul sayısı ve malzeme türü olarak sıralandığı tespit edilmiştir [17].

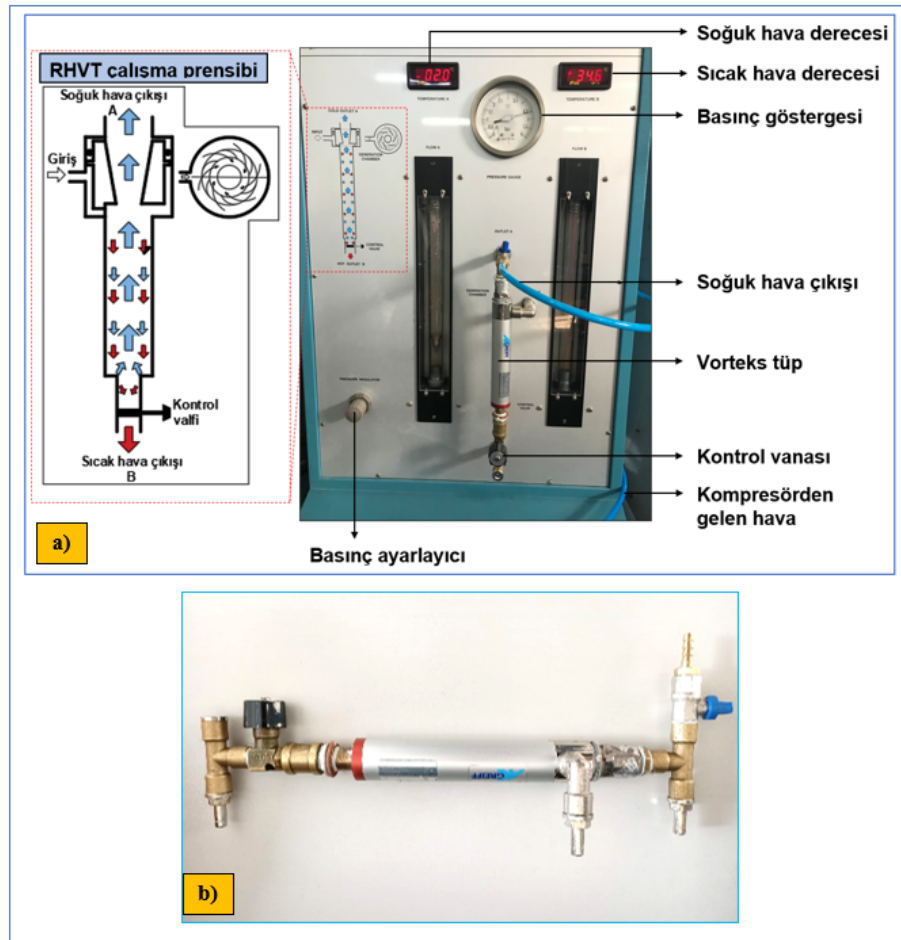
Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı yenilikçi yön olarak eğimli, çiçek ve "S" yapılı nozullar tasarlanmıştır. Literatürde verilen yaygın tip nozullara göre yeni tip bir yaklaşım olarak çiçek ve "S" yapılı nozulların vortex tüp performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Hava

akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüpünde yeni tip farklı nozul tipi (eğimli, çiçek ve "S" yapılı), farklı nozul sayısı (4,5 ve 6) ve sisteme giriş basıncı (1,2 ve 3 bar) kullanılarak Taguchi metodu yardımıyla maksimum sıcaklık gradyan performansı (ΔT) araştırılmıştır. Belirlenen parametrelere bağlı olarak, en uygun işlem parametreleri ANOVA analizi ile belirlenmiştir.

