

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BİR KANAL İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLMİŞ BÜKÜMLÜ GİRDAP
ÜRETEÇLERİNİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Yiğit ÇAKIR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BİR KANAL İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLMİŞ BÜKÜMLÜ GİRDAP
ÜRETEÇLERİNİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Yiğit ÇAKIR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR KANAL İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLMİŞ BÜKÜMLÜ GİRDAP
ÜRETEÇLERİNİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Yiğit ÇAKIR
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 11/07/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayla DOĞAN (DANIŞMAN)

Doç. Dr. Nureddin DİNLER [imza]

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÖZBALCI [imza]

!!! Unvan İsim SOYİSİM!!! [imza]

!!! Unvan İsim SOYİSİM!!! [imza]

ÖZET

BİR KANAL İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLMİŞ BÜKÜMLÜ GİRDAP ÜRETEÇLERİNİN ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yiğit ÇAKIR

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Haziran 2025; 54 sayfa

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine 7 farklı formda Polilaktit Asit (PLA) malzemeden üç boyutlu yazıcıda üretilmiş vorteks jeneratörlerinin ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Kanalın taban yüzeyine 715 W/m^2 ve 1829 W/m^2 arasında değişen değerlerde sabit ısı akıları uygulanmış olup, Reynolds sayıları 2225 ila 9448 aralığında değişmektedir. Farklı formda üretilmiş vorteks jeneratörlerinin büküm aralığının, delik çapının ve büküm yönünün ısı transferine etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda boş kanala göre vorteks jeneratörlerinin kullanımıyla ısı transferinde sırasıyla VJ1 (%9-33), VJ2 (%26-59), VJ3 (%20-51) VJ4 (%32-55), VJ5 (%21-37), VJ6 (%16-45), VJ7 (%28-78) aralığında iyileşme görülmüştür. Vorteks jeneratörlerinin tasarımında büküm aralığının arttırılmasının yüzey sıcaklıklarını düşürmede etkili olduğu görülmüştür. Yüzeye açılan delik çaplarının deliksiz yüzeylere göre ısı transferinde önemli bir etkisinin olmadığı, büküm yönü açısından değerlendirildiğinde ise saptırmalı bükümlü vorteks jeneratörünün tek yönlü bükümlü olana göre yüzey sıcaklıklarını düşürmede etkili olmadığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELE: 3B Yazıcı, Elektronik soğutma, Isı transferi, PLA, Vorteks Jeneratörü

JÜRİ: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Doç. Dr. Nureddin DİNLER

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÖZBALCI

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TWISTED VORTEX GENERATORS PLACED IN A CHANNEL ON HEAT TRANSFER

Yiğit ÇAKIR

M.Sc. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

June 2025; 54 pages

In this study, the effect of vortex generators, produced in seven different forms using Polylactic Acid (PLA) material via 3D printing, on heat transfer within a rectangular cross-section channel was experimentally investigated. Air was used as the working fluid. Constant heat flux values ranging from 715 W/m² to 1829 W/m² were applied to the bottom surface of the channel, and the Reynolds numbers varied between 2225 and 9448. The effects of twist pitch, hole diameter, and twist direction of the vortex generators with different forms were examined separately in terms of heat transfer. Based on the obtained results, compared to the plain channel, the use of vortex generators resulted in improvements in heat transfer by VJ1 (%9-33), VJ2 (%26-59), VJ3 (%20-51) VJ4 (%32-55), VJ5 (%21-37), VJ6 (%16-45) and VJ7 (%28-78), respectively. It was observed that increasing the twist pitch in the design of vortex generators was effective in reducing surface temperatures. The hole diameters on the surface were found to have no significant effect on heat transfer compared to surfaces without holes. In terms of twist direction, the deflected twist type vortex generator was found to be less effective in reducing surface temperatures than the unidirectional twisted type.

KEYWORDS: 3D printing, Electronic cooling, Heat transfer, PLA, Vortex generators

COMMITTEE: Prof. Dr. Ayla DOĞAN

Assoc. Prof. Dr. Nureddin DİNLER

Asst. Prof. Dr. Oğuzhan ÖZBALCI

ÖNSÖZ

Elektronik cihazlar, günlük hayatımızda işlerimizi daha hızlı ve daha verimli yapmamıza olanak sağladıkları için hayatımızın neredeyse ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Teknolojinin de hızla gelişmesine bağlı olarak, elektronik cihazların performansları ve güç tüketimleri git gide artmakta, ancak boyutları ise küçülmektedir. Bu durum cihazlarda üretilen ısı miktarının artmasına ve yüzey sıcaklıklarının yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliğini arttırmaya yönelik yenilikçi çözümler, özellikle süreçlerin optimizasyonu ve ısı transferi mekanizmalarının iyileştirilmesi gibi kritik alanlarda ön plana çıkmaktadır. Isı transferi, modern teknolojilerin performansını doğrudan etkileyen temel mühendislik süreçlerinden biridir. Elektronik cihazların verimli çalışması, enerji kayıplarının minimize edilmesi ve termal yönetim sistemlerinin geliştirilmesi gibi süreçler, efektif ısı transferi yöntemleriyle doğrudan ilişkilidir. Akışı karıştırmak ve ısı transferini arttırmak amaçlı kullanılan bükümlü vorteks jeneratörleri, bu süreçleri iyileştirmeye yönelik yapılan yenilikçi mühendislik yaklaşımlarından biridir.

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine 7 farklı formda PLA malzemeden üç boyutlu yazıcıda üretilmiş vorteks jeneratörlerinin ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalar, farklı hava hızlarında ve farklı ısı akılarında yapılmıştır. Elde edilen sonuçların, elektronik cihazların soğutma performanslarına yönelik çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışmalarım süresince bilgi, öneri ve yardımlarını benden esirgemeyip beni yönlendiren tez danışmanım sayın danışma hocam Prof. Dr. Ayla DOĞAN' a, deney düzeneğinin kurulumunda ve tasarım süreçlerinde bana yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÖZBALCI' ya ve son olarak benden hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyip bugünlere gelmemi sağlayan sevgili anne ve babama sabırları için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOT	14
3.1. Deney Düzenegi	14
3.1.1 Test bölgesi.....	15
3.1.2 Güç Ünitesi	21
3.2 Deneyisel Verilerin Toplanması Ve Ölçüm Sistemleri	21
3.3. Metot	23
3.3.1. Deneyisel parametrelerin belirlenmesi	23
3.3.2. Geometrik parametreler	23
3.3.3. Isı transfer analizi	24

3.3.4. Belirsizlik analizi	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1 Deneysel Ölçümler ve Verilerin Analizi	30
4.1.1. Büküm aralığı etkisi.....	42
4.1.2. Delik etkisi.....	44
4.1.3. Yön etkisi.....	46
5. SONUÇLAR	50
6. KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bir Kanal İçerisine Yerleştirilmiş Bükümlü Girdap Üreteçlerinin Isı Transferine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../20....
Yiğit ÇAKIR

İmzası

XXXXXX

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_Y	: Bakır plakanın yüzey alanı [m ²]
l	: Bakır plakanın uzunluğu [m]
w	: Bakır plakanın genişliği [m]
D_h	: Hidrolik çap [m]
A_k	: Kanal kesit alanı [m ²]
P	: Kanal çevre uzunluğu [m]
a	: Kanalın genişliği [m]
b	: Kanalın yüksekliği [m]
$\dot{Q}_{konv.}$	: Konveksiyonla olan ısı akımı [W]
$\dot{Q}_{elektrik}$	: Isıtıcıya verilen ısı akımı [W]
$\dot{Q}_{kond.}$	: Kondüksiyonla olan ısı akımı [W]
V	: Elektrikli ısıtıcı voltajı [V]
R	: Elektrikli ısıtıcı direnci [ohm]
k	: Yalıtım köpüğünün termal iletkenlik katsayısı [W/mK]
ΔT	: Yalıtım köpüğünün iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı [°C]
Δx	: Yalıtım köpüğünün iki yüzeyi arasındaki kalınlık [m]
$q_{konv.}$	: Akışkana aktarılan ısı akısı [W/m ²]
Re	: Reynolds sayısı [-]
U	: Akış hızı [m/s]
ν	: Akışkan kinematik viskozitesi [m ² /s]
T	: Sıcaklık [°C]

T_{∞} : Akışkan giriş sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{ort,y}^*$: Kanal yüzey sıcaklığı ortalaması [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{ort,y}$: Kanal yüzeyindeki ısı çiftlerinin sıcaklık ortalaması [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{i,ort}$: Kanal yüzeyindeki ısı çiftlerinin her i sırası için ortalama sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$]

i : Isıl çift sıra numarası

h : Konveksiyonla ısı transferi katsayısı [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Nu : Nusselt sayısı [-]

Pr : Prandtl sayısı [-]

Kısaltmalar

3B : Üç Boyutlu

AÜ : Akdeniz Üniversitesi

PLA : Polilaktik Asit (3B yazıcı malzemesi)

VJ : Vorteks Jeneratörü

Bu tez kapsamında, sayısal verilerin sunumunda ondalık ayırıcı olarak nokta (.) kullanılmıştır (örnek, 21.01).

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü	14
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin genel görünümü	15
Şekil 3.3. Kanalin üstten görünümü ve ölçüleri (mm).....	16
Şekil 3.4. Bakır plakanın üzerine ısıtıcıların dizilimi ve ölçüleri (mm).....	16
Şekil 3.5. Elektrikli ısıtıcının görünümü a) Geniş açıdan görünümü; b) Özellikleri	17
Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan vorteks jeneratörlerinin görüntüsü	18
Şekil 3.7. Bükümlü vorteks jeneratöründe boyutların gösterimi	19
Şekil 3.8. Bükümlü vorteks jeneratörünün test bölgesi içindeki a) yerleşimi; b) yandan görünüşü	20
Şekil 3.9. Isıtıcının bağlandığı ve kontrollerin yapıldığı bağlantı devresi	21
Şekil 3.10. Hız ölçüm cihazının detaylı görünümü	22
Şekil 3.11. Veri toplama (Data logger) cihazının detaylı görünümü	22
Şekil 4.1. Farklı tipteki vorteks jeneratörlerinin Reynolds sayısına göre basınç kaybı değişimi	31
Şekil 4.2. Ortalama yüzey sıcaklıklarının vorteks jeneratörlerine göre değişimi (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	32
Şekil 4.3. Ortalama yüzey sıcaklıklarının çeşitli Reynolds sayılarına göre farklı tıpteki vorteks jeneratörleri için değişimi (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400W/m ² , (d) 1829 W/m ²	34
Şekil 4.4. Nusselt sayılarının çeşitli Reynolds sayılarına göre farklı tipteki vorteks jeneratörleri için değişimi (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	38
Şekil 4.5. Sıcaklık farklarının büküm aralığı etkisine göre farklı tipteki vorteks jeneratörleri için karşılaştırması (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	42
Şekil 4.6. Sıcaklık farklarının delik etkisine göre farklı tipteki vorteks jeneratörleri için karşılaştırması (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	45
Şekil 4.7. Sıcaklık farklarının yön etkisine göre farklı tipteki vorteks jeneratörleri için karşılaştırması (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Bükümlü vorteks jeneratörlerinin fiziksel özellik tablosu.....	19
Çizelge 3.2. Test bölgesinin geometrik parametreleri	24
Çizelge 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm parametrelerin hata miktarı değerleri.....	27
Çizelge 3.4. Değişkenlerin belirsizlik ve hata oranları	29
Çizelge 4.1. Akışkan hızına göre hesaplanan Reynolds sayısı değerleri	30
Çizelge 4.2. Vorteks jeneratörlerine göre basınç kaybındaki değişim.....	31
Çizelge 4.3. Boş yüzeydeki ortalama yüzey sıcaklıklarının çeşitli Reynolds Sayılarına göre farklı tipdeki vorteks jeneratörlerinin yüzey sıcaklığı ile kıyaslanması (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	36
Çizelge 4.4. Nusselt sayılarının çeşitli Reynolds Sayılarına göre farklı tipdeki vorteks jeneratörlerinin yüzey sıcaklığı ile kıyaslanması (a) 715 W/m ² , (b) 1029 W/m ² , (c) 1400 W/m ² , (d) 1829 W/m ²	40

1. GİRİŞ

Teknolojiye bağılı olarak, elektronik sistemlerin her geçen gün performanslarının artması, güç tüketiminin de belirgin bir şekilde artmasına sebep olmaktadır. Artan güç tüketimi, sistem bileşenlerinin çalışması sırasında daha fazla ısı üretmesine bağılı olarak yüzey sıcaklıklarının da yükselmesine sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra gelişen teknolojiye bağılı olarak elektronik sistem bileşenlerinin boyutları küçülmüş ve daha kompakt hale gelmiştir. Bu gelişme ile de birim alan başına düşen ısı miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Sistemlerin daha fazla ısınmasına sebep olan bu durum, karşılaşılan ısınma problemini daha karmaşık bir hale getirmektedir. Elektronik sistemlerde artan ısınma problemi, mevcut soğutma yöntemlerinin yetersiz kalmasına ve bileşen sıcaklıklarının kritik seviyelerin üzerine çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, aşırı ısınma durumunda bileşenler zarar görebilir ve sistem tamamen işlevsiz hale gelebilir. Bu nedenle, ısı kontrolü sağlamak ve sıcaklıkları kabul edilebilir seviyelerde tutmak, elektronik sistemlerin güvenilirliğini ve performansını korumak açısından büyük bir öneme sahiptir. Isınma sorununun çözülmesi, daha güvenilir, verimli ve uzun ömürlü elektronik sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlar. Elektronik sistemlerin verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi ve oluşan bu ısınma problemlerinin giderilebilmesi için etkin çözümler geliştirilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda bu sorunu çözmek amacıyla farklı malzemeler kullanılarak çeşitli soğutma yöntemleri üzerinde yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Mevcut soğutma yöntemleri genellikle pasif soğutma (soğutma blokları, ısı emiciler) veya aktif soğutma (fanlar, sıvı soğutma sistemleri) şeklinde uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler, özellikle yüksek performanslı ve küçük boyutlu cihazlar için her zaman yeterli çözümler sunmamaktadır. Gelişen teknolojilerle birlikte, elektronik bileşenlerin yüzey sıcaklıklarının daha etkili bir şekilde yönetilebilmesi için yenilikçi çözümler gerekmektedir. Bu bağlamda, vorteks jeneratörleri gibi daha özel soğutma yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar dikkat çekmektedir. Vorteks jeneratörleri, hava akışını yönlendirerek ve türbülans oluşturarak yüzeydeki ısı transferini artırmaktadır. Bu sayede, elektronik bileşenlerin yüzeyinde biriken ısı daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılması sağlanarak yüzey sıcaklıklarının düşürülmesi mümkün hale gelir. Vorteks jeneratörlerinin, pasif soğutma yöntemlerine göre daha etkili sonuçlar verdiği deneysel çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Diğer bir deyişle vorteks jeneratörler, özellikle dar alanlara yerleştirildiklerinde hava akışını optimize edebilmekte ve yüzey sıcaklıklarını kontrol altında tutabilmektedirler.

Özellikle yüksek işlem kapasitesine sahip, yoğun entegre bileşenlerden oluşan elektronik sistemlerde, açığa çıkan ısı enerjisinin yeterli şekilde uzaklaştırılamaması durumunda sistemin arızalanması veya kullanım ömrünün önemli ölçüde kısılması söz konusu olabilmektedir. Bu bağlamda, sistemlerin termal yönetiminin etkin bir biçimde sağlanması, yalnızca elektronik tasarımın değil, aynı zamanda termal mühendisliğin de temel hedeflerinden biri haline gelmiştir. Isı transfer mekanizmalarının detaylı biçimde anlaşılması ve optimize edilmesi gerekliliği, yeni nesil soğutma sistemlerinin tasarımı açısından kaçınılmaz hale gelmiştir.

Elektronik cihazlarda en yaygın kullanılan soğutma yöntemleri arasında doğal konveksiyon, zorlamalı hava soğutması, sıvı soğutma, ısı eşanjörleri ve faz değişimli sistemler yer almaktadır. Ancak bu yöntemlerin büyük bir kısmı ya maliyetlidir ya da mekanik olarak karmaşıktır. Özellikle hacim ve enerji sınırlamalarının ön planda olduğu taşınabilir veya mikro ölçekli sistemlerde aktif çözümler her zaman uygulanabilir olmamaktadır. [Bu nedenle, son yıllarda dikkat çeken soğutma çözümleri arasında yer alan vorteks jeneratörleri, düşük enerji tüketimiyle yüksek soğutma performansı elde edilmesini mümkün kılan alternatiflerden biri olarak öne çıkmaktadır.]

