



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

KARŞIT AKIŞLI VORTEKS TÜPÜ SOĞUTMA PERFORMANSINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN HAD YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

**HASAN MELİH KINAGU
MUSTAFA MUTLU
MEHMET GÖKÇEDAĞLIOĞLU
ERMETAL**

**MEHMET ÖZGÜN KORUKÇU
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ**

KARŞIT AKIŞLI VORTEKS TÜPÜ SOĞUTMA PERFORMANSINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN HAD YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Investigation of Parameters That Affect the Cooling Performance of a Counter-Flow Vortex Tube using CFD Method

Hasan Melih KINAGU
Mustafa MUTLU
Mehmet Özgün KORUKÇU
Mehmet GÖKÇEDAĞLIOĞLU

ÖZET

Vorteks tüpleri, hareketli aksamı ve basınçlı gaz dışında enerji girdisi olmayan basit bir sıcaklık ayırıştırma cihazı olup, çalışılan gaz sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı sıcaklık profiline ayrılmakta ve tüpten tahliye edilmektedir. Literatürde vorteks tüpü üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle tüp geometrisi ve giriş basıncı gibi proses şartlarının incelenmesine karşın vorteks tüpü yüzeylerinden olan ısı transferinin tüp performansı üzerindeki etkisine yönelik sınırlı sayıda bilgi bulunmaktadır. Bu çalışmada, karşıt akışlı bir vorteks tüpünün soğutma performansı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. ANSYS FLUENT paket programı ile gerçekleştirilen 3 boyutlu sayısal analizlerde standart $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmış, literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Giriş sıcaklığı, giriş debisi ve soğuk çıkış/tüp çapı (D_c/D) oranının yanı sıra, tüp yüzeyinden olan ısı transferinin soğutma performansı üzerindeki etkisi de incelenmiş; soğuk çıkış sıcaklık farkının yüksek olması için giriş sıcaklığı, debisi ve tüp yüzeyinden çevreye olan ısı transferinin yüksek, D_c/D oranının ise düşük olması gerektiği tespit edilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, gelecek dönemdeki vorteks tüpü araştırmalarında kullanılarak daha verimli vorteks tüplerinin imal edilmesine ve kullanım alanının yaygınlaşmasına katkıda bulunabilir. Daha verimli vorteks tüplerinin geliştirilmesiyle, bu cihazların sanayi uygulamalarında kullanılması daha ekonomik hale gelecektir.

Anahtar Kelimeler: Vorteks tüpü, Isı transferi, Sayısal Analiz, Giriş basıncı, Sıcaklık Ayırıştırma, Soğutma.

ABSTRACT

Being a temperature separation device, vortex tube does not consist of have any moving part and it needs only compressed gas as an energy input. The working gas is separated into hot and cold profile and discharged from the tube. While process conditions like inlet pressure and temperature are investigated in vortex tube researches there are limited studies how heat transfer rates being from the tube surface affect the performance of the vortex tubes in literature. In this study, the cooling performance of counter-flow vortex tube was investigated with using computational fluid dynamics (CFD) method. Standard $k-\epsilon$ turbulence model was used in 3 dimensional numerical analysis by using ANSYS FLUENT software and results being compatible with experimental studies are obtained. Not only effects of inlet pressure, temperature and cold exit to tube diameter ratio (D_c/D) were investigated but also effects of heat transfer from tube surfaces were evaluated. It is found that, in order to obtain high temperature difference between inlet and cold outlet, inlet temperature, flow rate and heat transfer from vortex tube surfaces to environment should be high whereas D_c/D ratio should be low. Results of this study can be used to design more efficient vortex tubes and can contribute to common

usage in several areas. This kind of devices will be more profitable in industrial applications by developing more effective vortex tubes.

Key Words: Vortex tube, Heat transfer, Numerical analysis, Inlet pressure, Temperature separation, Cooling.

1. GİRİŞ

Vorteks tüplerinde sıcak ve soğuk olmak üzere iki ayrı akış profili oluşturmak için kuru ve basınçlı gaz girişi dışında bir enerji girdisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Basınçlı gaz, tüp iç geometrisine çok yüksek hızlarda teğetsel olarak girmekte, sıcak ve soğuk olarak iki farklı bölgeye ayrılmakta ve tüpten dışarı çıkmaktadır [1]. Sıcak ve soğuk gazlar paralel akışlı vorteks tüplerinde aynı yüzeyden eş eksenli olarak, karşıt akışlı vorteks tüplerinde ise zıt yüzeylerden yine eş eksenli olarak çıkmaktadır. Küçük ebatlarda olması, hiçbir hareketli aksam barındırmaması, basit bir geometriye sahip olması, ilk yatırım ve bakım maliyetinin düşük olması gibi avantajları bulunan vorteks tüplerinin dezavantajları arasında hazır basınçlandırılmış hava kaynağı gerektirmesi, gürültülü çalışmaları ve düşük ısı verime sahip olmaları gibi unsurlar sayılabilir [2].