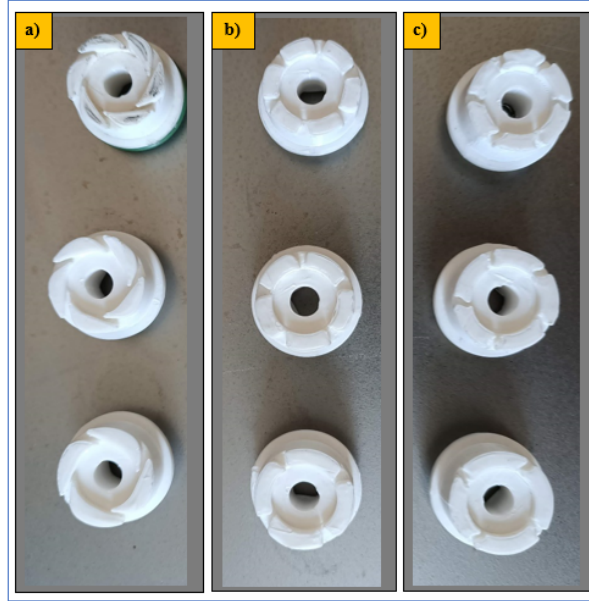
2. Materyal Metot (Material Method)

2.1. Deneysel çalışma (Experimental study)

Deneyler Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Şekil 1'de gösterilen \varnothing 10 mm iç çapı ve 320 mm gövde uzunluğunda karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü deney seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada Şekil 2'de görüldüğü gibi vorteks üreteç olarak üç farklı tip yapı kullanılmıştır. Bu yapı tipleri literatüre bağlı olarak eğimli, çiçek ve "S" yapılı olarak belirlenmiştir. Polyamid plastik kullanılarak vorteks üreteçler 3-D printer aracılığıyla üretilmiştir. Belirlenen bu yapı tiplerinin Ranque-Hilsch vorteks tüpü performansına etkisi amaçlanmıştır. Ranque-Hilsch vorteks tüpünde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Hava sisteme farklı basınçlarda kompresör yardımıyla iletilmiştir. Bunun yanısıra, farklı sisteme giriş basınçları (1, 2 ve 3 bar) ve nozul sayıları (4, 5 ve 6) değiştirilerek farklı yapıdaki vorteks üreteçlere bu parametrelerin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerde, vorteks tüpünden çıkan sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıkları deney sistemi üzerinde bulunan ± 1 °C hassasiyetteki dijital termometreler yardımıyla ölçülmüştür. Deney sistemindeki debileri kontrol edebilmek amacıyla bir kontrol vanası kullanılmaktadır. Kontrol vanası çalışma şartları (açma-kapama) yardımıyla, Vorteks tüpü sıcak (T_h) ve soğuk (T_c) akışkanın sıcaklıkları arasındaki fark ($T_h - T_c$) incelenmiştir. Deneylerde sıcak ve soğuk çıkış sıcaklık ölçüm değerleri sabitlenene kadar uygulanmış ve deneysel sonuç verileri elde edilmiştir.



Şekil 1. a) Vorteks cihazı, b) Kullanılan Ranque-Hilsch vorteks tüpü (a) Vortex device, b) Ranque-Hilsch vortex tube used)



Şekil 2. 4, 5 ve 6 nozula sahip, a) eğimli, b) çiçek ve c) "S" yapılı tipteki vorteks üreteçleri (Vortex generators with 4, 5 and 6 nozzles, a) inclined, b) flower and c) "S" structure type)

2.2. Metot (Method)

Ranque-Hilsch vorteks tüpünde soğutma (ΔT_{sgk}) ve ısıtma (ΔT_{sck}) etkileri sırasıyla eşitlik 1,2 ve 3'te verilmiştir [7, 8, 11, 12, 18, 19]:

$$\Delta T_{sgk} = T_{gir} - T_{sgk} \quad (1)$$

$$\Delta T_{sck} = T_{sck} - T_{gir} \quad (2)$$

burada T_{gir} vorteks tüpü giriş sıcaklığı, T_{sgk} vorteks tüpünde soğuk ucun çıkış sıcaklığı ve T_{sck} vorteks tüpün sıcak ucun çıkış sıcaklığıdır. Genel olarak Ranque-Hilsch vorteks tüp performansı, ısıtma etkisi ile soğutma etkisi arasındaki fark olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak, Ranque-Hilsch vorteks tüp performans denklemini aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\Delta T = T_{sck} - T_{sgk} \quad (3)$$

Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını tanımlayan sıcaklık gradyanı, " T_{sck} " sıcak çıkış sıcaklığı ile " T_{sgk} " soğuk çıkış sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı olarak tanımlanmıştır [7, 8, 11, 12, 19].