Vorteks jeneratörleri, akışkan içerisindeki sınır tabakayı etkileyerek türbülanslı yapılar oluşturan ve bu sayede yüzeyle akışkan arasındaki ısı transferini artıran aerodinamik elemanlardır. Genellikle belirli bir açıyla yerleştirilen küçük kanatçıklar, bükümlü şeritler veya çıkıntılar şeklinde tasarlanırlar. Bu yapılar sayesinde, akışkan içerisinde ikincil akım yapıları meydana gelir ve sınır tabakadaki akış homojenliğini bozarak enerji taşınımı hızlandırılır. Vorteks jeneratörleri bu yönüyle, klasik laminar akış rejimini bozarak türbülanslı kontrollü şekilde artırır ve böylece akışkanın yüzeyle daha etkili temas etmesini sağlar.

İlk olarak havacılık endüstrisinde, kanat yüzeylerinde oluşabilecek akış ayrılmalarını geciktirmek ve taşıma kuvvetlerini artırmak amacıyla kullanılan vorteks jeneratörleri, zamanla ısı transferi, otomotiv aerodinamiği ve HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemlerinde de uygulanmaya başlanmıştır. Özellikle mikro kanal yapılar, kompakt soğutucular ve elektronik cihazların iç soğutma sistemleri gibi sınırlı hacme sahip uygulamalarda, bu jeneratörlerin düşük basınç kaybıyla yüksek ısı transfer verimi sağlayabilmesi önemli bir avantaj sunmaktadır. Literatürde yapılan çok sayıda deneysel ve sayısal çalışmada, vorteks jeneratörlerinin Nusselt sayısında ciddi artışlara yol açtığı ve yüzey sıcaklıklarında kayda değer düşüşler sağladığı tespit edilmiştir.

Vorteks jeneratörlerinin performansını etkileyen başlıca parametreler; kanat boyutu, büküm açısı, yerleşim düzeni, açıklık oranı, eğim yönü ve konumlandırma sıklığıdır. Bu parametrelerdeki küçük değişiklikler dahi sistemin genel ısıl davranışında önemli farklılıklara neden olabilmektedir. Bu nedenle, vorteks jeneratörlerinin optimize edilmesi, deneysel çalışmalarla birlikte sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) analizleriyle desteklenerek en verimli geometrilerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda artan 3B yazıcı teknolojileri sayesinde, bu elemanların farklı formlarda hızlı ve düşük maliyetle üretilebilmesi, laboratuvar ortamında prototipleme sürecini kolaylaştırmakta ve akademik araştırmalara ivme kazandırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmiş farklı tipteki vorteks jeneratörlerin ısı transferine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde, kanalın tabanına sabit ısı akısı uygulanmıştır. Farklı geometrilerde vorteks jeneratörleri bu kanal içerisine yerleştirilmiş ve farklı hızlarda hava akışına maruz bırakılmıştır. Hava akışının hızı ve ısı akısı gibi parametreler farklı seviyelerde ayarlanarak deneyler tekrarlanıp, bu süreçte yüzey sıcaklıklarındaki değişimler incelenmiştir. Çalışmada, kanal içerisine 3D yazıcıda üretilmiş 7 farklı formda bükümlü vorteks jeneratörleri kanalın tam merkezine yerleştirilerek, ısı transferine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Elektronik devre sistemlerinin günümüze kadar olan gelişimiyle birlikte, yongalarda oluşan ısıнын daha güvenilir bir şekilde sistemden dışarı atılması gerekliliği her zaman önemli bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle yonga modül gibi farklı devre elemanlarının veya bileşenlerin bir araya gelmesiyle meydana gelen daha karmaşık sistemlerin ürettikleri ısı miktarı önemli ölçüde yüksektir. Bu durum, ısıнын etkili bir şekilde sistemden atılmasını sağlamak için yapılan çalışmalara duyulan ihtiyacı çoğaltmış ve bu alandaki araştırmaların hızlanmasına neden olmuştur. Yüksek sıcaklıkların elektronik bileşenlerin performansını ve güvenilirliğini olumsuz etkilemesi, bu konuya yönelik daha yenilikçi ve etkin soğutma yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Bildiğimiz üzere, ısınan bir yüzeyden ısıнын etkili bir şekilde uzaklaştırılmasının yollarından biri, yalnızca yüzey üzerinden değil, aynı zamanda kanal içerisinde akışta meydana gelen vorteks etkilerinin ısı transferine katkı sağlamasıdır. Bu tarz çalışmalarda çoğunlukla ısınan yüzeylerin üzerine bükümlü vorteks jeneratörler yerleşimi ile akış laminar halden türbülanslı bir hale getirilerek etkin ısı transferi sağlanmaya çalışılır. Dayanıklı mekanik özellikleri ve hafifliği nedeniyle bükümlü vorteks jeneratörleri, son yıllarda elektronik entegre sistemlerin soğutulmasında ve pek çok farklı mühendislik alanında yeni bir uygulama olarak görülmektedir. Literatürde yer alan, bükümlü vorteks jeneratörleri ile ilgili çalışmalar detaylı olarak aşağıda verilmiştir.

Eiamsa vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada, dikdörtgen bir kanal içerisinde birden fazla sayıda bükümlü vorteks jeneratörünün ısı transferi ve akışkan sürtünme özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Deneyler, Değişken sayılarda türbülans koşulları oluşturmak amacıyla üç farklı büküm oranına (2.5, 3.0 ve 3.5) sahip vorteks jeneratörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, vorteks jeneratörleri için üç farklı büküm aralık oranı (1.66, 1.25, 1.0) ile düzenek oluşturulmuştur. Hava soğutma akışkanı olarak kullanılmış ve Reynolds sayısı 2700 ile 9000 aralığında sabit Prandtl sayısı $Pr=0.7$ ile incelenmiştir. Sonuçlar, vorteks jeneratörü yerleştirilmiş kanalın, düz kanala göre %10.3 ila %169.5 arasında daha yüksek ısı transferi gerçekleştirdiğini göstermiştir. Büküm oranı küçük ve en düşük büküm aralık oranlarına sahip vorteks jeneratörlerinin yerleştirilmiş olduğu kanalların, daha yüksek ısı transferi ve basınç kaybı sonuçlarını ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. (Eiamsa-ard, 2010)

Sabit ısı akısı uygulanan kare kesitli bir kanalda, bükümlü ve kanatçıklı vorteks jeneratörleri kullanılarak akış yapısının değiştirilmesi yoluyla termal performansın nasıl arttırılabileceğini Promvonge vd. (2014) incelemişlerdir. Deneyler, Reynolds sayısının 4000 ile 30.000 aralığındaki koşullarda yapılmış olup, kanala yerleştirilen vorteks jeneratörlerinin ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısına bağlı korelasyonları türetilerek incelenmiştir. Bükümlü çubuk ve kanatçıklı vorteks jeneratörlerinin özellikleri arasında iki büküm oranı ($Y=4$ ve 5), üç kanatçık-yükseklik oranı ($RB=0.1, 0.15$ ve 0.2), dört kanatçık adım-genişlik oranı ($RP = 2, 2.5, 4$ ve 5) ve sabit bir kanatçık yerleşim açısı ($\alpha = 30^\circ$) bulunmaktadır. Deney sonuçları, artan kanatçık-yükseklik oranı ve azalan kanatçık adım-genişlik oranı ile Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısının arttığını göstermektedir. En yüksek ısı transferi ve sürtünme katsayısı kanatçık-yükseklik oranı 0.2 , $RP=2$ ve $Y=4$ ile elde edilmişken; en yüksek termal performans $RB=0.1$, $RP=2$ ve $Y=4$ koşulunda elde edilmiştir. Çoklu vorteks jeneratörleri uygulaması, yalnızca bükümlü tek sayıda vorteks jeneratörüne

kıyasla, termal performansı %17 oranında arttırmış olduğu görülmüştür. (Promvonge vd., 2014)

Promvonge (2015) yapmış olduğu çalışmada, cidarlarına sabit ısı akısı uygulanan kare kesitli bir kanalda 30° V tipi yerleşiminde kanatçık ve dört bükümlü vorteks jeneratörlerinin birlikte kullanımının ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Çalışma, Reynolds sayısının 4000 ile 30.000 aralığında değerleri için yapmıştır. Deneylerde, "V kanatçıklı ve bükümlü çubuk" olarak adlandırılan bu kombinasyon, dört bükümlü çubukların kenarlarına 30° V kanatçıklar eklenerek elde edilmiştir. Dört farklı kanatçık yüksekliği (RB=0.16, 0.21, 0.32 ve 0.42) ve dört farklı kanatçık adımı (RP=4, 8, 12 ve 16) ile oluşturulmuştur. Sonuçlar, Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısının kanatçık yüksekliği arttıkça yükseldiğini, kanatçık adımı arttıkça ise azaldığını göstermektedir. (Promvonge, 2015)

Chokphoemphun vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, cidarlarına sabit ısı akısı uygulanan yuvarlak kesitli bir boruya yerleştirilen tek, çift, üçlü ve dörtlü bükümlü vorteks jeneratörlerini kullanarak, oluşan ısı transferini ve basınç kaybını deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, boru içerisine farklı sayılarda, aynı yönde veya zıt yönde bükümlü vorteks jeneratörlerinin yerleştirildiği türbülanslı hava akışı koşullarında ve Reynolds sayısının (Re) 5300 ile 24000 aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, Nusselt sayısının ve sürtünme katsayısının artan Reynolds sayısı ve vorteks jeneratörü sayısı ile arttığını göstermektedir. (Chokphoemphun vd., 2015a)

Ana akış bölgesine yerleştirilen kanatçıklı vorteks jeneratörlerinin, dairesel kesitli bir kanal içerisindeki akış ve termal performans üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal olarak Chokphoemphun vd. (2015) tarafından incelenmiştir. Deneyler, cidarına sabit ısı akısı uygulanan bir boruda yapılmıştır. Çalışma, Reynolds sayısının 5300 ile 24000 arasında değişen türbülanslı hava akışı koşullarında gerçekleştirilmiş olup, 30° sabit yerleşim açısına sahip vorteks jeneratörler, dört farklı kanatçık adım oranında ve üç farklı kanatçık genişlik oranında test borusuna yerleştirilmiştir. Farklı kanatçık adım oranı ve kanatçık genişlik oranı değerlerinde elde edilen sonuçlar, düz boru ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları, vorteks jeneratörlerinin ısı transferini ve sürtünme kaybını düz boru akışına kıyasla önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı, kanatçık genişlik oranı ve Reynolds sayısının artışıyla yükselirken, kanatçık adım oranının artışı ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kanatçıklı vorteks jeneratörü yerleştirilmiş borudaki akış yapısını ve ısı transferini artırma mekanizmalarını daha detaylı incelemek için yapılan deneysel çalışmalar, sayısal bir çalışma ile desteklenmiştir. (Chokphoemphun vd., 2015b)

Piriyarungrad vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, konik bükümlü vorteks jeneratörlerinin kanal içerisine yerleştirilmesinin, koniklik açısı ile büküm oranının ısı transfer hızı, basınç düşüşü ve termal performans faktörü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, dört farklı koniklik açısına sahip bükümlü vorteks jeneratörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her koniklik açısında, konik bükümlü vorteks jeneratörleri üç farklı büküm oranında bükülmüştür. Tüm vorteks jeneratörleri, 6000 ile 20000 arasındaki Reynolds sayıları için türbülanslı akış rejiminde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar düz tip ile kıyaslanmış olup, ısı transferinin artışı ve sürtünme kaybı, koniklik açısının ve burğu oranının azalması ile artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Termal

performans faktörü ise koniklik açısının artması ve burgu oranının azalması ile artma eğilimi göstermektedir. (Piriyaungrod vd., 2015)

Sheikholeslami vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, ısı eşanjörlerindeki ısı transferini artırmak amacıyla kullanılan çeşitli vorteks jeneratörleri (sarmal borular, genişletilmiş yüzeyler (kanatçık, lamelli şerit, kanatçık), pürüzlü yüzeyler (kıvrımlı boru, kanatçık) ve döngüsel akış cihazları (burulmuş şerit, konik halka, salyangoz giriş türbülans yaratıcı, vorteks halkaları, sarmal tel) üzerine kapsamlı bir literatür incelemesi yapmıştır. Elde edilen sonuçlarda, basınç düşüşü farkı dikkate alındığında, tel sarımının daha iyi genel performans sağladığı çıkarımı gözlemlenmiştir. Kare kesitli tel vorteks jeneratörünün, düz borulara kıyasla önemli ölçüde ısı transferi ve sürtünme kaybı artışı sağlamakta olduğu sonucu elde edilmiştir. (Sheikholeslami vd., 2015)

Yadav vd. (2015) laminar akışın olduğu bükümlü vorteks jeneratörü yerleştirilmiş farklı geometride olan kanallar içerisindeki ısı transferini ve sürtünme etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan kanal geometrisi kare ve altıgen kesitli kanalları kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar, dairesel kanalla karşılaştırılmıştır. İncelenen tüm kanallar aynı hidrolik çapa sahiptir. Deneylerde kullanılan vorteks jeneratörlerinin bükülme oranları 3.5, 4.5, 5.5 ve 6.5 olarak belirlenmiştir. Kare, altıgen ve dairesel kesitli kanallar üzerinde yapılan deneyler ve CFD analizleri sonucunda hem Nusselt sayısının, hem de sürtünme faktörünün dairesel olmayan kanalın kenar uzunluğu arttıkça yükseldiği gözlenmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda en yüksek Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü, bükümlü vorteks jeneratörü bulunan dairesel kanalda elde edilmiştir. (Yadav vd., 2015)

Cidarı sabit ısı akısına maruz bırakılan yuvarlak kesitli bir boruda 30° açılı ve V şekilli kanatçıklarla donatılmış çift bükümlü vorteks jeneratörlerinin akışkanın ısı transferi üzerindeki etkisi, Tamna vd. (2016) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Deneyler, Reynolds sayısının (Re) 5300 ile 24000 arasındaki değerlerinde yapılmıştır. "V-kanatçıklı bükümlü çubuk" olarak adlandırılan bu vorteks jeneratörleri, büküm oranı 4 olan çift bükümlü çubukların kenarlarına V şeklinde kanatçıklar eklenerek elde edilmiştir. Deneyler, dört farklı kanatçık yüksekliği oranı (0.07, 0.09, 0.14 ve 0.19) ve kanatçık adımı oranı (1.9) ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısına göre, Re ve kanatçık yüksekliği oranı arttıkça ısı transferi ve basınç kaybının arttığını göstermiştir. (Tamna vd., 2016)

Singh vd. (2016) yapmış oldukları çalışmada, sabit ısı akısına sahip pürüzlü bir borunun ısı transferi ve akış karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Test bölgesinde vorteksli bir akış oluşturmak için katı halka ekler ve bükümlü çubuklar kullanılmıştır. Deneyler, Reynolds sayısının 6300 ile 22500 aralığındaki değerlerinde yapılmıştır. Çalışma, kanal içerisine yerleştirilen katı halka ve bükümlü çubukların, sırasıyla 107–293 arasında değişen Nusselt sayısı, 0.93–0.99 aralığında ölçülen sürtünme katsayısı ve 1.46–1.61 arasında hesaplanan termal performans faktörü ile ısı transferi ve akış karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Bükümlü vorteks jeneratörlerinin kanala yerleştirilmesiyle, maksimum Nusselt sayısı, sürtünme katsayısı ve termal performans faktörünün, konvansiyonel vorteks jeneratörlerine göre yaklaşık dört kat arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada, Nusselt sayısı, sürtünme katsayısı ve termal

performans faktörü için akış ve geometrik parametrelere dayalı korelasyonlar geliştirilmiştir. (V. Singh vd., 2016)

Skullong vd. (2016), sabit ısı akısına sahip dairesel kesitli bir boru içerisinde, çift taraflı delta kanat çiftlerine sahip düz bir vorteks jeneratörünü (delta-kanat vorteks jeneratörü) uzunlamasına bir vorteks jeneratörü olarak kullanmışlardır. Bu çalışma kapsamında, söz konusu jeneratörün zorlanmış taşınım yoluyla ısı transferi ve akış sürtünmesi üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Reynolds sayısı 4200 ile 25.500 aralığında olan türbülanslı hava akışı koşullarında deneysel incelemeler yapılmıştır. Deneylerde, delta kanatlı düz bir vorteks jeneratörü kullanılmış ve bu kanatlar üç farklı kanat eğim açısı ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) ile beş farklı kanat adımı-boru çapı oranı ($P/D = PR = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ve 2.5) için değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, ısı transferi performansı Nusselt sayısı (Nu) ve basınç kaybı ise sürtünme katsayısı (f) cinsinden analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, delta kanat çiftlerine sahip düz vorteks jeneratörünün, düz boruya kıyasla Nu değerini %505 oranında artırırken, f değerini ise 69 kat yükselttiğini göstermektedir. Ayrıca, en yüksek termal iyileşme faktörünün 1.49 olduğu belirlenmiştir. Akış davranışı ve ısı transferi mekanizmasını daha derinlemesine anlamak amacıyla ek olarak üç boyutlu sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları gerçekleştirilmiş ve bu simülasyonların deneysel verilerle uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