Tüp uzunluğu, tüp çapı, lüle çapı, orifis çapı, uzunluk/çap (L/D) oranı gibi geometrik parametreler, vorteks tüpü soğutma performansına etki etmektedir. Im ve Yu, ters akışlı bir vorteks tüpünün enerji ayrıştırma mekanizmasını farklı geometrik parametrelerin ve giriş basıncının etkisinde deneysel olarak incelemişlerdir. Yapısal parametrelerin lüle alan oranı, kısılma vanası uzunluğu/koniklik açısı, orifis çapı ve tüp uzunluğu olarak verildiği araştırmada sıcaklık ve debi değerleri ısılıçiftler ve debimetre ile takip edilirken ana çıktılar soğuk ve sıcak hava debilerinin oranı ve soğuk-sıcak hava akış sıcaklıkları olarak tanımlanmıştır [3]. Bovand vd. soğuk tarafta yer alan orifis çapını 7-11 mm aralığında değiştirerek soğuk hava debisinin farklı seviyelerinde deneyler yürütmüşlerdir. Basınç, debi ve sıcaklık değerlerinin ölçüldüğü deneysel çalışmalara ait sonuçları Varyans Analizi (Analysis of Variance, ANOVA) yöntemi ile istatistiksel analize ve optimizasyon çalışmasına tabi tutmuşlardır [4]. Vorteks tüpü operasyonunu optimize etmeye yönelik bir araştırma yürüten Sadi ve Gord, soğuk taraftaki orifis çapı ile açısının ve lüle alanının soğutma performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişler, lüle alanının etkisinin olmadığını ve orifis çapı ile açısındaki artışın soğuk akış debisini arttırarak sıcaklığını düşürdüğünü tespit etmişlerdir [5]. Ameri ve Behnia, vorteks tüp operasyonu üzerinde etkili yapısal parametreleri belirlemeye yönelik yürüttükleri nümerik araştırmalarında ANSYS FLUENT paket programını kullanmışlardır. Tüpün L/D oranı, lüle sayısı ve orifis çapı ile tüp çapı oranının etkili unsurlar olarak tanımlandığı araştırmada soğuk taraf çıkış sıcaklığı ile vorteks tüp verimi ana belirleyici bulgular olarak ifade edilmiştir [6]. Pourmahmoud vd. vorteks tüpüne ikinci bir girdap oluşturucu montajının soğutma yeteneğine katkısını ANSYS FLUENT paket programı kullanarak nümerik olarak incelemiş, ikinci girdap oluşturucunun neden olduğu sıcaklık dağılımı üzerine yorum yapmışlardır [7]. Pourmahmoud vd. soğuk akış tarafındaki lülenin daralma açısının soğutma performansı üzerindeki etkilerini inceleme altına almışlar ve optimum değer 2° olduğunu ifade etmişlerdir [8]. Kandil ve Abdelghany, vorteks tüpü uzunluğu ile orifis geometrisinin soğutma performansı üzerindeki etkilerini ANSYS FLUENT paket programı ile k-ε türbülans modelini kullanarak incelemişler, soğutma performansı üzerindeki etkilerini yorumlamışlardır [9]. Vorteks tüpünün lüle sayısı, lüle çapı, soğuk tarafın orifis çapı gibi yapısal parametrelerinin soğutma performansı üzerindeki etkilerini ANSYS FLUENT paket programı ile inceleyen Mohammadi ve Farhadi, maksimum soğutma için optimum soğuk akış debi oranını tespit etmeyi amaçlamışlardır [10]. Tüp gövdesine eğrilik verilmiş vorteks tüpü operasyonunu ANSYS FLUENT paket programı ile inceleyen Bovand vd. eğrilik kaynaklı meydana gelen ikincil girdapların soğuk ve sıcak akışların karışmasına neden olduğunu ve buna bağlı olarak da vorteks tüpünün soğutma kapasitesinde azalma olduğunu belirlemişlerdir [11].

Vorteks tüpünün giriş basıncı, giriş sıcaklığı, soğuk akış debi oranı vb. çalışma koşulları da soğutma performansına doğrudan etki etmektedir. Bovand vd. giriş basıncını 2-3 bar aralığında değiştirerek toplam debinin basınç, debi ve sıcaklık değerleri üzerindeki etkilerini incelemiştir [4]. Xue vd. vorteks tüpü içerisinde soğuk ve sıcak akışın olduğu kesimlerde eksenel ve radyal pek çok noktadan hız, sıcaklık ve basınç ölçümü alarak vorteks tüpü operasyonunun momentum ve termal karakteristiğini

farklı yapısal alternatifler için tartışmışlar ve detaylı olarak incelemişlerdir [12]. Gutak, vorteks tüpünü bir doğal gaz akışında kullanmış, giriş basıncının artırılması ile sıcak ve soğuk taraflardaki sıcaklık değişimlerini ve soğuk akış debisini gözlemlemiştir. Soğuk çıkıştaki en düşük sıcaklığın, soğuk taraf debi oranı 0.2-0.4 arasında gözlemlendiği raporlanmıştır [13]. Yusof vd. vorteks tüpü üzerinde yürüttükleri deneyler ile soğuk taraftaki çıkış basıncının atmosfer değerinin üzerinde veya altında olabileceğini belirlemişler, soğuk çıkış debisindeki artışın yüksek çıkış basıncı oluşturduğunu ve bu durumun soğutma performansını olumsuz etkilediğini tespit etmişlerdir [14]. Aydın ve Baki, yapısal parametrelere ilave olarak kullanılacak gazın performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. 3 ile 5 bar giriş basıncı aralığında hava, oksijen ve azot ile deneyler yürütmüşler, en yüksek soğutma performansının azot ile elde edildiğini raporlamışlardır [15]. Pourmahmoud vd. soğutma seviyesinin giriş basıncı ile değişimini hız, sıcaklık ve basıncın radyal profilleri üzerinden nümerik olarak incelemişlerdir [7]. Kandil ve Abdelghany, yaptıkları nümerik çalışmada tüp yüzeyindeki ısı şartlarının soğutma performansı üzerindeki etkili olduğunu tespit etmişlerdir [9]. Ramakrishna vd. farklı malzemelerden imal edilmiş vorteks tüpleri üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerde, yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerden imal edilen tüplerde soğutma performansının düştüğünü tespit etmişlerdir [16]. Vorteks tüpünün soğutma performansını arttırmayı hedefleyen Sadi ve Gord, vorteks tüpü sıcak çıkışındaki gazı vorteks tüpünün dış kısmına eş eksenli adapte edilmiş bir kanala yönlendirmiş ve soğutma seviyesini %24 oranında arttırmışlardır [17]. Thakare ve Parekh, ANSYS FLUENT paket programı ile yürüttükleri nümerik araştırmalarında 8 farklı gaz ile çalışarak ısı yayılım, Prandtl sayısı, gaz sabiti ve ısı iletimlik parametrelerinin vorteks tüpü enerji ayrıştırma kabiliyeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Standart k-ε ve k-ω türbülans modellerinin uygulandığı araştırmada gaz sabitindeki artışın enerji ayrıştırma mekanizmasını zayıflattığını, ısı iletimlik ve ısı yayılımının ise güçlendirdiğini tespit etmişlerdir [18].

Bu çalışmada ANSYS FLUENT 15.0 paket programı kullanılarak yürütülen sayısal analizlerde, giriş sıcaklığı, giriş debisi, soğuk çıkış çapının tüp çapına (D_c/D) oranı ve tüp yüzeyinden çevreye gerçekleşen ısı transfer miktarı parametrelerinin vorteks tüpü soğutma performansı üzerindeki etkileri soğuk çıkış sıcaklık farkı ve soğutma yükü üzerinden incelenmiştir. Her bir parametre için üçer seviye seçilmiş ve her seviye için ayrı analizler yürütülmüştür.