3. Taguchi Metodu ile Analiz (Analysis with the Taguchi Method)

3.1. Sinyal/Gürültü (S/N) analizi (Signal/Noise (S/N) analysis)

Tablo 1'de verilen işlem parametrelerine bağlı olarak her bir deneyden elde edilen en yüksek sıcaklık farkı (ΔT) elde edilmiştir. Tasarıma bağlı olarak elde edilen deneysel ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel tasarım işlem parametre seviyeleri (Experimental design process parameter levels)

Sembol	Parametreler	Seviyeler		
		1	2	3
A	Nozul tipi	Eğimli	Çiçek	S tipi
B	Nozul sayısı	4	5	6
C	Basınç (kPa)	100	200	300

Tablo 1'de verilen işlem parametrelerine bağlı olarak her bir deneyden elde edilen en yüksek sıcaklık

farkı (ΔT) değerleri Taguchi metodu yardımıyla optimize edilmiştir. En uygun işlem parametrelerinin belirlenmesinde S/N (Signal/Noise) sinyal gürültü oranı Eşitlik (4)'de belirtildiği gibi, "en büyük en iyi" fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır [20-25].

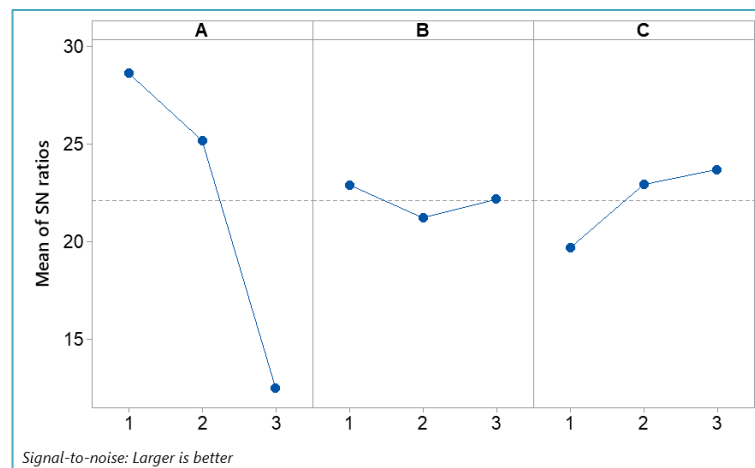
$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

Bu eşitlikte y_i : Performans yanıtının i . gözlem değeri, n : bir denemede test sayısını tanımlamaktadır. Elde edilen deney sonuçları yardımıyla işlem parametreleri için optimum değişkenler S/N oranlarına bağlı olarak tahmin edilmiştir. Şekil (3)' de maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranı verilmiştir.

Tablo 2. Deney sonuçları ve S/N oranları (Experiment results and S/N ratios)

Deney numarası	Nozul tipi	Nozul sayısı	Basınç	Sıcaklık farkı (ΔT)	S/N oranı (dB)
1	1	1	1	21.3	26.5676
2	1	1	2	31	29.8272
3	1	1	3	36.4	31.2220
4	1	2	1	18.4	25.2964
5	1	2	2	25.6	28.1648
6	1	2	3	29	29.2480
7	1	3	1	21.3	26.5676
8	1	3	2	30.5	29.6860
9	1	3	3	35.1	30.9061
10	2	1	1	14.1	22.9844
11	2	1	2	20.3	26.1499
12	2	1	3	22.1	26.8878
13	2	2	1	13.7	22.7344
14	2	2	2	20	26.0206
15	2	2	3	23.4	27.3843
16	2	3	1	12.9	22.2118
17	2	3	2	18.5	25.3434
18	2	3	3	21.7	26.7292
19	3	1	1	3.9	11.8213
20	3	1	2	5.2	14.3201
21	3	1	3	6.5	16.2583
22	3	2	1	2.5	7.9588
23	3	2	2	4	12.0412
24	3	2	3	4	12.0412
25	3	3	1	3.5	10.8814
26	3	3	2	5.4	14.6479
27	3	3	3	4.2	12.4650