Kare kesitli bir kanala yerleştirilen 30° eğik at nalı şeklinde saptırıcıların ısı transferi üzerindeki etkileri, Skullong vd. (2016) tarafından hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmişlerdir. Sabit yüzey ısı akısına sahip kanaldan geçen hava ile yapılan deneylerde, türbülanslı akış koşullarında Reynolds sayısının 4000 ile 25000 arasında değiştiği durumlar için akış ve ısı transferi davranışları analiz edilmiştir. Eğik at nalı saptırıcı elemanlarına ait ilgili parametreler, üç farklı plaka aralığı ($PR=P/H=0.5, 1$ ve 2) ve beş farklı plaka yüksekliği ($BR=b/H=0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ve 0.25) içermektedir. Bu parametrelerin Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı cinsinden ısı transferi ve enerji kayıpları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, belirli bir plaka yüksekliği değeri için en küçük plaka aralığının ($PR = 0.5$) en yüksek ısı transferi ve sürtünme katsayısı sağladığını göstermiştir. $BR=0.25$ ve $PR=0.5$ değerindeki, en yüksek ısı transferi ve sürtünme katsayısını verirken, $BR=0.2$ ve $PR=1$ değerinde ise en yüksek termal performans elde edilmiştir. Eğik at nalı saptırıcı kullanımı, diğer türbülans oluşturuç elemanlara kıyasla daha yüksek termal performans sağlamaktadır. Ayrıca, ısı transferi mekanizmasını daha iyi anlamak için yapılan sayısal kanal içi akış simülasyonları ile elde edilen sayısal sonuçlar deneysel ölçümlerle uyum göstermektedir. (Skullong, Thianpong, vd., 2016)

Yoong Lim vd. (2017) yapmış oldukları bu çalışmada, bükümlü vorteks jeneratörlerini, vorteks akışına sağlandığı konveksiyonel ısı transferi artışı nedeniyle yaygın olarak kullanılır olmasından dolayı tercih etmiştir. Ancak bu artışa eşlik eden bir de basınç kaybı da meydana gelmiştir. Çalışma akışkanı olarak su kullanılmıştır. Laminer akışlı dairesel bir kanal içerisinde bükümlü vorteks jeneratörleri kullanılarak ısı transferi artışını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı büküm oranlarına sahip bu vorteks jeneratörlerinin, sürtünme katsayısını on kat ve Nusselt sayısını üç kat arttırmış olduğu görülmüştür. Değerlendirme, değişken ve sabit pompalama gücü olmak üzere iki farklı koşul altında yapılmıştır. Serbest ve vorteks akışı kaynaklı konveksiyonel ısı transferleri

arasındaki temel fark, kaldırma kuvveti ile santrifüj kuvvet dengesine göre analiz edilmiş olmasıdır. Bu detaylı performans analizi, laminar zorlanmış konveksiyonda bükümlü vorteks jeneratörlerinin enerji taşınımındaki rolüne dair önemli bulgular sunduğunu ortaya çıkarmıştır. (Lim vd., 2017)

Hong vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, ters yönlü, büyük, küçük ve üst üste olacak şekilde değişik kombinasyonlarla üretilmiş çift bükümlü vorteks jeneratörlerinin spiral ve dairesel kesitli bir borunun içerisine yerleştirilmesi ile kanal içerisindeki termal değişimleri ve akış özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, Reynolds sayısının 8000 ile 22000 arasındaki değerlerine bağlı olarak yapılmıştır. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar düz borunun spiral ve dairesel kesitli boru ile ısı transferi ve akış karakteristiklerinin açısından kıyaslanması sonucunda elde edilmiştir. Sonuçlar, spiral ve dairesel kesitli bir borunun içerisine çift bükümlü vorteks jeneratörlerinin yerleştirilmesinin, düz bir boruya tek adet çift bükümlü vorteks jeneratörünün yerleştirilmesine göre daha yüksek ısı transferi sağladığını, ancak daha yüksek basınç kaybı oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün, büküm oranının azalmasıyla önemli derecede artış gösterdiği gözlemlenmiştir. (Hong vd., 2017)

Dairesel kesitli bir kanala yerleştirilen kare delikli ve bükümlü vorteks jeneratörleri ile ısı transferi ve termal performansın artırılmasına yönelik sayısal bir çalışma Sroysat vd. (2017) tarafından yapılmıştır. Oluşturulan bu vorteks jeneratörü, klasik bükümlü vorteks jeneratörleri ile karşılaştırılarak incelemeler yapılmıştır. Çalışma, üç boyutlu, sabit ısı akısına sahip bir boruda türbülanslı periyodik akış için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ısı transferi ve basınç kaybının delik genişliğinin vorteks jeneratörü genişliğine oranı ve delik uzunluğun vorteks jeneratörü genişliğine oranının azaldıkça arttığını, ancak termal performans faktörünün delik genişliğinin vorteks jeneratörü genişliğine oranı arttıkça artış gösterdiği gözlemlenmiştir. (Sroysat & Eiamsa-ard, 2017)

He vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, cidarına üniform ısı akısı uygulanan kanal içerisine içi boş çapraz bükümlü vorteks jeneratörü yerleştirmiş daha sonra kanal içerisindeki ısı transferi ve sürtünme faktörü özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Deneyler, Reynolds sayısının 5600 ve 18000 aralığındaki değerlerde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, vorteks jeneratörünün iç boşluk mesafesinin 6 mm'den 10 mm'ye artırıldıkça Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörünün önce azalıp ardından arttığını gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, vorteks jeneratörünün 6 mm iç boşluk mesafesiyle kullanılması durumunda, Nusselt sayısının (Nu) düz boruya kıyasla %93 ila %120 oranında arttığı, sürtünme katsayısının ise %883 ila %1042 oranında yükseldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar düz bir boruya ait deneysel veriler ile doğrulama amacıyla standart korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Türbülanslı akış altındaki Nu ve sürtünme faktörü değerlerini tahmin etmek için deneysel verilere dayalı korelasyonlar geliştirilmiş ve bu parametrelerin deneysel verilerle uyumu Nusselt sayısı (Nu) için %3.6, sürtünme faktörü için % 2.3 değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir. (He vd., 2018)

Skullong vd (2018) yapmış oldukları çalışmada, sabit ısı akısı uygulanan bir boruda eğri kanatçıklı (CW) vorteks jeneratörlerinin termal ve akış davranışları üzerindeki etkisini hem deneysel olarak hem sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, her iki kenarında 45° ile yerleştirilmiş kanatçıklar (CW) bulunan düz bir vorteks jeneratörü, karşıt yönlerde bükümlü iki adet uzunlamasına yerleşimli vorteks jeneratör çifti oluşturarak test borusunda türbülanslı akış karışımını desteklemek ve sınır tabakasını bozarak ısı transfer hızını artırmak amaçlanmıştır. Borudaki hava akışı ve ısı transferi karakteristiği, Reynolds sayısının (Re) 4150 ile 25,400 aralığında incelenmiştir. Eğri kanatçıklı vorteks jeneratörü (CWT) geometrik parametreleri, kanatçık açısı 45° , üç farklı kanatçık yüksekliği ($b/D=BR=0.1, 0.2$ ve 0.3) ve kanatçık adım sayısı ($P/D=PR=0.5, 1.0$ ve 2.0) olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kanatçık yüksekliği ($BR=0.1$) ve kanatçık adım sayısı ($PR=1.0$) değerlerinde kanatçıklı vorteks jeneratörünün (CWT) maksimum termal verimlilik faktörünün (TEF) yaklaşık 1.62 olduğunu göstermektedir. Akış karakteristiği ve ısı transfer mekanizmasını daha detaylı anlamak için üç boyutlu bir CFD incelemesi yapılmış, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. (Skullong vd., 2018)

Dairesel kesitli bir kanal içerisine yerleştirilen vorteks jeneratörlerinin (VG'ler), ısı transferi ve akış karakteristiğine olan etkilerini Xu vd. (2018) deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, vorteks jeneratörsüz (VG'siz) ve vorteks jeneratörlü (VG'li) borulardaki deneysel ölçümler, 6000 ile 33.000 Reynolds sayıları aralığında ve sabit yüzey ısı akısı altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, Dört farklı kanatçık tipi, dar bir vorteks jeneratör çubuğu yardımıyla borunun iç yüzeyine dairesel bir düzenle yerleştirilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre, Nusselt sayısının kanatçık adım oranı ile azaldığı ancak Reynolds sayısı, kanatçık yerleşim açısı ve kanal içi blokaj oranı ile artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Isı transfer mekanizmasını anlamak amacıyla, deney düzeneğine bir yüksek hızlı kamera ve duman jeneratörü yerleştirilerek akış karakteristiği ve ısı transfer mekanizması daha detaylı şekilde gözlemlenmiştir. (Xu vd., 2018)

Piriyarungrod vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, birden fazla bükümlü vorteks jeneratörü (M-TT) yerleştirilen daire kesitli bir boru içerisinde akışın termal ve hidrolik özelliklerini incelemişlerdir. Deney düzeneği birden fazla bükümlü vorteks jeneratörü, daha büyük çaplı bir bükümlü vorteks jeneratörü ve bu büyük çaplı vorteks jeneratörüyle birlikte yerleştirilmiş daha küçük çaplı bükümlü vorteks jeneratörlerinin yerleşiminden oluşmaktadır. Çalışma, küçük bükümlü vorteks jeneratörleri için 6 farklı bükülme oranı ($y/w=2.5, 5, 10, 15, 20$ ve 25) ve 5 farklı küçük vorteks jeneratör yerleşim sayısını ($N=2, 3, 4, 5$ ve 6) kapsamaktadır. Deneylerde, çalışma akışkanı olarak havayı kullanarak 6000 ile 20000 Reynolds sayıları aralığında ve sabit cidar ısı akısı koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, büküm sayısı ($N=3, 4, 5$ ve 6) olan birden fazla bükümlü vorteks jeneratörlerinin (M-TT) kullanımının, tek bir bükümlü vorteks jeneratörüne kıyasla ısı transferi artışında ve sürtünme faktöründe önemli ölçüde artış sağladığını göstermektedir. Birden fazla bükümlü vorteks jeneratörü (M-TT) kullanıldığında, Nusselt sayısı (Nu), sürtünme faktörü (f) ve termal ve hidrolik performans faktörü (η) artmakta olduğu gözlemlenmiştir. (Piriyarungrod vd., 2018)

Nakhchi ve Esfahani (2019) yapmış oldukları çalışmada, farklı kesim şekillerine sahip bükümlü vorteks jeneratörlerinin yerleştirildiği dairesel bir boru içerisindeki türbülanslı akışın termo-hidrolik performansını ve karakteristiğini sayısal olarak incelemişlerdir. Kesim geometrileri, iki farklı kesim seti (tek kesim ve çift kesim) için

farklı kesim oranlarına sahip olup ve dikdörtgen kesitli yapıya sahiptir. Üç boyutlu simülasyonlar, literatürde mevcut olan deneysel verilerle karşılaştırma yapılarak doğrulanmıştır. Türbülanslı akışın temel korelasyonları, 5000 ile 16000 Reynolds sayıları aralığında (RNG) k-ε türbülans modeli kullanılarak çözümlenmiştir. Vorteks akışı nedeniyle, ısı transferi ve basınç düşüşü üzerinde duvar bölgesi ve çekirdek bölgesi olmak üzere iki bölgenin etkileri tartışılmıştır. Dikdörtgen kesitli bükümlü şeritlerin (RCT) varlığı, duvar yakınında akışkan karışımını ve merkezkaç kuvvetini artırarak bu bölgede ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sonuçlar, ısı transferi ve basınç düşüşünün kesim oranına bağlı olduğunu göstermektedir. (Nakhchi & Esfahani, 2019)

Çok sayıda gruplanmış bükümlü vorteks jeneratörüyle donatılmış dairesel kesitli bir kanala sahip sebze kurutucusuna yerleştirilen biberlerin, hava akışıyla gerçekleşen kuruma davranışlarını Chuwattanakul vd. (2019) deneysel olarak incelemiştir. Deneylerde, çok sayıda gruplanmış bükümlü vorteks jeneratörleri, kanal yatağının altındaki hava girişine yerleştirilmiştir. Çalışmada, kanal içerisindeki yüzeysel hava hızının, nem içeriği, nem içerik oranı ve kuruma hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, dairesel kanallı sebze kurutucusunun, biberlerin nem içeriğini geleneksel bir sebze kurutucusuna kıyasla daha hızlı azaltabildiğini göstermekte olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, dairesel kanallı sebze kurutucusunun performansını tahmin etmek için beş farklı kurutma modeli değerlendirilmiştir. (Chuwattanakul & Eiamsa-Ard, 2019)

Kosker ve Yılmaz (2020) yapmış oldukları çalışmada, bükümlü vorteks jeneratörlerinin halka şeklindeki kanatçıklar içerisinde boruya yerleştirilmesinden kaynaklanan etkinin ısı transferini artırmadaki rolünü hem deneysel hem sayısal olarak incelemiştir. Çalışma 5840 ile 30900 Reynolds sayıları aralığında analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Nusselt sayıları eğrilik oranı arttıkça ve Reynolds sayısı ile bükülme oranı azaldıkça artmış olduğu gözlemlenmiştir. Eğri bükümlü vorteks jeneratörleri, düz boruya kıyasla daha verimli olmasına rağmen, klasik bükümlü vorteks jeneratörlerine kıyasla ısı transfer verimliliğinde kayıplar gözlenmiştir. Analiz koşulları altında, en düşük eğrilik oranı ve en yüksek bükülme oranı için, bu etki nedeniyle bükümlü vorteks jeneratörlerinin normal verimlilik artışının %28'ini kaybettiği gözlemlenmiştir. (Kosker & Yılmaz, 2020)

Mushatet vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, bükümlü vorteks jeneratörlerinin yeni konik konfigürasyonlarının bir boru içerisindeki termal ve hidrodinamik koşullar üzerindeki etkileri, en yüksek termal performans faktörünü sağlayan en iyi konfigürasyonu belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Boru yüzeyi sabit bir ısı akısı altında tutulmuş ve çalışma akışkanı olarak hava seçilmiştir. Deneyler, Reynolds sayısının 10000 ile 40000 aralığında değerleri için türbülanslı akışta gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde RNG k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlarda kaydedilen maksimum artış, Nusselt sayısı için sırasıyla %75 ve %100, sürtünme faktörü için ise sırasıyla %220 ve %226 olmuştur. Benzer şekilde, deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum termal performans faktörü sırasıyla 1.19 ve 1.37 olarak belirlenmiştir. Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve termal performans faktörü için elde edilen deneysel veriler daha sonra ampirik korelasyonlarla desteklenmiştir. (Mushatet vd., 2020)

Chu vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, çeşitli formlarda bükümlü vorteks jeneratörleri konfigürasyonlarıyla donatılmış boruların termo-hidrolik performansını, türbülans geçiş bölgesi olarak kabul edilen 4000 ile 10.000 Reynolds sayısı aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Düz boru için elde edilen Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörü (f) değerlerinin, Gnielinski ve Filonenko denklemleriyle iyi bir uyum gösterdiği ve ortalama sapmaların sırasıyla %9.5 ve %2.8 olduğu gözlemlenmiştir. Bükümlü vorteks jeneratörü yerleştirilen borularda ise, bükümlü vorteks jeneratörü ile boru arasındaki boşluk etkisini içeren mevcut korelasyon, ölçüm sonuçlarını $\pm\%10$ 'luk bir sapma ile doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir. Dört farklı büküm oranına sahip ardışık bükümlü vorteks jeneratörü ile en yüksek kapsamlı termal performans 1.08 ile 1.10 aralığında elde edilmiştir. Ancak, boşluk oranı arttırıldığı zaman Nu ve f sırasıyla %6.7 ve %11.6 oranında azalmıştır. Ayrıca, türbülans geçiş bölgesinde düz borudan daha düşük değerlere düşerek negatif yönde etkilenmiş olduğu gözlemlenmiştir. (Chu vd., 2020)

Arimandi vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, birleştirilmiş vorteks jeneratörleri, bükümlü vorteks jeneratörleri ve çalışma akışkanı olarak $Al_2O_3-H_2O$ nano akışkan kullanımının etkisi üzerine sayısal bir inceleme yapmışlardır. Çalışma, çift borulu bir ısı eşanjöründe ısı transfer oranı ve basınç düşüşü davranışları üzerine etkilerinin görülmesi için yapılmıştır. Deneyler, birleşik vorteks jeneratörü ve bükümlü vorteks jeneratörüne optimize edilmiş olan geometrisini elde etmek amacıyla merkezi bileşik tasarıma dayalı tepki yüzeyi metodolojisi kullanılmıştır. Maksimum Nusselt sayısına ve minimum sürtünme faktörüne ulaşmak amacıyla, farklı adım oranları 0.09 ve 0.18, açılma açıları 30° ve Reynolds sayıları 5000 – 20000 arasındaki durumlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, adım oranının Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu ve verimliliğin orijinal tasarıma kıyasla beş kata kadar arttığını göstermektedir. Ek olarak, yeni birleşik tasarımdaki vorteks jeneratörlerinin açısının azaltılmasıyla hem Nusselt sayısı hem de sürtünme faktörü artmakta olduğu gözlemlenmiştir. (Arimandi vd., 2020)