2. MATERYAL ve METOD

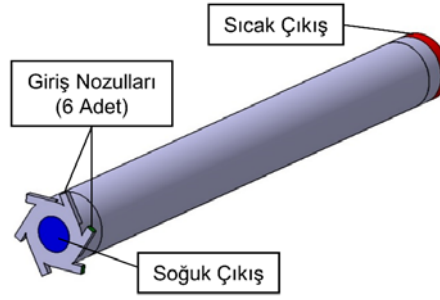
Bu çalışmada yürütülen karşıt akışlı vorteks tüpü analizlerinde Skye vd. [19] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları dikkate alınmıştır. Söz konusu çalışmanın yürütüldüğü geometrik model üç boyutlu şekilde oluşturulmuş, ağ yapısı kurulmuş, doğrulama ile birlikte ağdan bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilmiş ve her bir parametre seviyesi için analizler yürütülüp sonuçlar referans alınan çalışmada elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada incelenen parametreler ve seviyeleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. İncelenen parametreler ve parametre seviyeleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Giriş Sıcaklığı	284,2 K	294,2 K	304,2 K
Giriş Debisi	0,00668 kg/s	0,00835 kg/s	0,1002 kg/s
Soğuk Çap / Tüp Çapı Oranı (D_c/D)	0,48	0,54	0,61
Isı Transfer Miktarı	0 W/m ² K	100 W/m ² K	1000 W/m ² K

2.1. Geometri

Vorteks tüpüne ait 3 boyutlu model Skye vd. [19] tarafından yürütülen deneysel çalışmaya ait geometrik veriler kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 1). Birbirinden ayrı altı adet giriş yüzeyi, sıcak orifis ve soğuk orifis olmak üzere eş eksenli iki adet çıkış yüzeyi ve içerisinde çalışılan gaz akışının gerçekleştiği vorteks tüp yüzeyleri bulunan modele ait geometrik ölçüler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. HAD analizlerinde kullanılan modele ait perspektif görüntü

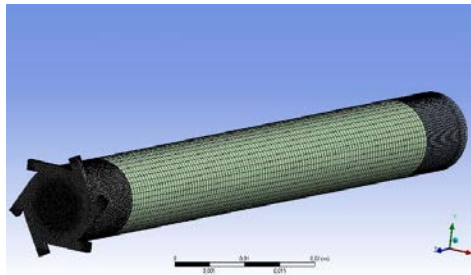
Tablo 2. HAD analizlerinde kullanılan modele ait geometrik ölçüler

Ölçüler	Deneysel VT Verileri [19]
Tüp Uzunluğu	106 mm
Tüp Çapı	11,4 mm
Nozul Yüksekliği	0,97 mm
Nozul Genişliği	1,41 mm
Nozul Giriş Yüzey Alanı	8,2 mm ²
Soğuk Çıkış Alanı	30,19 mm ²
Sıcak Çıkış Alanı	95 mm ²

Çalışmada yer alan soğuk/tüp çapları (D_c/D) oranının soğutma performansı üzerindeki etkilerini incelemek için soğuk çıkış çapı 5,472 mm, 6,2 mm ve 7 mm olmak üzere üç ayrı ölçüde oluşturulmuş olup, D_c/D oranları sırasıyla 0,48, 0,54 ve 0,61 olmak üzere incelenmiştir.

2.2. Ağ Yapısı

Oluşturulan vorteks tüpü modeli ANSYS MESHING programı kullanılarak 490274 hücreye ayrılmıştır. Vorteks tüpünü farklı boyutlarda ve özelliklerde hücrelere ayırabilmek için giriş ve soğuk çıkış bölgesi, tüp gövde bölgesi ve sıcak çıkış bölgesi olmak üzere üç farklı bölüme ayrılmıştır. Bu bölgelerden giriş ve soğuk çıkış bölgesi üçgen, geri kalan bölümler ise dörtgen hücrelere bölünmüştür (Şekil 2). Giriş ve soğuk çıkış bölgesi ile birlikte sıcak çıkış bölgesi, akışın düzene girdiği tüpün orta bölümlerine göre daha küçük hacimlere ayrılmış olup, bu bölümlere ait hücre boyutları Tablo 3'de verilmiştir. Bu sayede momentum, türbülans ve hız denklemlerinin kritiklik arz ettiği bölümlerin daha küçük hacimlere ayrılması ve çözüme daha hassas ulaşılması amaçlanmıştır. Üstelik kritiklik seviyesi nispeten daha az olan bölümlerin daha büyük ve dolayısıyla az hacme bölünmesiyle bilgisayar iş yükü belirli bir seviyede tutulmuştur.



Şekil 2. Vorteks tüpünün 3 boyutlu HAD çözümü için oluşturulan modeline ağ yapısı

Tablo 3. HAD çözümü için oluşturulan 3 boyutlu vorteks tüpü modeline ait ortalama hücre boyutları

Bölüm	Ortalama Hücre Hacmi
Giriş ve Soğuk Çıkış	0,004 mm ³
Ana Tüp	0,255 mm ³
Sıcak Çıkış	0,019 mm ³

2.3. Sınır Şartları ve Denklemler

Vorteks tüpü 3 boyutlu modeli üzerindeki akış ve enerji ayrıştırma performansını gözlemlemek için yürütülen analizlerde ANSYS FLUENT 15.0 paket programı kullanılmıştır. Çalışılan akışkan olarak seçilen havanın giriş vektörleri, giriş yüzeylerine dik olacak şekilde tanımlanmış ve giriş şartı için kütleli debi seçilmiştir. Girişteki havanın durma sıcaklığı 284,2 K ile 304,2 K arasında, toplam kütleli debisi ise 0,00835 kg/s ile 0,01002 kg/s arasında tanımlanmıştır. Analizlerde ideal gaz kabulü ile türbülanslı ve sıkıştırılabilir akış tercih edilmiş olup, türbülans modeli olarak literatürde en uygun yöntem olarak tanımlanan standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır [7, 8, 9, 18, 21]. Soğuk taraftaki kütleli debi oranını (μ_c) ayarlamak için soğuk çıkıştaki ve sıcak çıkıştaki statik basınçlar sırasıyla 0,15-0,17 bar ile 0,65-1,35 bar arasında değiştirilmiştir. Soğuk çıkışta gözlenen ters akışlardan kaynaklanan hataları en aza indirmek için iteratif yöntem tercih edilmiş ve ters akım sıcaklıkları soğuk çıkış sıcaklığı olarak sürekli güncellenmiştir [19]. Tüp yüzeyinden çevreye olan ısı geçişi sırasıyla 0 W/m²K, 100 W/m²K ve 1000 W/m²K değerleri üzerinden incelenmiştir. Tüm bu değişkenlerin etkisini incelemek için sıkıştırılabilir akışta süreklilik, kütle korunumu, momentum, türbülans ve enerji denklemleri çözdürülmüştür [20]. Bu denklemler aşağıdaki şekildedir:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Bu ifade kütle korunumu eşitliğinin genel formu olup, sıkıştırılmaz akışların yanı sıra sıkıştırılabilir akışlarda da kullanılmaktadır. Burada S_m , kaynak terimini ifade etmektedir.