Şekil (3)' de maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için işlem parametreleri için yapılan optimizasyonla yapılacak test çalışmalarında en iyi çalışma performans parametresi belirlenmiştir. " ΔT " maksimum sıcaklık farkı için yapılan optimizasyonda Şekil 3'den yararlanarak uygun çalışma parametreleri "A1B1C3" olarak bulunur. Burada, eğimli nozul tipi "A1", nozul sayısı "B1" (4 kanal) ve vorteks giriş basıncı "C3" (300 kPa) tür.



Şekil 3. Maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için S/N oranları ana etki grafiği (S/N ratios main effect plot for maximum temperature difference (ΔT) values)

3.2. Sıcaklık gradyanı (ΔT) için ANOVA sonuçları (ANOVA results for temperature gradient (ΔT))

ANOVA, istatistiksel varyans analizi yapan bir yöntem olup deneysel tasarımlarda belirlenen çalışma parametrelerinin etki durumlarının hangi faktör ve seviyeleri cinsinden ne derece etkili olduğunun belirlenmesini ortaya koymaktadır. Hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını etkileyen parametrelerin faktör ve seviyeleri cinsinden belirlemek amacıyla yapılan deneysel tasarımda 27 deney yapılmış ve her bir ölçüm sonucunda Eşitlik (3) te tanımlandığı gibi ΔT maksimum sıcaklık farkı ölçülmüştür. İşlem parametrelerinin Ranque-Hilsch vorteks tüp performansına etki seviyesi (PCR) Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanmıştır [20–25].

$$PCR = \left(\frac{SS_A - (V_e) \cdot (V_A)}{SS_T} \right) \times 100 \quad (4)$$

Tablo 3 incelendiğinde ΔT maksimum sıcaklık farkını en fazla etkileyen parametrenin yaklaşık % 92'lik oranla nozul tipi belirlerken, vorteks basınç girişi yaklaşık %6 ile takip etmektedir. Nozul yapıları kendi aralarında ΔT maksimum sıcaklık farkı için değerlendirildiğinde eğimli nozul, çiçek ve S tipi nozula göre daha iyi değerlere sahip olmasının nedeni olarak teğetsel hızlarla olan ilişki olarak açıklanabilecektir.

Tablo 3. Maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for maximum temperature difference (ΔT) values)

Parametre	SD	KT	KO	F	P	% PCR
Nozul tipi	2	1296.36	648.178	726.43	0	91.9
Nozul sayısı	2	12.82	6.41	7.18	0.004	0.783
Basınç	2	81.63	40.816	45.74	0	5.668
Hata	20	17.65	0.892			1.646
Toplam	26	1408.65				

SD: Serbestlik Derecesi; KT: Kareler Toplamı; KO: Karelerin Ortalaması PCR:Yüzde Katkı Oranları

3.3. Doğrulama test verileri (Validation test data)

Deneysel tasarımlarda Taguchi metodu yardımıyla ANOVA analiz sonuçlarına göre, en iyi işlem parametreleri belirlenmektedir. Yapılan analizlere göre tahmin edilen en uygun parametreler belirlenerek, sonrasında deney tasarım optimizasyonuna doğrultusunda doğrulama testleri gerçekleştirilmekte ve belirlenen optimum parametrelerin doğruluğu kontrol edilmektedir. ANOVA analizlerine göre elde edilen ΔT maksimum sıcaklık farkı için "A1B1C3" parametreleri kullanılarak, tekrarlayan (3 adet) kontrol deneyleri deney sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilen sonuçların güvenilirliği incelenmiştir [26, 27] ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Maksimum sıcaklık farkı (ΔT) için doğrulama test sonuçları (Confirmation test results for maximum temperature difference (ΔT))