Bir kanal içerisine yerleştirilen birden fazla bükümlü vorteks jeneratörünün, akış üzerindeki ısı transferine etkisini Eiamsa vd. (2021) deneysel olarak incelemişlerdir. Deney parametreleri; 2, 4 ve 6 adet vorteks jeneratörü grup sayısı, 4.0, 5.0 ve 6.0 büküm oranları ve aynı yönde dönen ile ters yönde dönen iki farklı vorteks jeneratörü düzenlemesini olarak belirlemişlerdir. Deneyler, çalışma akışkanı olarak hava kullanılarak sabit bir ısı akışı altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, tüm çoklu bükümlü vorteks jeneratörü demetlerinin, tipik bir bükümlü vorteks jeneratörüne göre daha yüksek ısı transfer oranları, basınç kayıpları ve termo-hidrolik performans sağladığını göstermiştir. Isı transfer oranı Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü, vorteks jeneratör grup sayısı ile artmış, büküm oranı ile azalmıştır. Benzer çalışma koşullarında, ters yönlü akış sağlayan vorteks jeneratörü kombinasyonları, aynı yönlü akış kombinasyonlarına kıyasla daha yüksek ısı transferi Nusselt sayısı ve sürtünme faktörleri sağlamıştır. En yüksek termo-hidrolik performans 1.33, büküm oranı 4.0 ve vorteks jeneratörü grup sayısı 6 olduğunda ve Reynolds sayısı 6000 değerinde elde edilmiştir. (Eiamsa-ard vd., 2021)

Promvong ve Skullong. (2021) yapmış oldukları çalışmada, V tipi kanatçıklı, zıt yönlü bükümlü çift vorteks jeneratörlerinin yerleştirildiği sabit ısı akışı uygulanan bir

tüpte termal ve hidrolik performansın deneysel olarak iyileştirilmesini incelemişlerdir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmış olup, tüp içerisinde 5300 ile 24000 arasında değişen Reynolds sayılarında türbülanslı akış koşullarında çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, çift zıt bükümlü vorteks jeneratörünün, kenarlarına monte edilmiş 30° açılı V şekilli dikdörtgen kanatçıklar ile birleştirilmiştir. Bu yapı "VW-CTT" olarak adlandırılmıştır. Kanatçık parametrelerinin ısı transferi üzerindeki etkileri, Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme katsayısı ile tanımlanan korelasyonlar üzerinden değerlendirilmiş; bu kapsamda termal ve hidrolik performans katsayısı dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, VW-CTT' nin yalnızca düz tüpün üzerinde Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörünü önemli ölçüde artırabileceği gözlemlenmiştir. (Promvonge & Skullong, 2021)

Bilen vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada, boru girişine sabitlenmiş ve farklı dönme açılarında (0° , 22.5° , 41° ve 50°) vorteks jeneratörlerinin boru akışında ısı transferi ve akış özelliklerine etkileri, sabit bir ısı akısı koşulunda ve Reynolds (Re) sayısı 2400 ile 23000 arasındaki değerlerinde deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Eksenel tip vorteks jeneratörü, türbülans etkisini artırmayı ve borudaki toplam akış uzunluğunu uzatarak teğetsel hızlanmayı sağlamayı amaçlamaktadır. Deneyler, 15 mm iç çapa ve 675 mm uzunluğa sahip pürüzsüz alüminyum boruda, türbülanslı hava akışları için vorteks jeneratörleri ile ve jeneratör olmadan gerçekleştirilmiştir. Yerel ve ortalama Nusselt (Nu) sayıları ve sürtünme faktörü (f) için Re sayısı ve dönme açısı fonksiyonu olarak deneysel korelasyonlar geliştirilmiştir. Çalışmada, farklı dönme açılarıyla elde edilen ısı transferi ve sürtünme faktörü sonuçları, pürüzsüz boru sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, maksimum ısı transfer oranının $\theta = 50^\circ$ dönme açısında elde edildiğini ve ısı transfer oranının dönme açısı ve Re sayısının artışıyla arttığını göstermekte olduğu gözlemlenmiştir. (Bilen vd., 2022)

Singh vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada, vorteks jeneratörü üzerindeki bükümlerden kaynaklanan birincil ve ikincil girdap akışı, vorteks jeneratöründeki v-kesit ve dişli v-kesitli bükümlü vorteks jeneratörünün Nu (ısı transfer oranı), f (sürtünme faktörü) ve CPE (termal performans kriteri) üzerindeki etkisi deneysel olarak incelemişlerdir. Çift cidarlı kanal içerisinde çalışma akışkanı olarak su kullanılarak, Reynolds sayısının 6000 ile 13.000 aralığında olduğu koşullarda deneyler gerçekleştirilmiş. Deneyler, Re (Reynolds sayısı), Pr (Prandtl sayısı), b/c (v-kesit derinliğinin kesit genişliğine oranı) ve e/c (v-kesit derinliğine göre v-kesit üzerindeki diş derinliğinin oranı) gibi faktörler açısından Nu ve f için korelasyonlar regresyon analizi ile geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, v-kesit üzerindeki dişlerin dahil edilmesinin ikincil bir girdap akışı yarattığını, bunun da Nusselt sayısını daha da artırdığını ve daha yüksek Reynolds sayısı değerlerinde daha derin kesitlerin ısı transfer hızındaki azalmayı minimize etme yeteneğine sahip olduğu sonucunun elde edildiği gözlemlenmiştir. (S. K. Singh vd., 2022)

Hong vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada, geleneksel düz borulu ısı değiştiricilerin ısı transfer potansiyelini artırmak amacıyla, sıvı-gaz ısı değişimi gibi tipik atık ısı geri kazanım senaryolarında çoklu ve burgulu vorteks jeneratörlerinin spiral oluklu boruya entegrasyonunu içeren sinerjik bir termal iyileştirme üzerine çalışma yapmışlardır. Çok sayıda burgulu vorteks jeneratör sayılarının, enine boşluk oranlarının ve boyuna delik uzunluk oranlarının borudaki türbülanslı ısı transferi ve akış özelliklerine

etkileri, akış alanları, sıcaklık konturları, yerel Nusselt sayısı (Nu) dağılımları, vorteks yapıları ve türbülans kinetik enerjisi konturları, ortalama Nu, sürtünme faktörü ve genel termal performans değerlendirme indeksi açısından sayısal olarak incelenmiştir. Bulgular, spiral oluklu boruya göre çok sayıda burgulu vorteks jeneratör yerleştirmenin akış alanlarını ve sıcaklık dağılımlarını büyük ölçüde homojenleştirip Nu ve f değerlerini artırdığını, bunların her ikisinin de çok sayıda burgulu vorteks jeneratör sayısının artışıyla yükseldiğini kanıtlamıştır. termal performans değerlendirme indeksi ise çok sayıda burgulu vorteks jeneratör sayısı arttıkça önce düşüş, sonra artış göstermiş olduğu gözlemlenmiştir. (Hong vd., 2023)

Yang vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada, spiral çubuk vorteks jeneratörü, bükümlü vorteks jeneratörü, akış yönlendirici kanatçık ve dişli oluklu vorteks jeneratörü türlerinin akış ve ısı transfer özellikleri 15° ile 60° büküm açısı ve Reynolds sayısının 6000 ile 12000 aralığındaki değerleri için sayısal ve deneysel olarak karşılaştırma yapmışlardır. Deney sonuçları, dişli oluklu vorteks jeneratörünün akış merkez bölgesinde en yüksek Nusselt sayısına (Nu) sahip olduğunu ve $Re=6000$ için diğer üç vorteks jeneratörüne kıyasla % 19.19 ile % 55.98 daha yüksek bir Nu değerine ulaştığını göstermektedir. Merkezi bölge dışında, spiral çubuk vorteks jeneratörünün en yüksek Nu değerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, dişli oluklu vorteks jeneratörünün akıştaki basınç kayıplarının diğer üç vorteks jeneratörüne göre çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sayısal analiz, akış bölgesindeki akım çizgilerini, türbülans kinetik enerjisini, girdap dağılımını ve dört vorteks jeneratör tipi için farklı θ ve Re değerlerinde Nu değerini incelemiş ve bu sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. (T. Yang vd., 2023)

Isı transferini arttırmaya yönelik tasarlanan yeni bir vorteks jeneratörü ile boyuna girdaplar oluşturabilen bir akış modeli düzeneğindeki termal performansı, Doğan ve Erzincan (2023) deneysel olarak incelemişlerdir. Türbülans üreticiler, Reynolds sayısının 5000 ile 25000 aralığındaki sayısal değerlerde, ana akış yönündeki vorteks jeneratörleri simetri düzlemine göre birbirlerinin aynası olacak şekilde kanalın taban yüzeyine yerleştirilmiştir. Sabit eğim açısında, bir sıradaki iki vorteks jeneratörü arasındaki yatay mesafenin kanal genişliğine oranı (adım oranı) ve iki vorteks jeneratör ü sırası arasındaki boyuna mesafenin kanal yüksekliğine oranının (boyuna adım oranı) ısı transferi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, adım oranı azaldıkça Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü artmış ve en yüksek artışlar, düz kanala kıyasla sırasıyla 1.44 ve 2.07 kat daha yüksek değerlere ulaşarak, 0.12 adım oranında elde edilmiş olduğu gözlemlenmiştir. (Dogan & Erzincan, 2023)

Abdulhamed vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada, geniş delikli bükümlü vorteks jeneratörlerinin dairesel kesitli bir kanalda ısı iletimi, basınç düşüşü ve termal performans faktörüne etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, bükümlü vorteks jeneratörleri üzerinde 1.0 cm çapında delik çiftleri bulunan ve %1,30 ve %2,70 porozite oranlarına sahip çubuklar kullanılmıştır. Deneylerde çalışma akışkanı olarak hava, dairesel kesitli bir boruda ve türbülanslı akış rejiminde, 4800 ile 9500 arasındaki Reynolds sayıları (Re) aralığındaki koşula bağlı olarak incelenmiştir. Deneylerde, Boru cidarına sabit ısı akısı uygulanan bir sınır durumu oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, delik sayısı arttıkça Nusselt sayısının (Nu), sürtünme faktörünün ve termal performans faktöründe arttığını göstermektedir. (Abdulhamed vd., 2024)

Amin vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada, alt yüzeyinden ısıtılan bir boruya yerleştirilmiş büküm oranı uzunluğa göre azalan vorteks jeneratörünün termal ve hidrolik performansının çap, burulma açısı ve kanat sayısı parametrelerinin etkileri göz önüne alınarak deneysel olarak incelemişlerdir. Çap, burulma açısı ve kanat sayısı parametreleri sırasıyla 13.5 mm ve 15.5 mm (0.5 mm aralıkla), 0° ve 360° (60° aralıkla) ve 2 ile 6 kanatçık sayısı için incelenmiştir. Deneylerde, çalışma akışkanı olarak su kullanılmıştır. Çalışma, Reynolds sayılarının 4583 ile 35000 arasında değiştiği aralıkta yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre büküm oranı uzunluğa göre azalan vorteks jeneratör (DTS) çapı ve burulma açısı arttıkça Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü artmış, $Re=4583$ değerinde maksimuma ulaşmıştır. Ancak, kanatçık sayısı arttıkça Nusselt sayısında azalmalar gözlemlenmiştir. (Mohd Amin vd., 2023)

Değişken bükümlü vorteks jeneratörlerinin ısı transferine olan etkilerini incelemek amacı ile soğutucu düzeneği olan bir dikdörtgen kesitli kanaldan sıcak hava geçirerek ısı transferini ve basınç düşümünü Wenlong vd. (2024) deneysel olarak incelemişlerdir. Vorteks jeneratörlerindeki, büküm sıklığının 3 farklı olacak şekilde sabit bükümlü, artan bükümlü ve azalan bükümlü olarak tiplerinin ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Deneyde oluşan sonuçlar çubukların termoelektrik dönüştürücülerin oluşturduğu elektrik miktarı ile belirlenmiştir. Çubuklardaki büküm oranı minimum π ve maksimum 3π güç üretimi olacak şekilde kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yenilikçi enerji üretim yöntemleri ve harcanan atık enerjinin geri dönüşümü için önemli bir sonuç elde edilmiştir. (W. Yang vd., 2024)

Bu tez çalışmasında, tabanından sabit ısı akısı uygulanmış dikdörtgen kesitli bir kanala yerleştirilen farklı tipte bükümlü vorteks jeneratörlerinin ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Deneyler, farklı ısı akısı ve farklı hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, farklı tiplerdeki vorteks jeneratörlerinden elde edilen sonuçlar, boş kanaldan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan elektronik sistemlerin tasarımında ve yüzey sıcaklıklarının düşürülmesinde uygun vorteks jeneratörü formunun belirlenmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

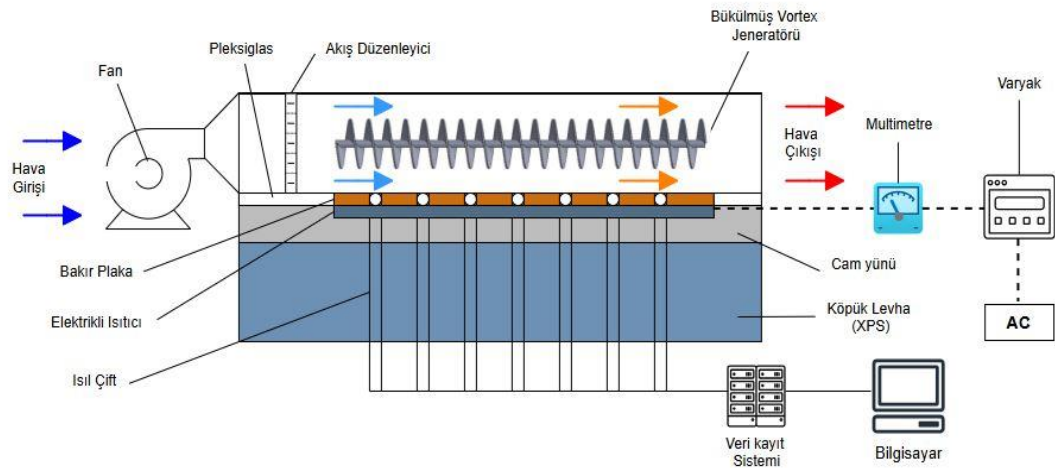
3. MATERYAL VE METOT

Elektronik devre elemanlarının sıcaklığının düşürülmesi, devre elemanlarındaki ortaya çıkan ısı enerjisinin, sistem dışına atılması ile gerçekleşir. Bu süreç, elektronik entegre devresinin hedeflenen çalışma sıcaklığı aralığında kalmasını sağlamak için, sisteme uygun soğutma akışkanının ve akışkan için uyumlu bir soğutma sisteminin seçilmesi ile gerçekleştirilebilir. Bu bağlamda elektronik sistemlerde ısı transferinin fiziksel olarak sistemden uzaklaştırılmasını araştırmak için Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Termodinamik Laboratuvarında bir deney düzeneği kurulmuştur.