Üç boyutlu momentum denklemi:

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

burada p statik basıncı (Pa), $\bar{\bar{\tau}}$ aşağıda açıklanan tensör gerilimini (N), $\rho \vec{g}$ ve \vec{F} ise yerçekimi ve dış kuvvetleri (N) tanımlamaktadır. \vec{F} aynı zamanda kaynak terimini de ifade etmektedir.

Tensör gerilimi:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

burada μ moleküler viskoziteyi (kg/m.s), \mathbf{I} tensör bölümünü, eşitliğin sağındaki ifade ise hacimsel genleşme etkisini ifade etmektedir.

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - \sum_j (h_j \vec{j}_j) + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v})] + S_h \quad (4)$$

burada k_{eff} efektif iletimi (W/m²), \vec{j}_j ise j türünden difüzyon akısını (K) tanımlamaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk üç terim iletim nedeniyle gerçekleşen enerji transferini, difüzyon türünü ve viskoz yayılımı ifade etmektedir. S_h ise kaynak terimi olarak belirtilmektedir.

İdeal gaz denklemi:

$$P = \rho R T \quad (5)$$

burada T statik sıcaklığı (K), P basıncı (Pa), ρ yoğunluğu (kg/m³) ve R normal şartlarda universal gaz sabitini (Pa.m³/mol.K) ifade etmektedir.

Vorteks tüpü soğuk ve sıcak çıkış sıcaklık farkı:

$$\Delta T_c = T_i - T_c \quad (6)$$

$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (7)$$

burada T_i giriş sıcaklığını (K), T_c soğuk çıkış sıcaklığını (K), T_h sıcak çıkış sıcaklığını (K), ΔT_c soğuk çıkış sıcaklık farkını (K) ve ΔT_h sıcak çıkış sıcaklık farkını (K) tanımlamaktadır.

Soğutma yükü:

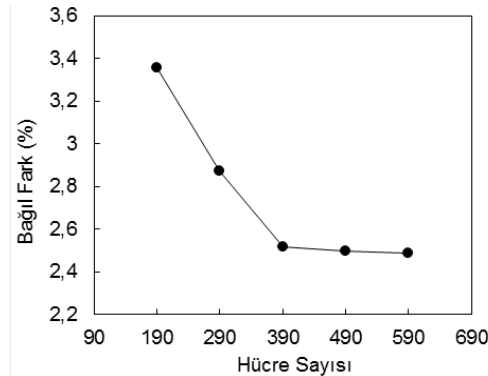
$$Q_c = \dot{m}_c c_p \Delta T_c \quad (8)$$

burada \dot{m}_c soğuk çıkış debisini (kg/s), c_p havanın özgül ısısını (J/kg.K) ve Q_c soğutma yükünü (W) tanımlamaktadır.

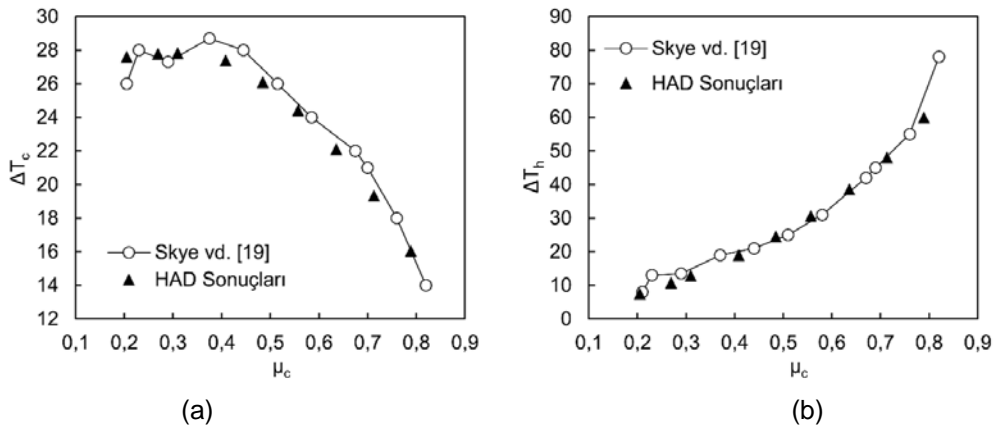
2.4. Doğrulama ve Ağdan Bağımsızlık

Üç boyutlu model üzerinde ANSYS MESHING programı kullanılarak 188587, 292780, 387941, 490274 ve 594379 adet hacimden oluşan 5 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapıları ile gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda elde edilen bulgular Skye vd. [19] tarafından yürütülen çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmış ve soğuk çıkış sıcaklıkları arasındaki bağıl farklar tespit edilmiştir (Şekil 3). Hücre sayısının artırılması ile bağıl farklar azalmış olup, 490274 ile 594379 adet hücreye sahip yapılara ait çözümlerde birbirine oldukça yakın farklar ortaya çıkmıştır. Bu sebeple HAD analizleri 490274 adet hücreye sahip model üzerinde yürütülmüştür.