	Başlangıç parametresi	Optimum parametreleri	
		Tahmin	Deney
Seviye	A2B3C1	A1B1C3	A1B1C3
ΔT (°C)	18.5	32.0889	36.4
S/N oranı (dB)	25.3434	31.0098	31.2220
İyileştirme oranı S/N	5.8786 dB (%18.83)		

Doğrulama deneyleri sonunda ΔT maksimum sıcaklık farkı için iyileştirme oranı 5.8786 dB (%18.83) olarak elde edilmiştir.

4. Sonuçlar (Consequences)

Hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını belirlemek üzere ΔT maksimum sıcaklık farkı için deneysel bir çalışma yapılmış olup, bu araştırma bulguları aşağıda verilmiştir:

- Eğimli nozul tipi, çiçek ve S tipi nozul yapısına göre daha fazla maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri elde edilmiştir. S tipi nozul yapısında en düşük sıcaklık farkı (ΔT) elde edilmiştir.
- Nozul tipleri için vorteks giriş basıncı ve nozul sayısı arttıkça maksimum sıcaklık farkı (ΔT)

değerleri artış kendi arasında göstermiştir.

- Taguchi deney tasarımına bağlı olarak en iyi çalışma parametresi “ ΔT ” maksimum sıcaklık farkı için eğimli nozul tipi “A1”, nozul sayısı “B1” (4 kanal) ve vorteks giriş basıncı “C3” (300 kPa)’da “A1B1C3” olarak hesaplanmıştır.
- ΔT maksimum sıcaklık farkını en fazla etkileyen parametre yaklaşık % 92’lik oranla nozul tipi belirlerken, vorteks basınç girişi yaklaşık % 6 ile takip etmektedir. En yüksek sıcaklık farkı sonucu eğimli tip nozul yapısı vermiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] V. Kirmaci, “Seri ve Paralel Bağlı Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpün Isıtma- Soğutma Performansının Karşılaştırılması,” The Comparison of Heating and Cooling Performance of a Serial and Parallel Connected Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube, 2017, doi:10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.332249.
- [2] V. Kirmaci, “Altı Nozullu Vorteks Tüpünün Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, c. 10, s. 4, ss. 377-381, 2007.
- [3] M. Yılmaz, Ö. Çomaklı, M. Kaya, ve S. Karşı, “Vorteks tüpleri: 1 Teknolojik gelişim,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, s 553, ss. 46-54, 2006.
- [4] M. Yılmaz, Ö. Çomaklı, M. Kaya, ve S. Karşı, “Vorteks tüpleri: 2 enerji ayrışma mekanizması ve performans,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, s. 554, ss. 42-51, 2006.
- [5] K. Dincer, Ş. Başkaya, V. Kirmaci, H. Usta, ve B. Z. Uysal, “Akışkan olarak hava, oksijen, karbondioksit ve azot kullanılan vorteks tüpün performansının incelenmesi,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, s. 560, ss. 36-40, 2006.
- [6] S. Mohammadi and F. Farhadi, “Experimental analysis of a Ranque-Hilsch vortex tube for optimizing nozzle numbers and diameter,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 500-506, 2013. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.07.043
- [7] A. M. Pinar, O. Uluer, and V. Kirmaci, “Optimization of counter flow Ranque-Hilsch vortex tube performance using Taguchi method,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 6, pp. 1487-1494, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.02.018
- [8] V. Kirmaci, “Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 7, pp. 1626-1633, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.04.007
- [9] A. Sarifudin, D. S. Wijayanto, and I. Widiastuti, “Parameters optimization of tube type, pressure, and mass fraction on vortex tube performance using the Taguchi method,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 597-604, 2019. doi:10.18280/ijht.370230
- [10] F. Liang, G. Tang, C. Xua, and vd, “Experimental investigation on improving the energy separation efficiency of vortex tube by optimizing the structure of vortex generator,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 195, pp. 117222, 2021. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117222
- [11] S. Subudhi and M. Sen “Review of Ranque-Hilsch vortex tube experiments using air,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 172-178, 2015, doi:10.1016/J.RSER.2015.07.103
- [12] K. Dinçer, S. Baskaya, B. Z. Uysal and I. Uçgul, “Experimental investigation of the performance of a Ranque-Hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet,” *International journal of refrigeration*, vol. 32, no. 1, pp. 87-94, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.06.002
- [13] H. Gokce, “Evaluation and Optimization of O2 Used Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 43, no. 13, pp. 1566-1576, 2021, doi:10.1080/15567036.2020.1817188
- [14] H. Kaya, “Evaluation of performance of parallel connected vortex tubes using air, oxygen and carbondioxide with Taguchi method,” *Heat Mass Transfer*, vol. 57, no. 1, pp. 165-174, 2021. doi:10.1007/s00231-020-02968-w
- [15] M. O. Hamdan, S.-A. B. Al-Omari, and A. S. Oweimer, “Experimental study of vortex tube energy separation under different tube design,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 91, pp. 306-311, 2018. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.034
- [16] A. M. Pinar, O. Uluer, and V. Kirmaci, “Statistical Assessment of Counter-Flow Vortex Tube Performance for Different Nozzle Numbers, Cold Mass Fractions, and Inlet Pressures Via Taguchi Method,” *Experimental Heat Transfer*, vol. 22, no. 4, pp. 271-282, 2009. doi:10.1080/08916150903099058
- [17] H. Gökçe, “Optimization of Ranque-Hilsch vortex tube performances via Taguchi method,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 11, pp. 1-11, 2020, doi:10.1007/s40430-020-02649-z
- [18] S. Eiamsa-ard and P. Promvong, “Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 7, pp. 1822-1842, 2007. doi:10.1016/j.rser.2007.03.006