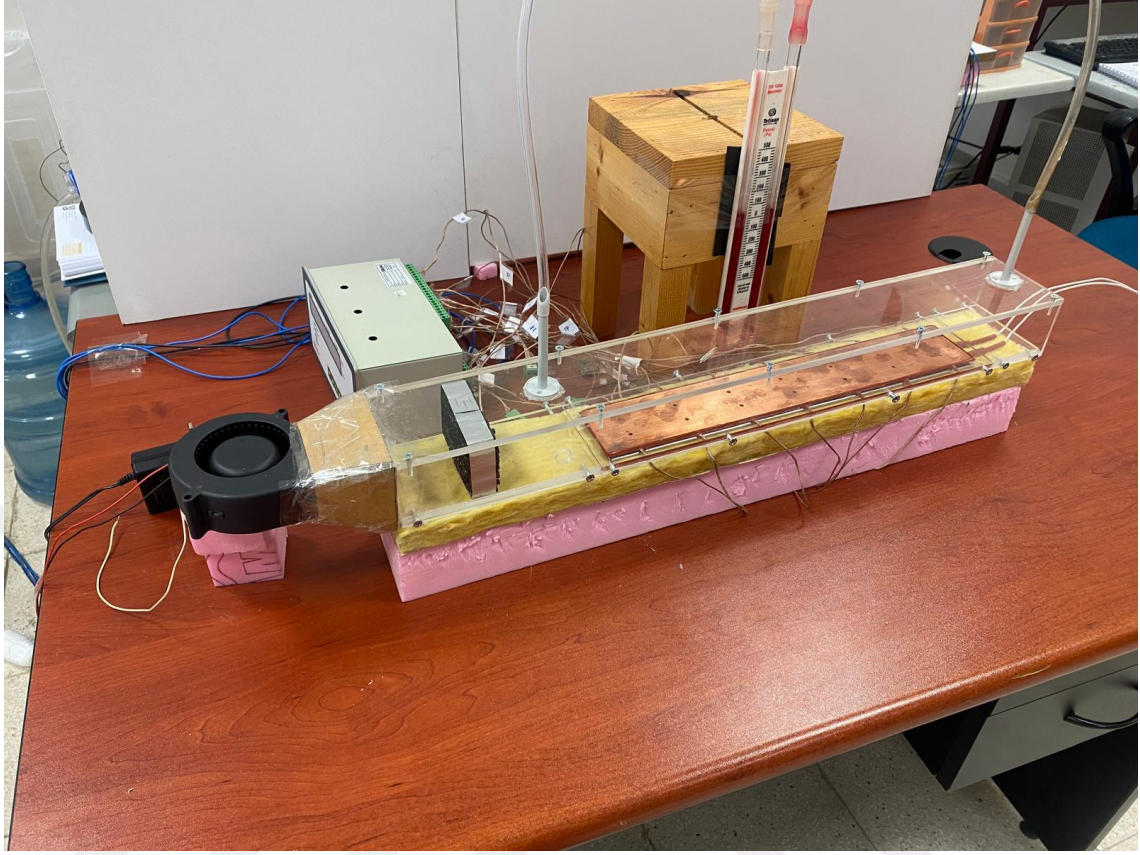
Bu kısımda deney düzeneğini oluşturan bölümlerle çalışmaların nasıl yapıldığına dair detaylı bilgiler verilmiştir.

3.1. Deney Düzeneği

Kanal içerisinde ısınan bir yüzeyin türbülanslı akış koşullarında çeşitli bükümlü vorteks jeneratörleri vasıtasıyla soğutulması için kurulan düzeneğin görünümü şekil 3.1’de, açıklamalı şematik çizimi ise şekil 3.2’de verilmiştir. Şekildeki deney düzeneğinde havanın kanal içerisine girmesini sağlayan 7.2 W gücünde, 4500 dev/dk hızında, 12 V ile çalışan bir fan bulunmaktadır. Kanal girişinde havanın üniform akışını sağlamak için akış düzenleyici kullanılmıştır. Test bölgesinde ise bakır plakaya aralıklı yerleştirilmiş 14 adet ısı çift (termokupl), ısıtıcı eleman, yalıtım için cam yünü, XPS (köpük levha) bulunmaktadır. Ayrıca, sistemde AC güç ünitesi ve sıcaklıkların ölçülüp bilgisayar tarafından kaydedilmesini sağlayan Elimko E680 veri depolama aygıtı bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin genel görünümü

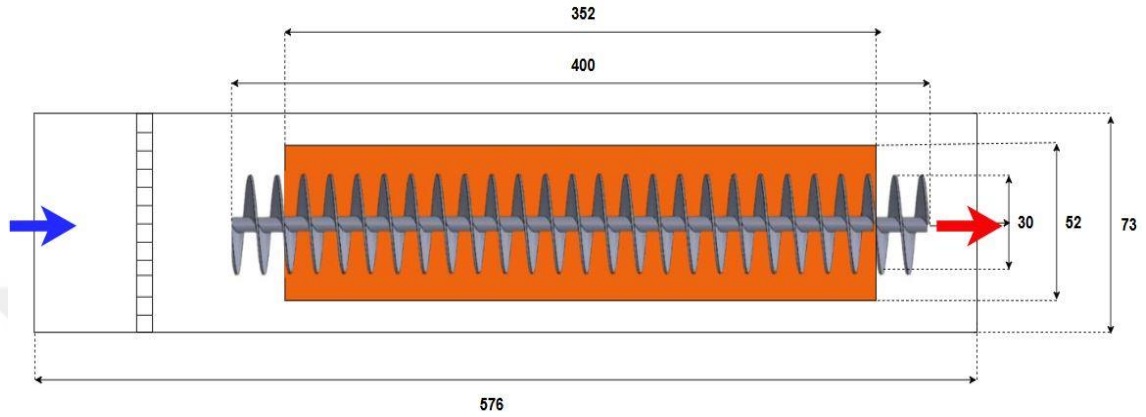
3.1.1 Test bölgesi

Şekil 3.2’ de verilmiş olan deney düzeneği, 576x73x52 mm ölçülerinde 5 mm kalınlığa sahip pleksiglas malzemeden yapılmış dikdörtgenler prizması şeklinde bir kanaldan oluşmaktadır. Kanal içerisine havanın üniform olarak girebilmesi için akış düzeltici yerleştirilmiştir. Test bölgesinde hava giriş çıkış doğrultusunda kanal başlangıç noktasından 50 mm uzaklığa bir adet akış düzenleyici yerleştirilmiştir. Kanal girişine yerleştirilen akış düzenleyici 3 mm çapında, 25 mm uzunluğunda 60x40 mm boyutunda birçok plastik borunun bir araya getirilmesiyle ile oluşturulmuştur. Kanalın alt zemin kısmında gerekli ölçümlerin alındığı test bölgesi olan bakır plaka bulunmaktadır ve bu test bölgesi yüksek sıcaklıklara dayanıklı ($\approx 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) silikon bazlı yapıştırıcı ile pleksiglas alt çerçeveye sabitlenmiştir.

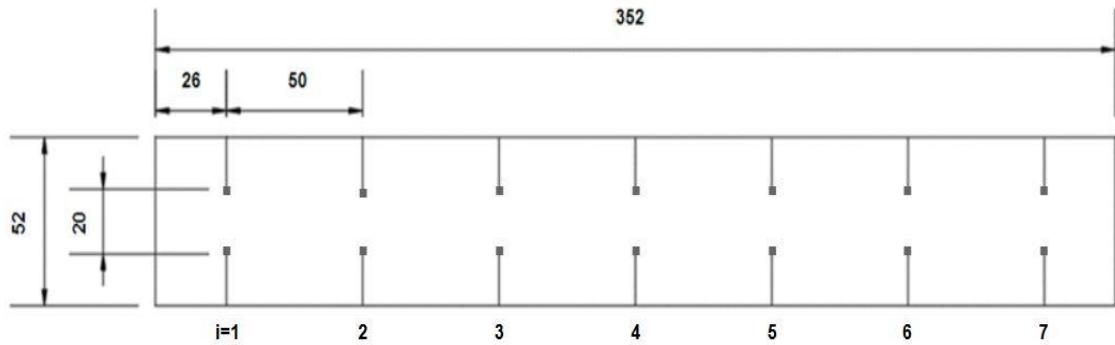
Test bölgesinde bakır plaka, kanal tabanının yan kenarlar ile arasında 10 mm pay olacak şekilde ve giriş kısmından 152 mm uzaklıkta, çıkış kısmına ise 52 mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. T tipi ısıl çiftler pleksiglas malzemeye tamamen gömülü olacak şekilde bakır plaka üzerine iki taraftan da 26 mm ve kendi aralarında ise 50 mm uzaklık olacak şekilde konumlandırılmıştır. Deneyde 1 adet bakır plaka üzerine 2 sıra ve

7 dizi olacak şekilde toplam 14 adet ısı çifti kullanılmıştır. Vorteks jeneratörleri kanalın tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir.

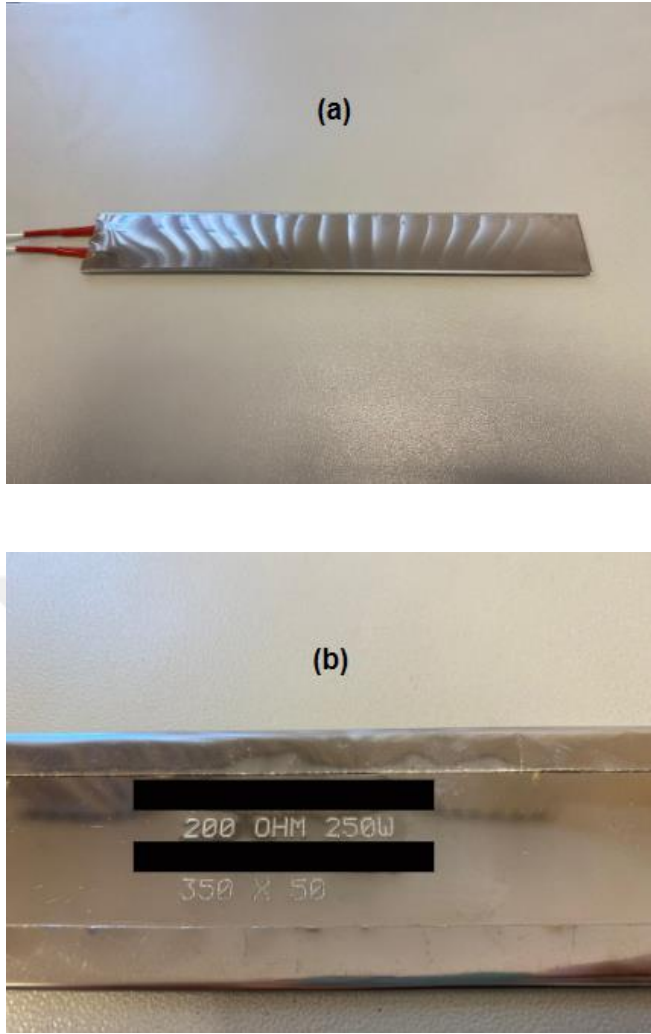
Bakır plaka altına $200\ \Omega$ ve $250\ W$ güç değerinde $350 \times 50\ mm$ ebadında elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Şekil 3.3’de kanalın üstten görünümü ve Şekil 3.4’te bakır plakanın üzerine ısı çiftlerinin dizilimi, görünümü ve ölçüleri verilmiştir. Buna ek olarak Şekil 3.5’te ise elektrikli ısıtıcının geniş açıdan görünümü ve özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.3. Kanalın üstten görünümü ve ölçüleri (mm)



Şekil 3.4. Bakır plakanın üzerine ısı çiftlerinin dizilimi ve ölçüleri (mm)

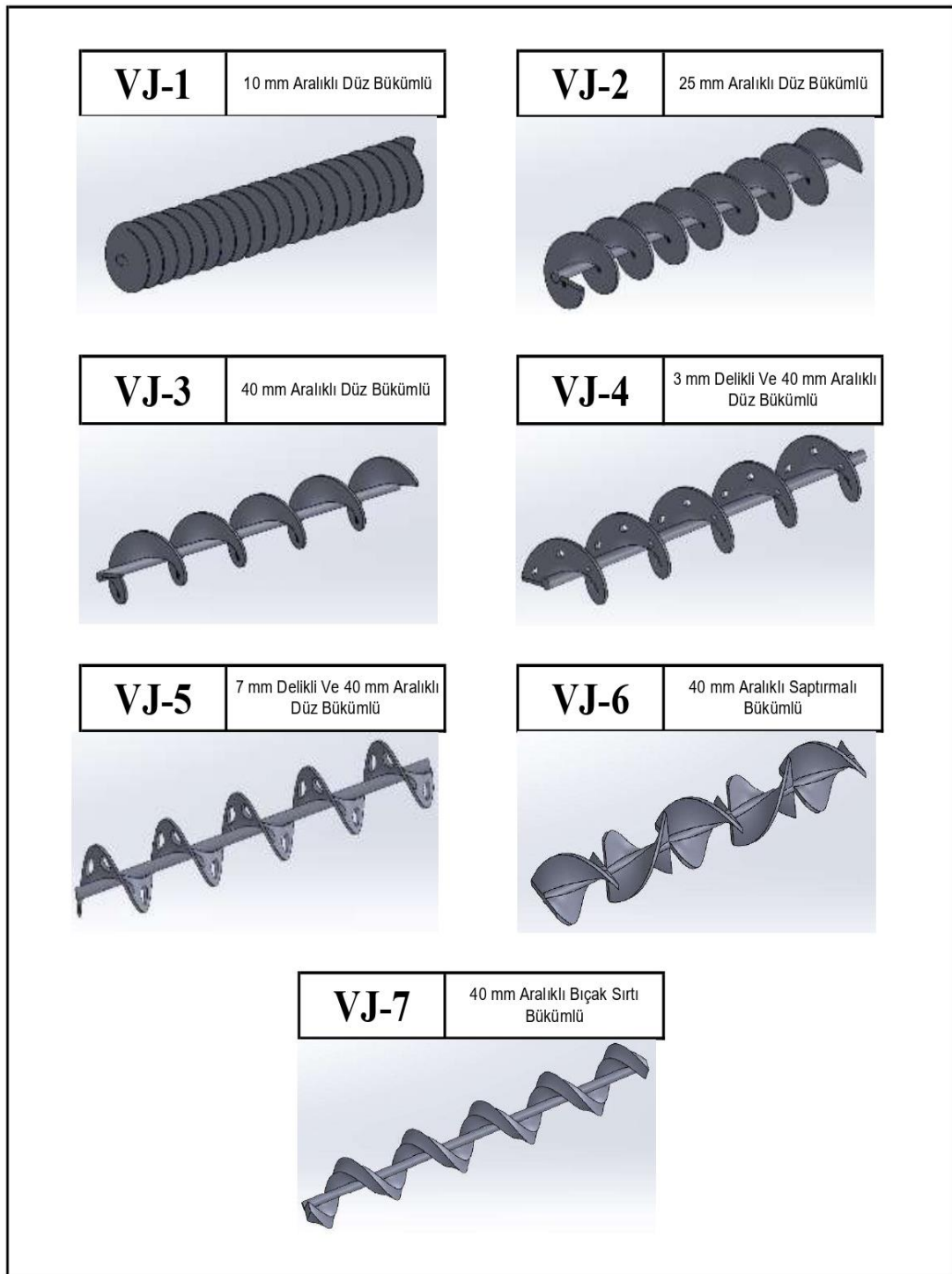


Şekil 3.5. Elektrikli ısıtıcının görünümü **a)** Geniş açıdan görünümü; **b)** Özellikleri

Test bölgesi oluşturulduktan daha sonra, altına 20 mm kalınlığında, yüksek sıcaklıklara dayanıklı cam yünü ($\approx 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $k=0.042\text{ W/mK}$), onun altına ise yaklaşık $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar dayanıklı 50 mm kalınlığında, XPS (köpük levha) yalıtım malzemesi ($k=0.038\text{ W/mK}$) yerleştirilmiştir.

Tüm deneylerde, bakır plakanın altına konumlandırılmış elektrikli ısıtıcıya belirli voltajlarda gerilim uygulanarak sabit ısı akısı elde edilmiştir. Hedeflenen voltaj aralığında çalışmak ve bakır plakaya sabit gerilim uygulamak için bir AC güç ünitesi kullanılmıştır.