Oluşturulan üç boyutlu model, Skye vd. [19] tarafından yürütülen çalışmada elde edilen soğuk çıkış sıcaklık farkı (ΔT_c) ve sıcak çıkış sıcaklık farkı (ΔT_h) sonuçları ile doğrulanmıştır. Soğuk çıkış debi oranına (μ_c) göre elde edilen bulgular ile Skye vd. [19] tarafından yürütülen çalışmanın sonuçları Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Sınır şartları olarak giriş sıcaklığı 294,2 K, giriş kütleli debisi 0,00835 kg/s, D_c/D oranı 0,54 ve tüp yüzeyleri adyabatik olarak tanımlanmış ve analizler yürütülmüştür. Yürütülen analizlerde incelenen parametrenin etkisini gözlemlemek için diğer parametreler tanımlanan bu seviyelerde sabit tutulmuş, dolayısıyla doğrulama çalışmasındaki seviyeler referans değerler olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3. Farklı hacim sayılarına sahip modellerde tespit edilen bağıl fark yüzdeleri

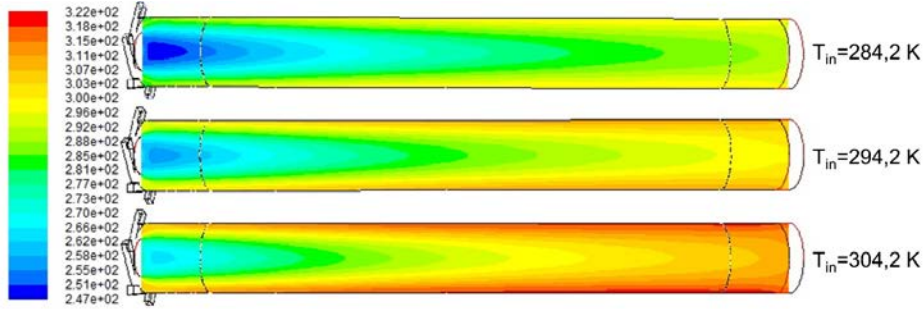


Şekil 4. HAD analizleri ile elde edilen soğuk çıkış sıcaklık farkı (a) ve sıcak çıkış sıcaklık farkı (b) bulgularının Skye vd. [19] sonuçları ile karşılaştırması

3. BULGULAR

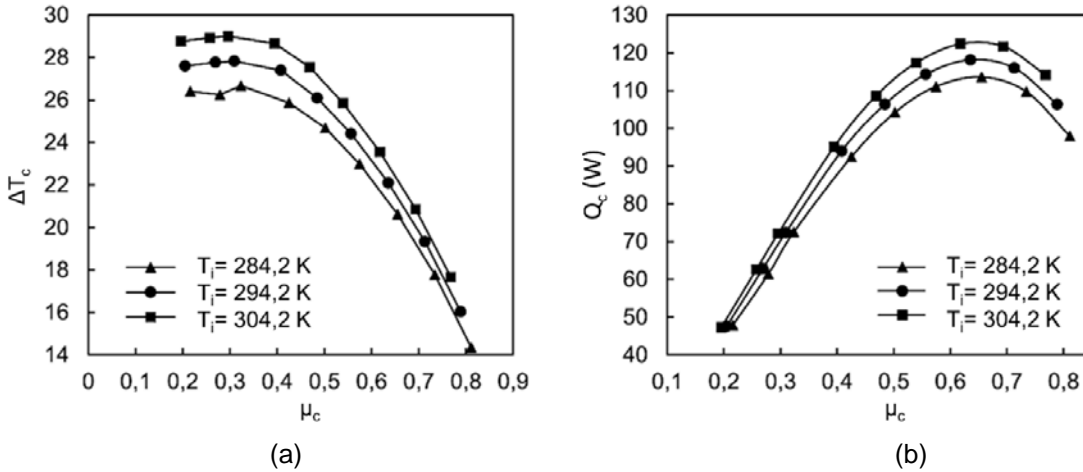
3.1. Giriş Sıcaklığının Etkisi

Vorteks tüpü soğutma performansının giriş sıcaklığına bağlı değişimlerini gözlemlemek için 284,2 K, 294,2 K ve 304,2 K olmak üzere farklı giriş sıcaklıkları kullanılarak analizler yürütülmüştür. Vorteks tüpünün hava akış bölgesinde edilen sıcaklık dağılımı, geçmişte yapılan benzer araştırmalar ile uyumluluk göstermektedir [9, 18]. Tüp içerisindeki sıcaklık yüzeye yakın bölgelerde merkeze oranla daha yüksek olup, sürtünmenin etkisiyle sıcak çıkışa doğru artış eğilimi göstermektedir. Tüpün merkezinde ve karşıt akış sergileyen havanın sıcaklığı ise soğuk çıkış bölgesine yaklaştıkça azalma eğilimi göstermekte olup, minimum sıcaklık seviyesine soğuk çıkış yüzeyinde ulaşmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Farklı giriş sıcaklıklarının vorteks tüpü kesitindeki sıcaklık dağılımlarına etkisi

Vorteks tüpü girişindeki havanın debi ve basıncını sabit tutup sıcaklığını değiştirmek uygulanabilirlik açısından kolay değildir. Bu nedenle vorteks tüpü giriş sıcaklığının soğutma performansı üzerindeki etkileri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Cang, yüksek debili (~40 kg/s) vorteks tüplerinde, giriş sıcaklığının yükselmesi ile birlikte ΔT_c değerinin de arttığını tespit etmiş, ancak bu artışın çok düşük seviyelerde olduğunu vurgulamıştır [22]. Bu çalışmada da, aynı μ_c değerleri dikkate alındığında, giriş sıcaklığının artırılmasına bağlı olarak soğuk taraf sıcaklık farkında (ΔT_c) maksimum %12 düzeyinde artış gözlemlenmiştir. Maksimum soğutma yükü ise, soğuk çıkış debi oranı 0,65 iken gözlemlenmiş, giriş sıcaklığının yükseltilmesinin maksimum soğutma yükünü arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 6). Soğutma yükü debi ve soğuk çıkış sıcaklık farkına bağlı olduğundan, düşüş sergileyen ΔT_c değerlerine rağmen μ_c değerinin artması sayesinde soğutma yükü de artış sergilemiştir.