- [19] P. K. Singh, R. G. Tathgir, D. Gangacharyulu and G. S. Grewal, "An experimental performance evaluation of vortex tube," *IE(I) J-MC*, vol. 84, pp. 149-153, 2004.
- [20] W. H. Yang and Y. S. Tarn, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 84, no 1, pp. 122-129, 1998, doi:10.1016/S0924-0136(98)00079-X
- [21] R. Çakıroğlu and A. Acır, "Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method," *Measurement*, vol. 46, no. 9, pp. 3525-3531, 2013. doi:10.1016/j.measurement.2013.06.046
- [22] A. Acır, M. E. Canlı, İ. Ata and R. Çakıroğlu, "Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis," *Applied Thermal Engineering*, vol. 122, pp. 330-338, 2017.
- [23] İ. Ata ve A. Acır, "Hava akışkanlı güneş kolektöründe ısı transferi iyileştirmesine etki eden parametrelerin taguchi metodu ile optimizasyonu," *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no.2, pp. 527-535, 2020. doi:10.2339/politeknik.525884
- [24] O. K. Çinici, M. E. Canlı, R. Çakıroğlu and A. Acır, "Optimization of melting time of solar thermal energy storage unit containing spring type heat transfer enhancer by Taguchi based grey relational analysis," *Journal of Energy Storage*, vol. 47, pp. 103671, 2022. doi:10.1016/j.est.2021.103671
- [25] M. B. Özdemir and A. Acır, "Optimization of the effective parameters on ground-source heat pumps for space cooling applications using the taguchi method," *Heat Transfer Research*, vol. 51, no. 6, 2020.
- [26] N. Yaşar, M. Günay, E. Kılık, and H. Ünal, "Multiresponse optimization of drillability factors and mechanical properties of chitosan-reinforced polypropylene composite," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, s. 0892705720939163, 2020, doi:10.1177/0892705720939163
- [27] R. Çakıroğlu and M. Günay, "Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7305-7317, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.04.060

This is an open access article under the CC-BY license