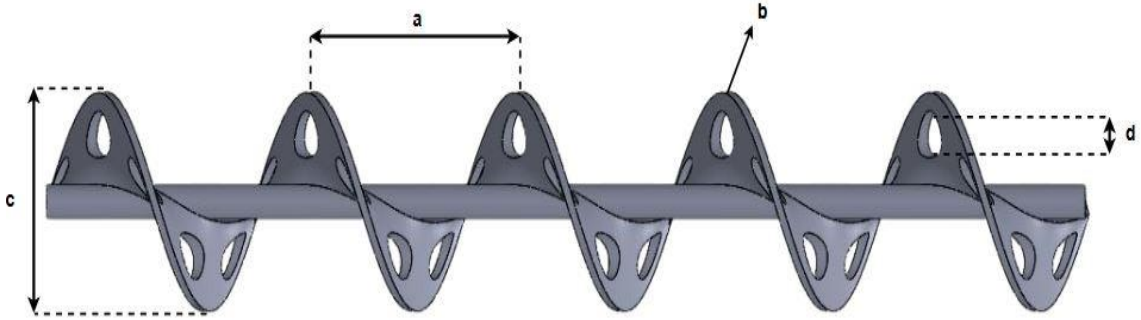
Deneyisel çalışmada kullanılan vorteks jeneratörleri PLA malzemeden 3B yazıcı da üretilmiştir. Deneyler, 4 farklı ısı akılarında 715 W/m^2 , 1029 W/m^2 , 1400 W/m^2 , 1829 W/m^2 ve 4 farklı Reynolds sayısında 2225, 3201, 6247, 9448 yapılmıştır. VJ1, VJ2, VJ3, VJ4, VJ5, VJ6 ve VJ7 bükümlü vorteks jeneratörlerine ait detaylı görünüm Şekil 3.6'da fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de ve geometrik boyutları ise Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan vorteks jeneratörlerinin görüntüsü

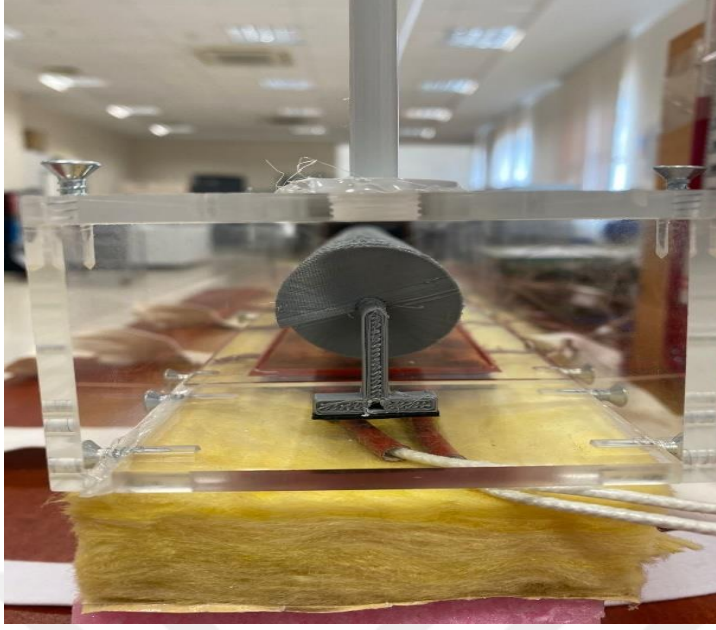
Çizelge 3.1. Bükümlü vorteks jeneratörlerinin fiziksel özellik tablosu

Parametreler	Büküm Aralığı, mm (a)	Büküm Yönü (b)	Büküm Çapı, mm (c)	Delik Çapı, mm (d)
Vorteks Jeneratör ismi				
VJ-1	10	Düz	30	-
VJ-2	25	Düz	30	-
VJ-3	40	Düz	30	-
VJ-4	40	Düz	30	3
VJ-5	40	Düz	30	7
VJ-6	40	Saptırmalı	30	-
VJ-7	40	Bıçak Sırtı	30	-



Şekil 3.7. Bükümlü vorteks jeneratöründe boyutların gösterimi

Deney düzeneğinde ısınan yüzeyden daha fazla ısının dışarı atılması için kanal içerisindeki havayı daha çok karıştırmak ve ısı transferini arttırmak amacıyla bükümlü vorteks jeneratörler kullanılmıştır. Bükümlü vorteks jeneratörleri, ısı transferini artırma ve akışı karıştırma metotları içerisinde kanatçıklı ısı alıcı tiplerine göre daha avantajlı durumdadır. Bükümlü vorteks jeneratörleri yüksek esneklikleri, hafiflikleri ve buna benzer pek çok avantajlı yapısal özelliklerinden dolayı son zamanlardaki uygulamalarda tercih edilen malzemeler haline gelmişlerdir. Şekil 3.8’de bükümlü vorteks jeneratörünün test bölgesindeki yerleşimi gösterilmiştir.



(a)

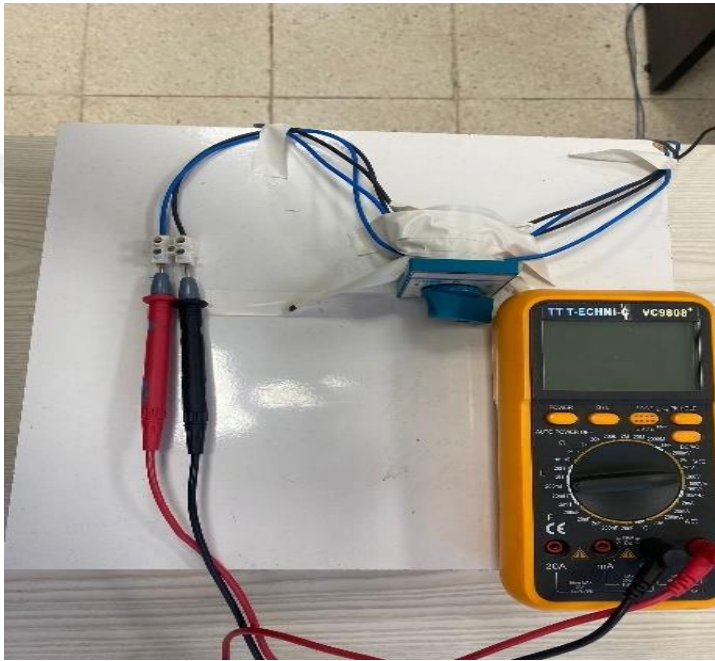


(b)

Şekil 3.8. Bükümlü vorteks jeneratörünün test bölgesi içindeki **a)** yerleşimi; **b)** yandan görünüşü

3.1.2 Güç Ünitesi

Deneylerde bakır plakanın altına sabitlenen elektrikli ısıtıcıya gerekli olan akım, AC güç kaynağı ile seri bağlantı devresi üzerinden sağlanmıştır. Şekil 3.9’da görülen bağlantı devresinde ölçüm klemensleri ve ısıtıcıya giden bağlantıya eşit voltaj uygulanmaktadır. AC güç kaynağı tarafından ayarlanan ve elektrikli ısıtıcıya uygulanan voltajın değerinin ölçümünde 9808 tipi TT Technic multimetre kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Isıtıcının bağlandığı ve kontrollerin yapıldığı bağlantı devresi

3.2 Deneysel Verilerin Toplanması Ve Ölçüm Sistemleri

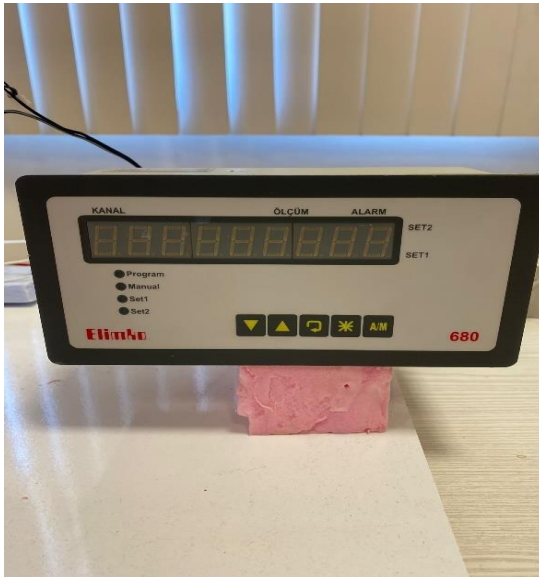
Gerçekleştirilen deneylerde, istenilen sonuçların hesaplanabilmesi ve gerekli analizler ile düzeltmelerin yapılabilmesi için, ısıtıcılara uygulanan gerilimin yanı sıra, ısınan yüzeyler ile yalıtım bölgelerinde oluşan sıcaklık değerlerinin ve belirli noktalardan ölçülen hava hızlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu değerlerin ölçümünde pek çok farklı elektronik alet kullanılmıştır.

Hava hız ölçümü kanal girişinden 50 mm ileride kanalın hem duvarları arasında hem de taban ile tavanı arasında merkezli olacak şekilde bir noktadan yapılmıştır. Belirlenen noktadaki hava hızının ölçülebilmesi için $\pm 1\%$ hassasiyetli, 0 – 20 m/s hızları arasında ölçüm aralığı bulunan TESTO 425 marka bir hız ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.10’da hız ölçüm cihazının görünümü verilmiştir.



Şekil 3.10. Hız ölçüm cihazının detaylı görünümü

Bakır yüzey ve ortalamaları alınan tüm sıcaklık ölçümlerinin kayıt altına alınabilmesi için 32 kanallı ve çok fonksiyonlu ELİMKO 680 marka data logger veri kayıt sistemi kullanılmıştır ve görüntüsü şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Veri toplama (Data logger) cihazının detaylı görünümü

3.3. Metot

3.3.1. Deneysel parametrelerin belirlenmesi

Isı akısı ve hava hızı aralıklarının belirlenmesi

Tez çalışmasında, deneylerin gerçekleştirileceği parametrelerin belirlenmesinde öncelikle elektronik sistemler ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak maksimum ve minimum çalışma aralıkları göz önünde bulundurulmuştur. Daha sonra deney düzeneğinde çalışma akışkanı olarak hava kullanılmış ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Test bölgesinde kullanılan malzeme ve cihazların çalışma sınırları belirlenmiş olup, bu doğrultuda ölçümler 715 W/m^2 ile 1830 W/m^2 arasında 4 farklı değerde sabit ısı akısı ve 2225 ile 9448 arasında değişen 4 farklı değerde Reynolds sayısı için yapılmıştır.

Deneylerde ölçülen sıcaklık, hız ve voltaj değerleri dikkate alınarak yapılan ısı transferi hesaplamaları ayrıntıları birlikte bu bölümde verilmiştir.

3.3.2. Geometrik parametreler

Tez çalışmasında kullanılan vorteks jeneratörlerinin termal performansları ile basınç kayıplarını belirleyebilmek için öncelikle bazı geometrik parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Test bölgesinin alt kısmında bulunan bakır plakanın yüzey alanı aşağıda şekilde hesaplanmıştır.

$$A_y = lxw \quad (3.1)$$

Burada, l ve w sırasıyla bakır plakanın uzunluğu ve genişliğidir. Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan hidrolik çap aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$D_h = \frac{4A_k}{P} \quad (3.2)$$

Burada A_k ve P sırasıyla kanalın kesit alanı ve çevre uzunluğudur. Kanal kesit alanı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$A_k = axb \quad (3.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte, a ve b sırasıyla kanalın genişliği ve yüksekliğidir. Hidrolik çapın hesaplanmasında kullanılan perimetre (P), kanal kesit çevresidir ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P = 2(a + b) \quad (3.4)$$

Çalışmanın analiz kısmında kullanılacak olan geometrik boyutların detaylı bilgisi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Test bölgesinin geometrik parametreleri

Geometrik Parametre	Birim	Simge	Boyut
Bakır levha uzunluk	m	l	0.351
Bakır levha genişlik	m	w	0.051
Kanal genişlik	m	a	0.074
Kanal yükseklik	m	b	0.047
Bakır Yüzey Alanı	m^2	A_y	1.79×10^{-2}
Hidrolik Çap	m	D_h	0.057
Kesit Alanı	m^2	A_k	3.47×10^{-3}
Perimetre	m	P	0.24

3.3.3. Isı transfer analizi

Akışkana olan konveksiyon ile olan ısı transferi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{konv.} = \dot{Q}_{elektrik} - \dot{Q}_{kond.} \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5) ile verilen ifadede $\dot{Q}_{konv.}$, $\dot{Q}_{elektrik}$ ve $\dot{Q}_{kond.}$ sırasıyla akışkana konveksiyonla aktarılan ısı transferi miktarı, elektrikli ısıtıcı tarafından verilen toplam ısı miktarı ve test bölgesinin alt kısmından kondüksiyonla olan ısı kaybıdır. Ayrıca, test bölgesinden olan radyasyon kayıpları ihmal edilmiştir. Kanalın alt kısmına yerleştirilen elektrikli ısıtıcıdan alınan toplam ısı miktarı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{elektrik} = \frac{V^2}{R} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'da Elektrikli ısıtıcıdan yüzeye aktarılan toplam ısı miktarının hesaplanmasında kullanılan V ve R ifadeleri sırasıyla uygulanan voltaj miktarı ve ısıtıcı direncidir.

Kanalın alt yüzeyinden olan ısı kaybı ise;

$$\dot{Q}_{kond.} = -kA_Y \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.7)$$

formül ile hesaplanmıştır. Burada, k , ΔT ve Δx ifadeleri ise sırasıyla yalıtım köpüğünün termal iletkenlik katsayısı, iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ve kalınlığıdır.

Akışkana konveksiyonla aktarılan ısı akısı aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır.

$$q_{konv.} = \frac{\dot{Q}_{konv.}}{A_Y} \quad (3.8)$$

Hidrolik çapa bağlı olarak Reynolds sayısı aşağıda verilmiştir.

$$Re = \frac{Ux D_h}{\nu} \quad (3.9)$$

Yukarıda Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan ν akışkanın kinematik viskozitesi, U ise akış hızıdır.

Yüzey sıcaklıklarının kıyaslanmasında ve Nusselt sayısının hesaplanmasında kullanılan ortalama yüzey sıcaklık değerinin hesaplanması aşağıda verilmiştir.

$$T_{ort,y}^* = T_{ort,y} - T_{\infty} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki eşitlikte $T_{ort,y}^*$, T_∞ sırasıyla kanal yüzey sıcaklığı ortalaması ve akışkan giriş sıcaklığıdır. Ortalama yüzey sıcaklığı hesaplanırken, kanal yüzeyindeki çift sıralı T tipi ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık değerlerin ortalaması ($T_{ort,y} = (T_1 + \dots + T_{14}) / 14$) alınmıştır.

Test bölgesi boyunca yüzey sıcaklıklarını ölçmek için toplamda 14 adet ısıl çift kullanılmış olup, ikerli gruplar halinde 7 sıra olacak şekilde simetrik olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Buna göre her i sırası için sıra ortalama yüzey sıcaklık değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$T_{i,ort} = (T_{i,1} + T_{i,2}) / 2 \quad (3.11)$$

Burada, i ısıl çiftlerin sıra numarası olup, $i=1 \dots 7$ olarak değişmektedir.

Konveksiyonla ısı transferi katsayısının (h) ve Nusselt sayısının hesabı aşağıdaki 3.11 ve 3.12 eşitliklerinde sırasıyla verilmiştir.

$$h = \frac{q_{konv.}}{\Delta T_{ort,y}} \quad (3.12)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad (3.13)$$

3.3.4. Belirsizlik analizi

Deneyel çalışmalarda dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardan biri belirsizlik analizidir. Bu analiz, deneylerde hata miktarının belirlenmesi ve sonuçların doğru yorumlanabilmesi amacıyla yapılır. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları, çalışma aralığı, nem, sıcaklık gibi faktörlerin etkisiyle ölçüm sonuçlarında değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişiklikler, hata aralığında kaldığı sürece hesaplamalara dâhil edilmez ve ihmal edilebilir. Ancak, birden fazla parametrenin birlikte incelendiği ve hesaplamalarda kullanıldığı çalışmalarda, hata oranları birbirleriyle orantılı olarak artabileceğinden, belirli hesaplama yöntemleriyle kontrol edilmesi ve ihmal edilebilir düzeyde olup olmadığının değerlendirilmesi gerekir.

Deneylerde hatalar genellikle insan kaynaklı, ölçüm aleti kaynaklı ve dış etkenlere bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. İnsan kaynaklı hatalar, ölçüm sonuçlarını etkileyen yanlış okuma, hatalı kullanım, tecrübesizlik ve dikkatsizlik gibi çeşitli etmenleri içerir. Ölçüm aletinden kaynaklanan hatalar ise genellikle üretici firma tarafından belirlenmiş

olup, cihazın çalışma koşulları ve ölçüm aralığına göre değişiklik gösteren hata oranlarını kapsar. Dış kaynaklı hatalar, deney düzeneğinde meydana gelebilecek hasarlar, parça değişimleri gibi durumlar nedeniyle ortaya çıkar ve genellikle ihmal edilebilir sınırın ötesindedir.

Bu bağlamda, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların ne derece hassas olduğunu belirlemek amacıyla hata analizi yapılır. Bu analiz sonucunda, gerçek değerden ne kadar sapma olduğu hesaplanır. Bu tez çalışmasında kullanılan ölçüm aletlerinin hata miktarı değerleri Çizelge 3.3 'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm parametrelerin hata miktarı değerleri

Ölçüm Parametreleri	Hata Miktarı
Sıcaklık Ölçümleri	
Termometre	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Isıl Çift	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Veri Kayıt Sistemi	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Voltaj Ölçümü	
AC Voltaj	$\pm (0.8 + 5) \text{ V}$
Direnç	$\pm (0.8 + 3) \text{ V}$
Basınç Ölçümü	
Basınç Farkı	$\pm 2 \text{ Pa}$
Hız Ölçümü	
Akışkan Hızı	$\pm 0.03 \text{ m/s}$
Uzunluk Ölçümü	
Kanal Uzunluğu	$\pm 0.0005 \text{ m}$

Deneysel sonuçların güvenilirliğini değerlendirebilmek amacıyla, deney sırasında ölçülen değerler ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan diğer büyüklükler üzerinden bir hata analizi yapılmıştır. Bu çalışmada en önemli bağımlı değişken olan Nusselt sayısı için hata analizi, literatürdeki hesaplama yöntemleri kullanılarak detaylandırılmıştır.