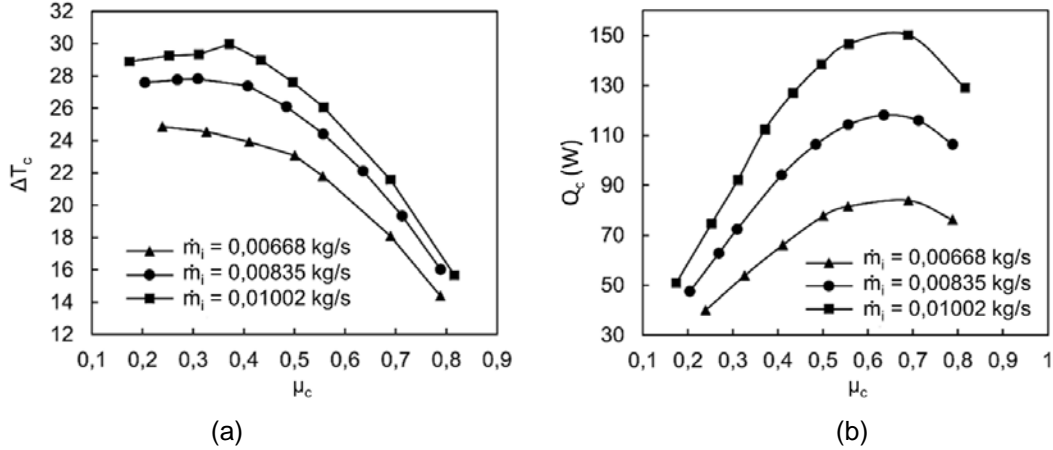


Şekil 6. Farklı giriş sıcaklıklarının soğuk çıkış sıcaklık farkı (a) ve soğutma yükü (b) üzerindeki etkileri

3.2. Giriş Kütleli Debi Miktarının Etkisi

Literatürde genel olarak giriş basıncındaki değişimin soğutma performansı üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar yer almaktadır [12, 13, 15]. Giriş basıncının artmasıyla giriş kütleli debisi de artmakta ve soğutma performansı kütleli debi üzerinden hesaplanmaktadır (Denklem 8). Bu

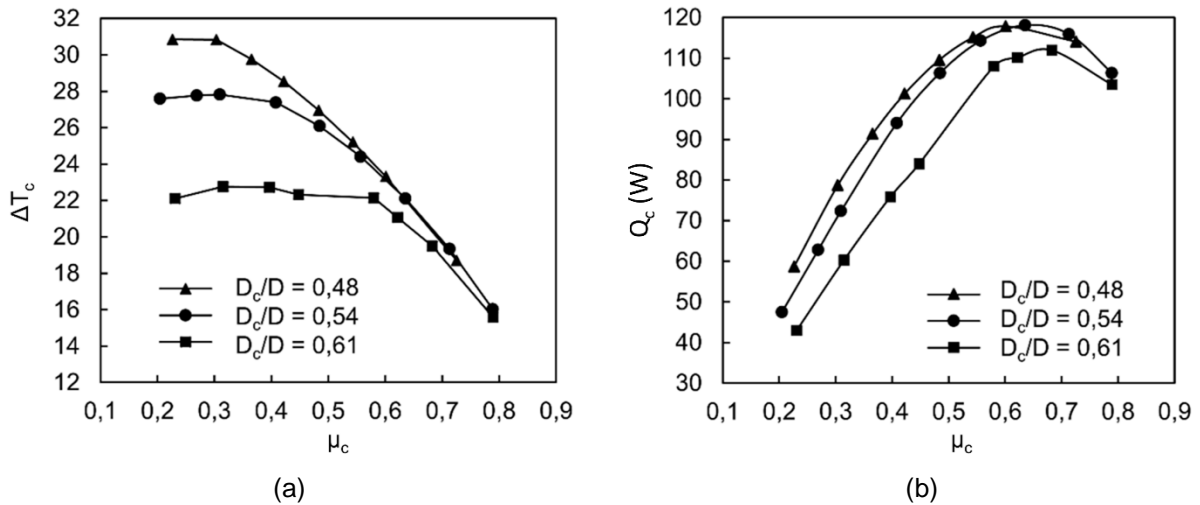
çalışmada, giriş kütleli debi miktarının vorteks tüpü soğutma performansına etkisini ve değişim trendini gözlemlemek için 0,00668 kg/s, 0,00835 kg/s ve 0,01002 kg/s olmak üzere farklı debi miktarları tanımlanarak analizler yürütülmüştür. Giriş kütleli debi miktarının artırılması, soğuk çıkış sıcaklık farkında ve soğuk çıkış sıcaklığında düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 7). Bununla birlikte, soğutma yükünde de benzer trend saptanmış ve yüksek giriş debi miktarlarının vorteks tüpü soğutma performansını olumlu etkilediği tespit edilmiş olup, daha önce yapılan benzer çalışmalar ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [15].



Şekil 7. Farklı giriş kütleli debi miktarlarının soğuk çıkış sıcaklık farkı (a) ve soğutma yükü (b) üzerindeki etkileri

3.3. Soğuk Çıkış Çapı ile Tüp Çapı Oranının (D_c/D) Etkisi

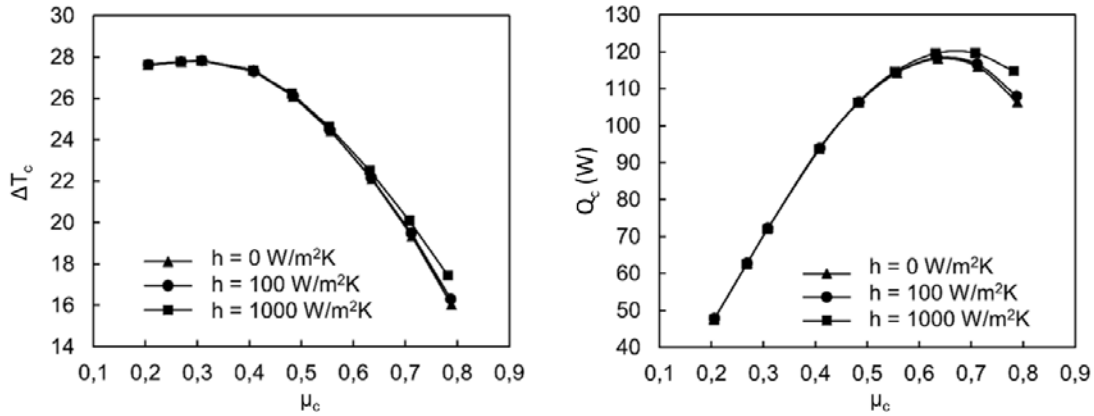
Soğuk çıkış çapının tüp performansına etkisinin incelendiği çalışmalarda, çap değerindeki değişimin vorteks tüpü performansı üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Özellikle soğuk çıkış açısı, uzunluğu gibi geometrik parametreler ile vorteks tüpünün geometrik parametreleri, soğutma performansı üzerinde oldukça etkili olup, her vorteks tüpü için ayrı değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, D_c/D oranı yükseldikçe ΔT_c bir noktaya kadar arttığı, daha sonra azalma eğilimi gösterdiği de daha önceki çalışmalarda raporlanmıştır [3, 5, 6]. Bu çalışmada ise soğuk çıkış çapının vorteks tüpü çapına oranının (D_c/D) etkisini incelemek amacıyla, değişik soğuk çıkış çapı değerleri incelenmiş ve D_c/D oranı için sırasıyla 0,48, 0,54 ve 0,61 değerleri kullanılarak analizler yürütülmüştür. D_c/D oranının artırılması daha yüksek soğuk çıkış sıcaklıklarına neden olmuş ve soğutma yükünde bir miktar azalma tespit edilmiştir. Dolayısıyla D_c/D oranının yükselmesiyle soğuk çıkış sıcaklıkları azalma eğilimine girmiş ve vorteks tüpü soğutma performansını olumsuz etkilemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Soğuk çıkış çapı ile tüp çapı arasındaki oranın (D_c/D) soğuk çıkış sıcaklık farkı (a) ve soğutma yükü (b) üzerindeki etkileri

3.4. Tüp Yüzeyinden Çevreye Olan Isı Transferinin Etkisi

Vorteks tüpünden çevreye olan ısı transferinin etkisini incelemek için, tüp yüzeyleri önce adyabatik olarak tanımlanarak, daha sonra yüzey ısı geçiş katsayısı olarak sırasıyla 100 W/m²K ve 1000 W/m²K değerleri kullanılarak analizler yürütülmüştür. Düşük soğuk çıkış debi oranlarında ısı transfer miktarının herhangi bir etkisi ile karşılaşılmamış, soğuk çıkış sıcaklık farkına ve soğutma yüküne etkisi gözlenmemiştir. Bununla birlikte soğuk çıkış debi oranı yükseldiğinde hem soğuk çıkış sıcaklık farkında hem de soğutma yükünde bir miktar artış tespit edilmiştir (Şekil 9). Vorteks tüpünün merkezindeki karşıt akıştan tüp yüzeyindeki akışa sürekli olarak ısı transferi gerçekleşmektedir. Soğuk çıkış debi oranı yükseldiğinde sıcak çıkış sıcaklığı da yükseldiği için tüp yüzeyinin çevre ile olan sıcaklık farkı artmakta ve yüzey-çevre arasında daha fazla ısı transferi gerçekleşmektedir. Debi oranındaki artışa bağlı olarak soğuk çıkış sıcaklık farkındaki ve soğutma yükündeki artışın nedeni bu artan yüzey-çevre ısı transferidir. Bu bulgular, vorteks tüp yüzeyinin soğutulmasını öneren çalışmalar ile uyumlu bulunmuştur [9].



Şekil 9. Tüp yüzeyinden çevreye olan ısı transferinin soğuk çıkış sıcaklık farkı (a) ve soğutma yükü (b) üzerindeki etkileri

SONUÇ

Noktasal soğutma uygulamalarında kullanımı her geçen gün yaygınlaşan vorteks tüplerinin çalışma prensiplerini daha iyi anlamak ve çalışma şartlarının etkisini incelemek için, modellenen vorteks tüpü üzerinde HAD yöntemi kullanılarak üç boyutlu sayısal akış ve ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Yürütülen nümerik analizlerde giriş sıcaklığı, debisi, soğuk çıkış çapı ile tüp çapı oranı ve yüzeyden çevreye olan ısı transferinin vorteks tüpü soğutma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada tespit edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Giriş sıcaklığı yükseldikçe vorteks tüpü soğuk çıkış sıcaklığı yükselmektedir. Bu durum her ne kadar soğutma uygulamaları için dezavantaj olarak görünse de, beklenenin aksine, ortaya çıkan yüksek soğuk çıkış sıcaklık farkı sayesinde soğutma yükünde artış gözlenmiştir. Sonuç olarak vorteks tüpü soğutma performansı giriş sıcaklığının yükselmesiyle artmaktadır.
- Giriş debisinin yükseltilmesi, vorteks tüpü soğutma performansını önemli ölçüde etkilemektedir. 0,4 soğuk çıkış debi oranından sonra her üç parametre seviyesinde de soğuk sıcaklık farkı birbirine yaklaşmakta, bununla birlikte soğutma yükleri arasındaki fark artmaktadır. Gözlenen soğutma yükü artışı, en yüksek değerine 0,6-0,7 soğuk çıkış debi oranı aralığında ulaşmaktadır. Vorteks tüpü soğutma performansı giriş debisinin yükselmesiyle artmaktadır.

- D_c/D oranındaki artış, düşük soğuk çıkış debi oranlarında vorteks tüpü soğutma performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum, 0,6 soğuk çıkış debi oranından sonra ortadan kalkmış ve soğutma yükleri her seviye için birbirine oldukça yaklaşmıştır.
- Tüp yüzeyinden çevreye olan ısı transferi incelendiğinde, düşük μ_c değerlerinde soğutma performansında önemli ölçüde bir değişim gözlenmemiştir. $\mu_c = 0,6$ değerinden daha yüksek olduğu durumda, hem soğuk çıkış sıcaklık farkında hem de soğutma yükünde bir miktar artış tespit edilmiştir.