Eğer “f” bağımlı bir değişken, x ve y ise bağımsız iki değişken ise,

$$F = f(x, y)$$

yazılır ve x, y'nin mutlak belirsizliği w_x , w_y olarak verildiğinde, f'nin belirsizliği w_f ,

$$w_f = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} w_x \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} w_y \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

olarak yazılabilir. (Holman,1994)

Denklem (3.15) dikkate alınarak Nusselt sayısının belirsizlik olanı,

$$W_{Nu_{D_{h,j}}} = \left[\left(\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial \ddot{q}_{taşınım,j}} W_{\ddot{q}_{taşınım,j}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial D_{h,j}} W_{D_{h,j}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial (T_s - T_\infty)} W_{(T_s - T_\infty)} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial k_{hava}} W_{k_{hava}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

Yazılır.

Denklem (3.16)'da

$W_{\ddot{q}_{taşınım}}$ = konveksiyon ısı akısının,

$W_{D_{h,j}}$ = kanalın hidrolik çapının,

$W_{(T_s - T_\infty)}$ = sıcaklık farkının,

$W_{k_{hava}}$ = iletim katsayısının belirsizliğini göstermektedir.

Denklem (3.16)'daki diğer terimler ayrıntılı olarak yazılırsa,

$$\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial \ddot{q}_{taşınım}} = \frac{D_{h,j}}{(T_s - T_\infty) \cdot k_{hava}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial D_{h,j}} = \frac{\ddot{q}_{taşınım}}{(T_s - T_\infty) \cdot k_{hava}} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial (T_s - T_\infty)} = \frac{\ddot{q}_{taşınım} \cdot D_{h,j}}{(T_s - T_\infty)^2 \cdot k_{hava}} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial Nu_{D_{h,j}}}{\partial k_{hava}} = \frac{\partial \dot{q}_{taşınım} \cdot D_{h,j}}{(T_s - T_\infty) \cdot k_{hava}^2} \quad (3.20)$$

denklemleri elde edilir.

Denklem (3.17) - (3.20) ifadeleri denklem (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$W_{Nu_{D_{h,j}}} = \left[\left(\frac{D_{h,j}}{(T_s - T_\infty) \cdot k_{hava}} W_{\dot{q}_{taşınım}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{q}_{taşınım}}{(T_s - T_\infty) \cdot k_{hava}} W_{D_{h,j}} \right)^2 + \left(-\frac{\dot{q}_{taşınım} \cdot D_{h,j}}{(T_s - T_\infty)^2 \cdot k_{hava}} W_{(T_s - T_\infty)} \right)^2 + \left(-\frac{\dot{q}_{taşınım} \cdot D_{h,j}}{(T_s - T_\infty) \cdot k_{hava}^2} W_{k_{hava}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

ifadesinden bulunur.

Diğer büyüklükler için yukarıda anlatılan yöntemle hesaplamalar yapılmış, belirsizlik ve hata oranları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Değişkenlerin belirsizlik ve hata oranları

Sembol	Aralık	Hata oranı (%)
Nu	10-120	%1.11
Re	2225-9447	%3.16

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bir kanal içerisinde yerleştirilmiş farklı tiplerdeki vorteks jeneratörlerinin ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Deneyler 4 farklı ısı akısında (715 W/m^2 , 1029 W/m^2 , 1400 W/m^2 , 1829 W/m^2) ve yine 4 farklı Reynolds sayısında (2225, 3201, 6247, 9448) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Test bölgesinde ölçümler sürekli rejim şartında alınmış olup, sıcaklık ve basınç ölçümleri için minimum 2 saat beklenmiştir ve ölçümler tekrarlı bir şekilde kayıt altına alınmıştır.

4.1 Deneysel Ölçümler ve Verilerin Analizi

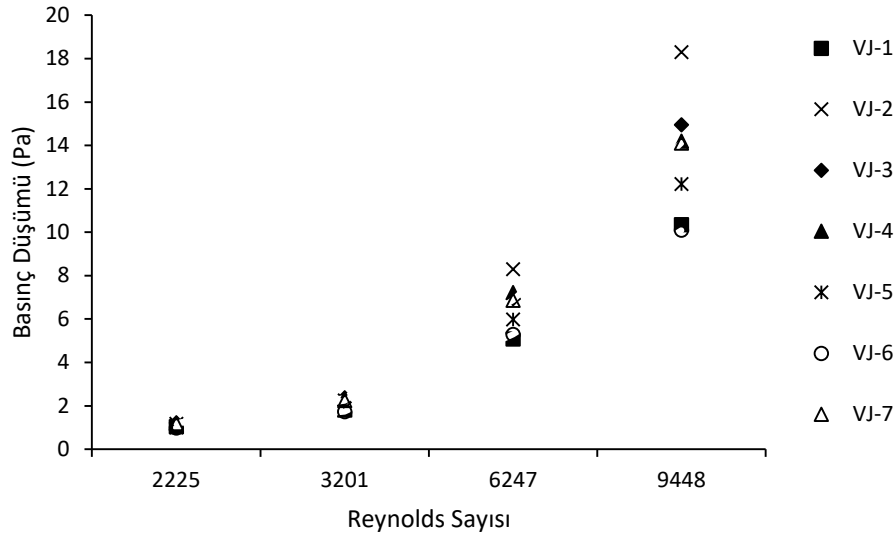
Deneylerde düz bükümlü, delikli düz bükümlü, saptırmalı bükümlü ve bıçak sırtı düz bükümlü tiplerde olmak üzere toplam 7 adet vorteks jeneratörü kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar kanal içerisinde vorteks jeneratörünün bulunmadığı durumda elde edilen yüzey sıcaklık değerleri ile kıyaslanmıştır.

Çalışmada, belirlenen hızlara karşılık gelen Reynolds sayısı hesaplanarak aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Akışkan hızına göre hesaplanan Reynolds sayısı değerleri

Hava				
Akışkan Hızı (m/s)	0.57	0.82	1.60	2.42
Reynolds Sayısı	2225	3201	6247	9448

Kullanılan vorteks jeneratörlerinin Reynolds sayısına göre meydana getirdikleri basınç kayıpları Şekil 4.1’de, sayısal değerleri ise Çizelge 4.2.’de detaylı olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere, tüm vorteks jeneratörlerinde Reynolds sayısının artmasıyla basınç kayıplarında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Düşük Reynolds sayılarında basınç kayıpları arasında neredeyse bir fark olmazken, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte basınç kayıpları arasındaki fark daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle en yüksek basınç kaybı VJ-2 vorteks jeneratöründe görülürken, en düşük basınç kaybı ise VJ-6 vorteks jeneratöründe görülmüştür.

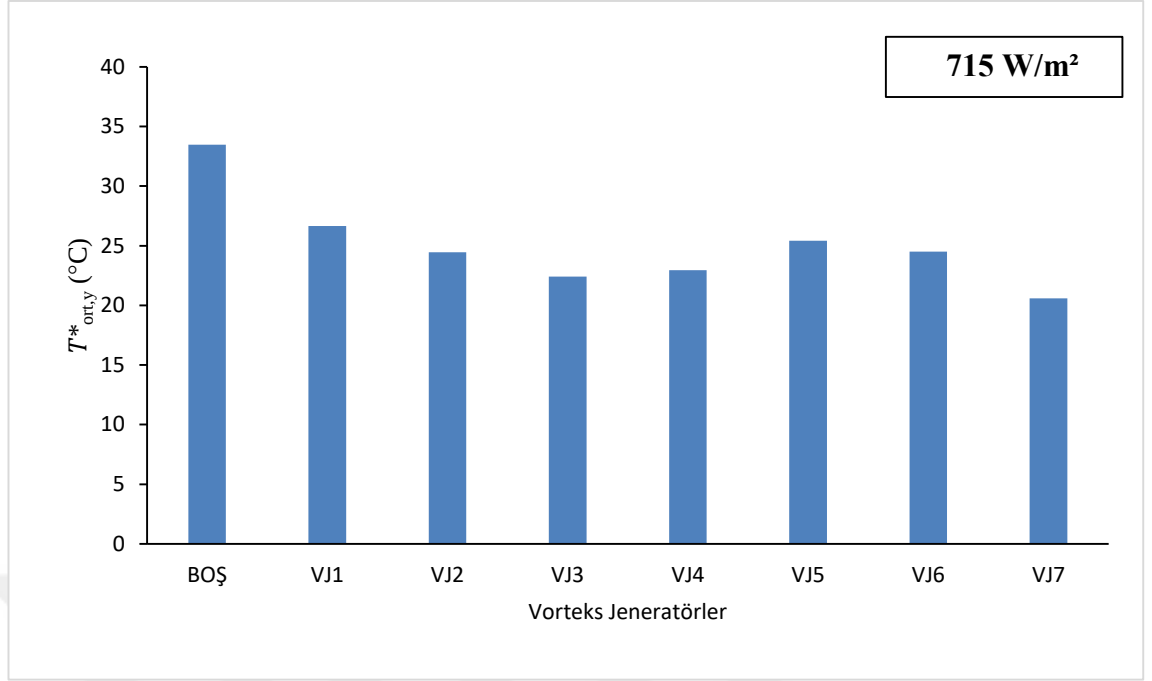


Şekil 4.1. Farklı tipteki vorteks jeneratörlerinin Reynolds sayısına göre basınç kaybı değişimi

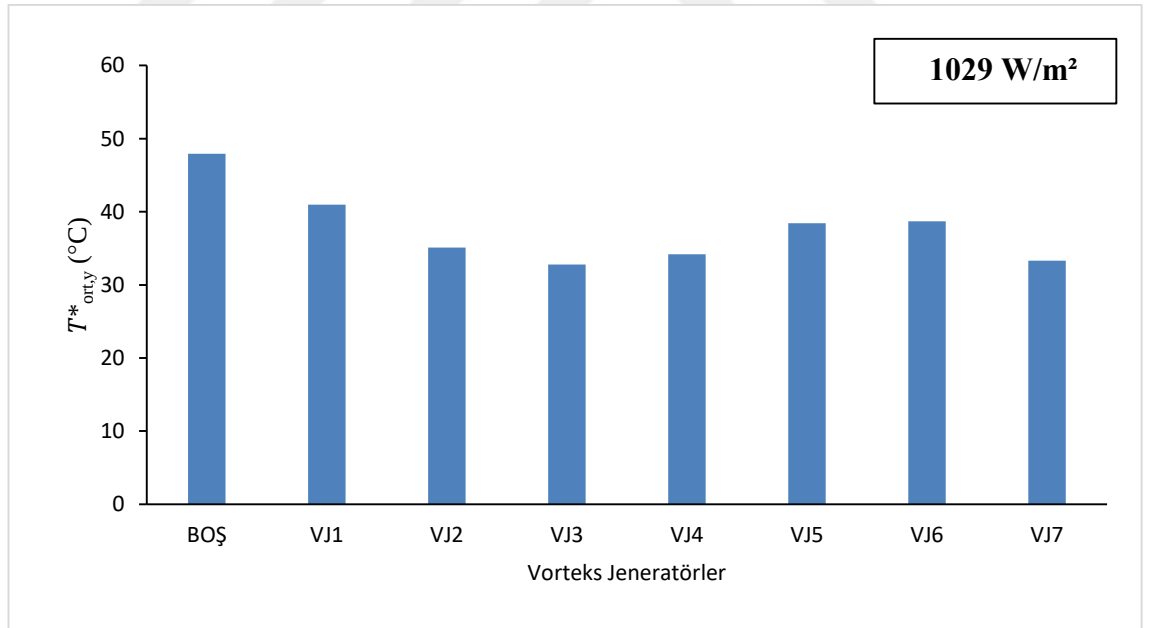
Çizelge 4.2. Vorteks jeneratörlerine göre basınç kaybındaki değişim

Reynolds Sayısı	Basınç Kaybı Miktarı (Pa)						
	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	1.04	1.17	1.21	1.20	1.01	0.98	1.19
3201	1.80	2.24	2.36	2.35	1.87	1.73	2.24
6247	5.08	8.29	6.94	7.21	5.98	5.29	6.87
9448	10.34	18.30	14.95	14.19	12.22	10.09	14.11

Şekil 4.2’de farklı vorteks jeneratörünün ortalama yüzey sıcaklıklarının değişimi 4 farklı ısı akısında (715 W/m^2 , 1029 W/m^2 , 1400 W/m^2 , 1829 W/m^2) ve Reynolds sayılarının ortalaması alınıp boş yüzeye kıyaslanarak sunulmuştur. En yüksek sıcaklık farkı boş durumda gözlemlenmiş olup, en düşük yüzey sıcaklık farkı ise VJ-7 vorteks jeneratöründe görülmüştür. Genel olarak bakıldığında vorteks jeneratörü kullanımıyla, birlikte boş yüzeye kıyasla akışın yönlendirilmesinin akışın içerisinde vorteksler oluşturarak, daha iyi karışmasına ve bu sayede yüzey sıcaklıklarının düştüğü. Bu durum akışın yönlendirilmediği (boş yüzey) sistemde yüzeydeki ısının yeterince akışkana aktarılamadığını, dolayısıyla ısı transfer performansının en düşük seviyede kaldığını göstermektedir.

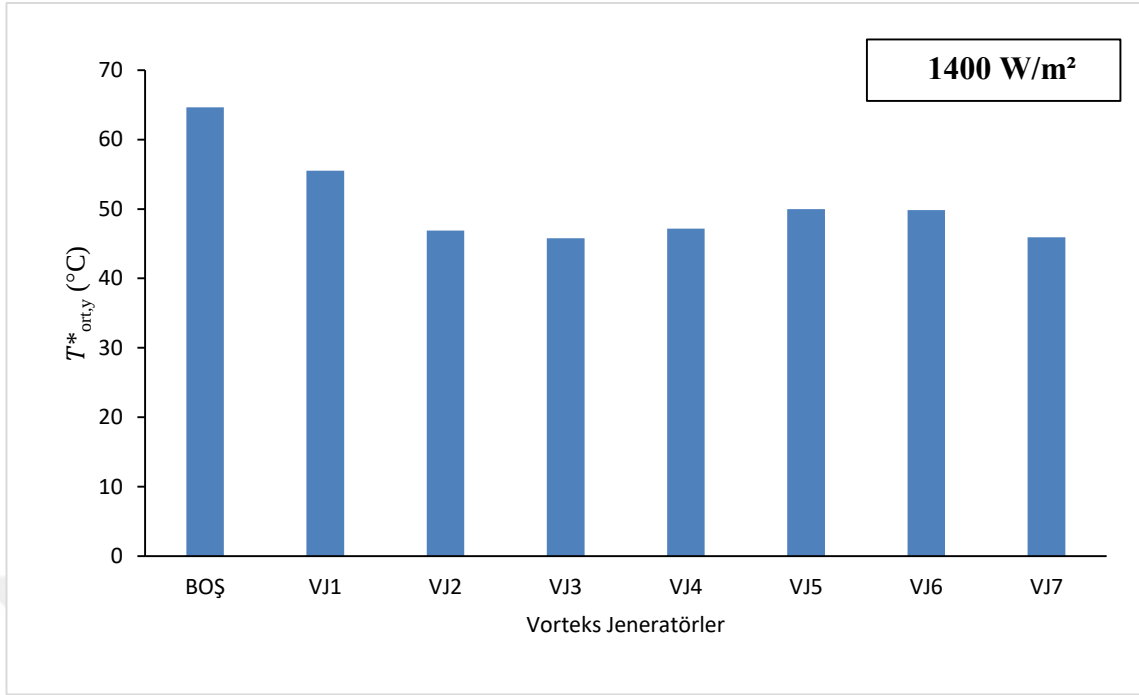


(a)

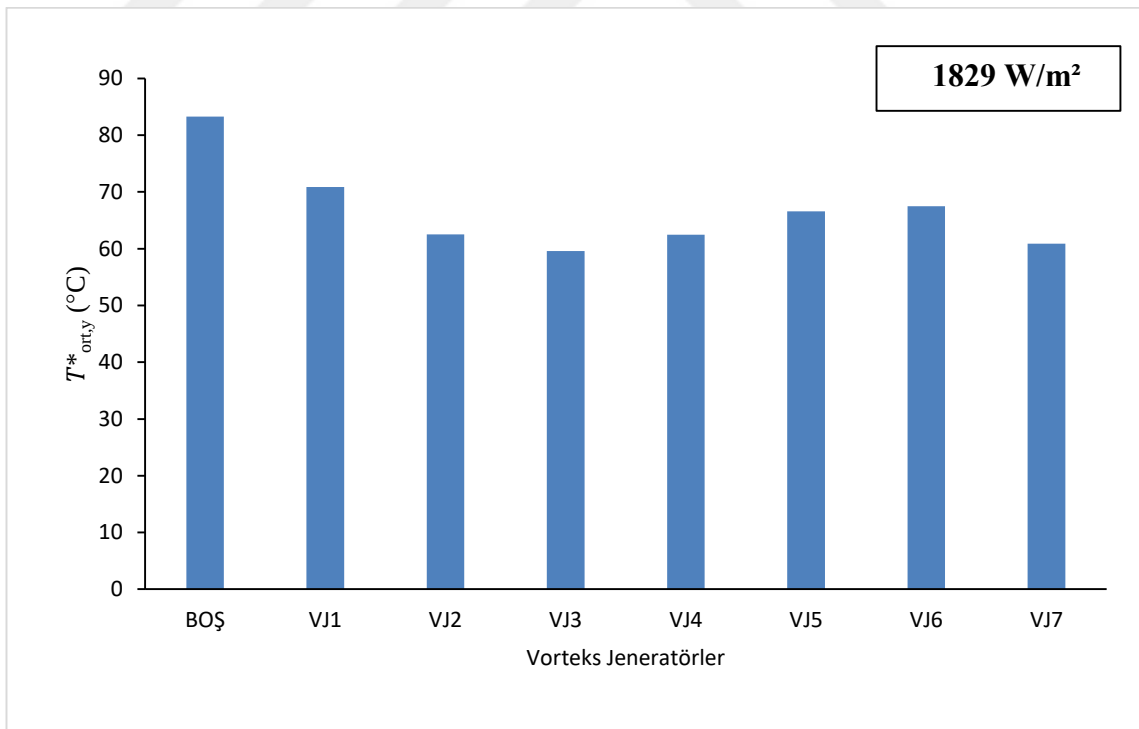


(b)