Bu çalışmada incelenen parametreler dikkate alındığında, vorteks tüpü giriş sıcaklığının ve debisinin artırılması ile birlikte D_c/D oranının düşürülmesi sonucunda vorteks tüpü soğutma performansının iyileştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte tüp yüzeyinden çevreye ısı transfer miktarının artırılması, bir başka deyişle tüp yüzeyinin soğutulması da vorteks tüpü soğutma performansını olumlu etkilemektedir. Gelecek dönemde yapılacak çalışmalarda vorteks tüpü geometrisi ve operatif çalışma şartlarının daha detaylı incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] YILMAZ, M., ÇOMAKLI, Ö., KAYA, M., KARSLI, S., Vorteks Tüpleri:1-Teknolojik Gelişim, Mühendis ve Makina, 47, 553, 46-54, 2006.
- [2] COCKERILL, T.T., "Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque-Hilsch Vortex Tube", Doktora Tezi, University of Cambridge, 1998.
- [3] IM, S.Y., Yu, S.S., Effects of Geometric Parameters on the Separated Air Flow Temperature of a Vortex Tube for Design Optimization, Energy, 37, 154-160. 2012.
- [4] BOVAND, M., VALIPOUR, M.S., DINCER, K., Application of Response Surface Methodology to Optimization of a Standard Ranque-Hilsch Vortex Tube Refrigerator, Applied Thermal Engineering, 67, 545-553, 2014.
- [5] GORD, M.F., SADI, M., Improving Vortex Tube Performance Based on Vortex Generator Design, Energy, 72, 492-500, 2014.
- [6] AMERI, M., BEHNIA, B., The Study of Key Design Parameters Effects on the Vortex Tube Performance, Journal of Thermal Science, 18, 370-376, 2009.
- [7] POURMAHMOUD, N., AZAR, F.S., HASSANZADEH, A., Numerical Simulation of Secondary Vortex Chamber Effect on the Cooling Capacity Enhancement of Vortex Tube, Heat and Mass Transfer, 50, 1225-1236, 2014.
- [8] POURMAHMOUD, N., RASHIDZADEH, M., HASSANZADEH, A., CFD Investigation of Inlet Pressure Effects on the Energy Separation in a Vortex Tube with Convergent Nozzles, Engineering Computations, 32, 1323-1342, 2015.
- [9] KANDIL, H.A., ABDELGHANY, S.T., Computational Investigation of Different Effects on the Performance of the Ranque-Hilsch Vortex Tube, Energy, 84, 207-218, 2015.
- [10] MOHAMMADI, S., FARHADI, F., Experimental and Numerical Study of the Gas-Gas Separation Efficiency in a Ranque-Hilsch Vortex Tube, Separation and Purification Technology, 138, 177-185, 2014.
- [11] BOVAND, M., VALIPOUR, M.S., DINCER, K., Numerical Analysis of the Curvature Effects on Ranque-Hilsch Vortex Tube Refrigerators, Applied Thermal Engineering, 65, 176-183, 2014.
- [12] XUE, Y., ARJOMANDI, M., KELSO, R., Experimental Study of the Flow Structure in a Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 5853-5860, 2012.
- [13] GUTAK, A.D., Experimental Investigation and Industrial Application of Ranque-Hilsch Vortex Tube, International Journal of Refrigeration, 49, 93-98, 2015.



- [14] YUSOF, M.H., KATANODA, H., MORITA, H., Temperature and Pressure Measurements at Cold Exit of Counter-Flow Vortex Tube with Flow Visualization of Reversed Flow, Journal of Thermal Science, 24, 67-72, 2015.
- [15] AYDIN, O., BAKI, M., An Experimental Study on the Design Parameters of a Counterflow Vortex Tube, Energy, 31, 2763-2772, 2006.
- [16] RAMAKRISHNA, P.A., RAMAKRISHNA, M., MANIMARAN, R., Experimental Investigation of Temperature Separation in a Counter-Flow Vortex Tube, Journal of Heat Transfer - ASME Transactions, 136, 082801, 2014.
- [17] SADI, M., GORD, M.F., Introduction of Annular Vortex Tube and Experimental Comparison with Ranque-Hilsch Vortex Tube, International Journal of Refrigeration, 46, 142-151, 2014.
- [18] THAKARE, H.R., PAREKH, A.D., CFD Analysis of Energy Separation of Vortex Tube Employing Different Gases, Turbulence Models and Discretisation Schemes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 78, 360-370, 2014.
- [19] SKYE, H.M., NELLIS, G.F., KLEIN, S.A., Comparison of CFD Analysis to Empirical Data in a Commercial Vortex Tube, International Journal of Refrigeration, 29, 71-80, 2006.
- [20] ANSYS Fluent Theory Guide, 2013.
- [21] THAKARE, H.R., PAREKH, A.D., Computational Analysis of Energy Separation in Counter-Flow Vortex Tube, Energy, 85, 62-77, 2015.
- [22] CANG, R., "Optimized Vortex Tube Bundle for Large Flow Rate Applications", Yüksek Lisans Tezi, Arizona State University, 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Melih KINAGU

1990 yılı Bursa doğumludur. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Askerlik görevini yedek subay olarak tamamladıktan sonra 2014 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı yüksek lisans programına girmiştir. 2014 yılından bu yana Ermetal A.Ş. Ar-Ge Merkezi Teknolojik Araştırmalar Biriminde Ar-Ge Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.

Mustafa MUTLU

1984 yılı Bulgaristan doğumludur. 2007 yılında UÜ. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. UÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında 2009 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamış ve aynı anabilim dalında 2015 yılında doktora derecesi almıştır. 2009 – 2015 yılları arasında UÜ. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak görev yapmıştır. Halen Ermetal A.Ş. Ar-Ge Mühendisi olarak görev yapan Mustafa MUTLU, ısı transferi, enerji sistemleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı sistemlerinin sayısal modellenmesi konusunda çalışmalarına devam etmektedir.

Mehmet Özgün KORUKÇU

1979 yılında Ankara'da doğdu. 2002 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2004 yılında aynı bölüme araştırma görevlisi olarak görevine başlamıştır. 2005 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden yüksek lisans ve 2010 yılında ise doktor ünvanlarını almıştır. 2011-2012 yılları arasında YÖK bursu ile Danimarka Teknik Üniversitesi Rüzgar Enerjisi Bölümünde doktora sonrası çalışmalarını tamamlamıştır. Korukçu, 2014 yılından itibaren Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında yardımcı doçent ünvanı ile görevine devam etmektedir.



Mehmet GÖKÇEDAĞLIOĞLU

1967 yılı Samsun doğumludur. 1988 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümündeki öğrenimini tamamlamıştır. Mezun olduktan sonra 1998 yılına kadar Tunaoğlu Otomotiv firmasında Kalite Müdürlüğü; 1998-1999 yılları arasında Dynacast Ltd. Şti.'de Üretim Müdürlüğü görevini yapmıştır. 1999-2011 yılları arasında Ermetal A.Ş. firmasında Teknik Müdür olarak görevini sürdürmüştür. 2011 yılında Ermetal A.Ş. Ar-Ge Merkezine Ar-Ge Müdürü olarak atanmış olup, halen bu görevini sürdürmektedir.