Şekil 4.2. Ortalama yüzey sıcaklıklarının vorteks jeneratörlerine göre değişimi (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²



(c)



(d)

Şekil 4.2.'nin devamı

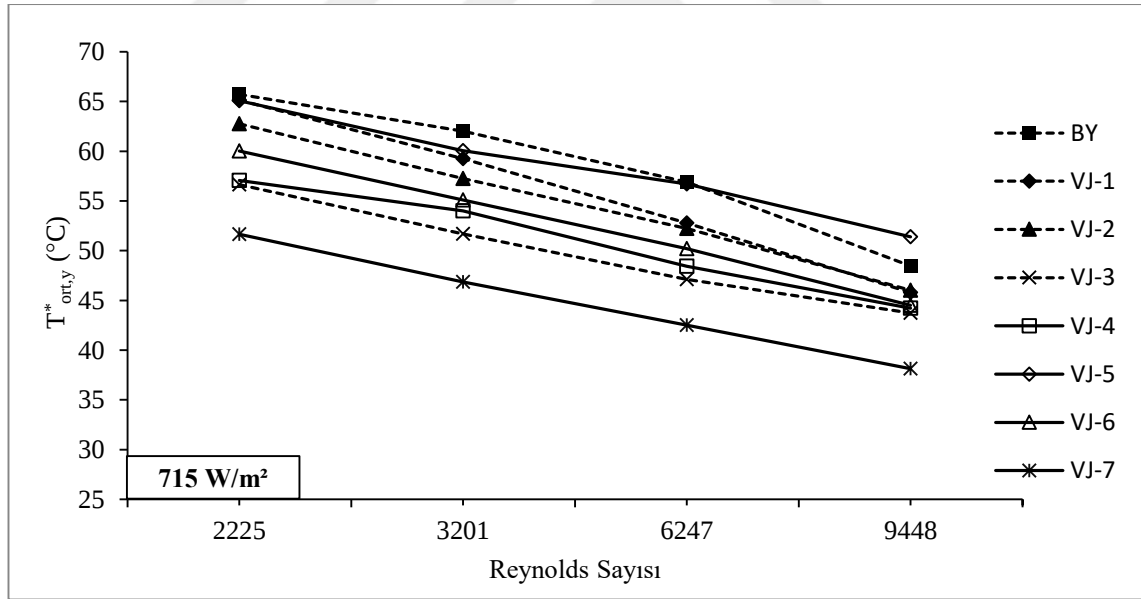
Şekil 4.3' te farklı ısı akıları altında, farklı tiplerdeki vorteks jeneratörleri için test bölgesindeki ortalama yüzey sıcaklıklarının Reynolds Sayısı ile değişimi görülmektedir. Çizelge 4.3' te ise bu değerlerin boş yüzey ile karşılaştırılıp farklarının yüzdesel olarak ifadesi verilmiştir.

Yapılan çalışmada 715, 1029, 1400 ve 1829 W/m² sabit ısı akısı değerlerinde elde edilen verilere göre, Reynolds sayısındaki artışla birlikte tüm vorteks jeneratörü tiplerinde ortalama sıcaklık değerlerinde ($T_{ort,y}^*$) azalma eğilimi görülmektedir.

Tüm grafikler birlikte değerlendirildiğinde boş yüzey ve diğer vorteks jeneratörleri ile kıyaslandığında VJ-7'nin tüm Reynolds sayıları ve tüm ısı akılarında daha iyi ısı performans gösterdiği belirlenmiştir.

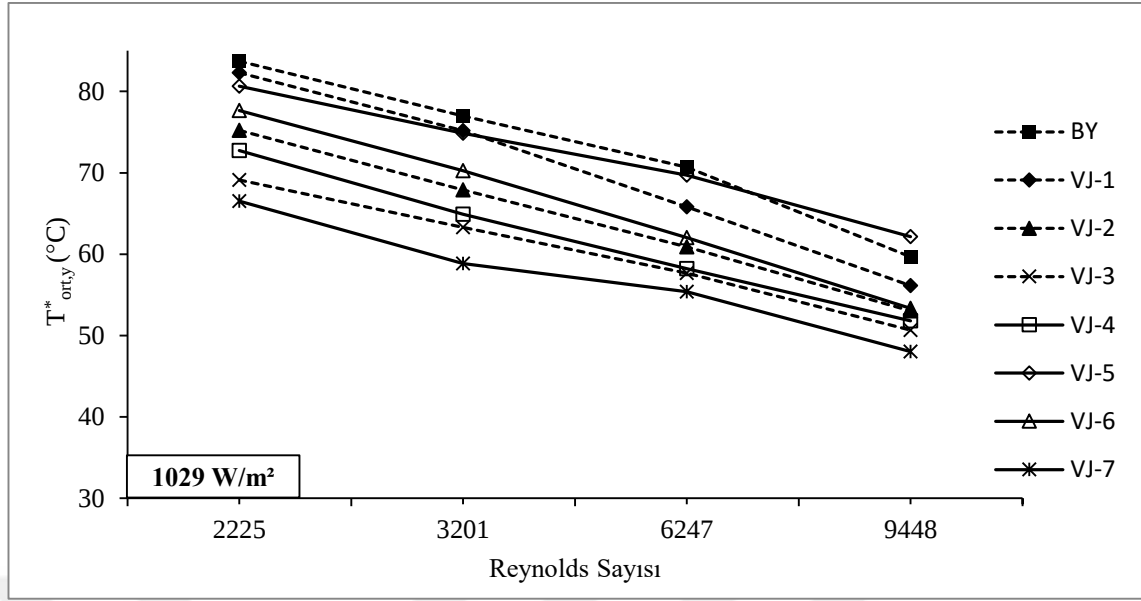
Vorteks jeneratörleri kendi aralarında değerlendirildiğinde en yüksek yüzey ortalama sıcaklık değerleri VJ-1 ve VJ-5'te görülmüştür.

Yapılan deneyler sonucunda, düz kanal referans alınarak gerçekleştirilen karşılaştırmalarda, VJ1, VJ2, VJ3, VJ4, VJ5, VJ6 ve VJ7 vorteks jeneratörlerinin %17 ila %32 oranlarında ısı transferini artırdığı tespit edilmiştir.

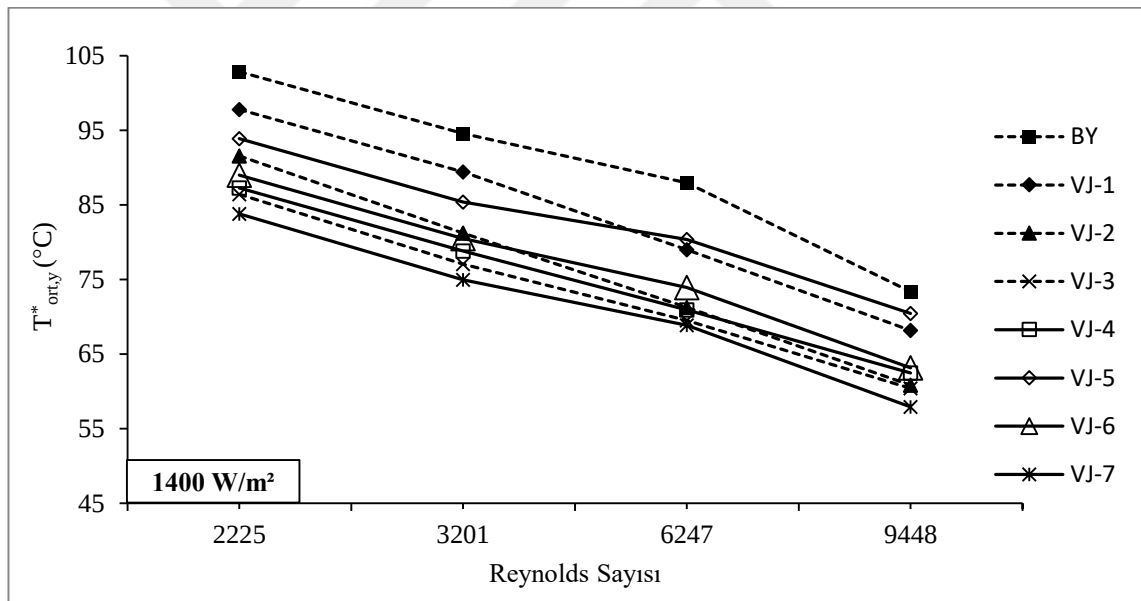


(a)

Şekil 4.3. Ortalama yüzey sıcaklıklarının çeşitli Reynolds Sayılarına göre farklı tipdeki vorteks jeneratörleri için değişimi (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²

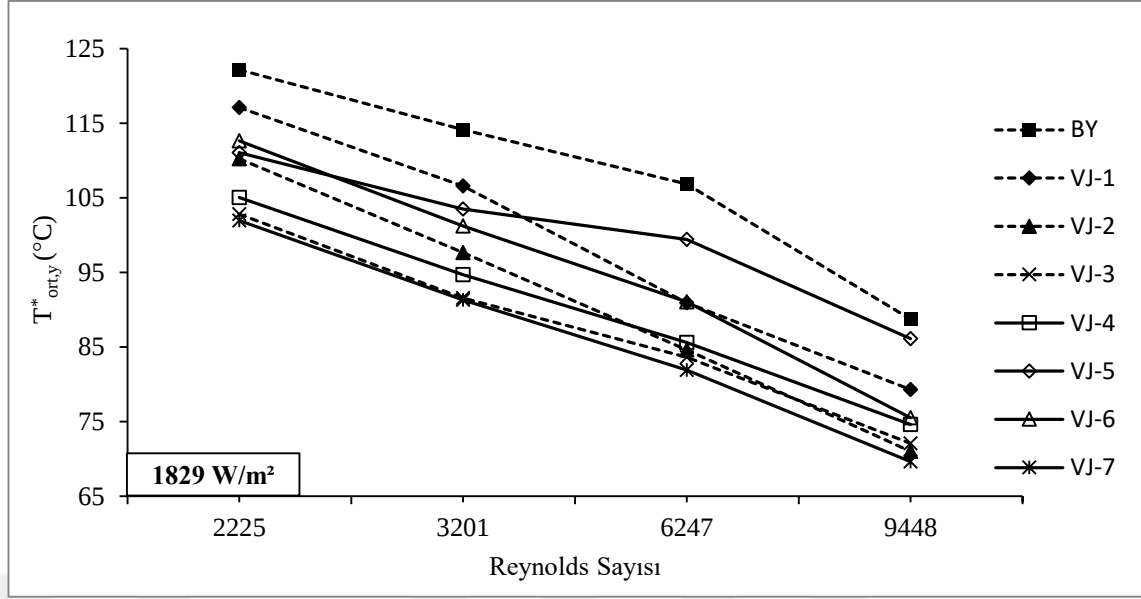


(b)



(c)

Şekil 4.3.'ün devamı



(d)

Şekil 4.3.'ün devamı

Çizelge 4.3. Boş yüzeydeki ortalama yüzey sıcaklıklarının çeşitli Reynolds Sayılarına göre farklı tipdeki vorteks jeneratörlerinin yüzey sıcaklığı ile kıyaslanması (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²

715 W/m ²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 13.14	% 26.50	% 22.41	% 29.01	% 21.12	% 21.98	% 34.35
3201	% 17.79	% 30.64	% 28.35	% 33.97	% 26.69	% 26.53	% 39.98
6247	% 24.85	% 36.90	% 31.57	% 35.42	% 26.31	% 30.70	% 43.51
9448	% 23.02	% 33.75	% 26.21	% 35.34	% 22.19	% 30.02	% 36.55

(a)

Çizelge 4.3.'ün devamı

1029 W/m²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 10.46	% 23.59	% 22.39	% 29.25	% 19.98	% 13.95	% 40.11
3201	% 12.38	% 28.64	% 26.14	% 31.39	% 20.62	% 17.17	% 46.18
6247	% 19.77	% 31.77	% 30.54	% 34.35	% 20.43	% 22.60	% 45.68
9448	% 17.61	% 33.05	% 29.80	% 32.00	% 17.34	% 26.63	% 43.29

(b)

1400 W/m²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 9.47	% 31.22	% 27.46	% 32.88	% 28.31	% 27.09	% 47.74
3201	% 9.96	% 31.66	% 30.66	% 34.48	% 28.30	% 27.29	% 49.14
6247	% 15.44	% 33.57	% 35.89	% 36.00	% 25.60	% 27.19	% 47.62
9448	% 12.24	% 23.08	% 27.25	% 25.60	% 17.95	% 19.71	% 38.72

(c)

1829 W/m²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 10.52	% 34.72	% 27.58	% 39.97	% 34.22	% 22.28	% 52.12
3201	% 13.44	% 38.31	% 34.82	% 44.22	% 33.01	% 27.17	% 57.97
6247	% 24.50	% 40.88	% 44.26	% 44.79	% 27.32	% 31.89	% 61.84
9448	% 15.42	% 28.22	% 35.07	% 32.72	% 19.37	% 26.67	% 46.64

(d)

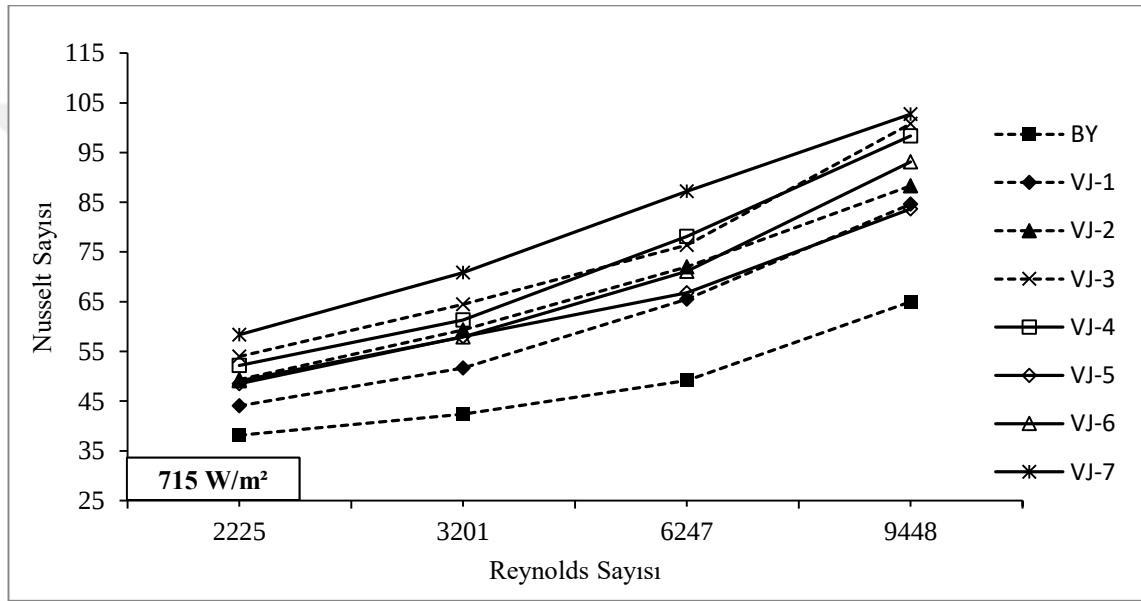
Şekil 4.4' da farklı ısı akılarına göre, farklı tiplerdeki vorteks jeneratörleri için test bölgesindeki Nusselt sayılarının Reynolds Sayısı ile değişimi verilmiştir. Çizelge 4.4' te ise bu değerlerin boş yüzey ile karşılaştırılıp farklarının yüzdesel olarak ifadesi verilmiştir.

Çalışmada 715 W/m² – 1829 W/m² aralığındaki sabit ısı akısı değerlerinde yapılan deneylerde, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte tüm vorteks jeneratörü tiplerinde

Nusselt sayısında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının artmasıyla türbülanslı akış koşullarında yüzeyden olan konvektif ısı transferide artmıştır.

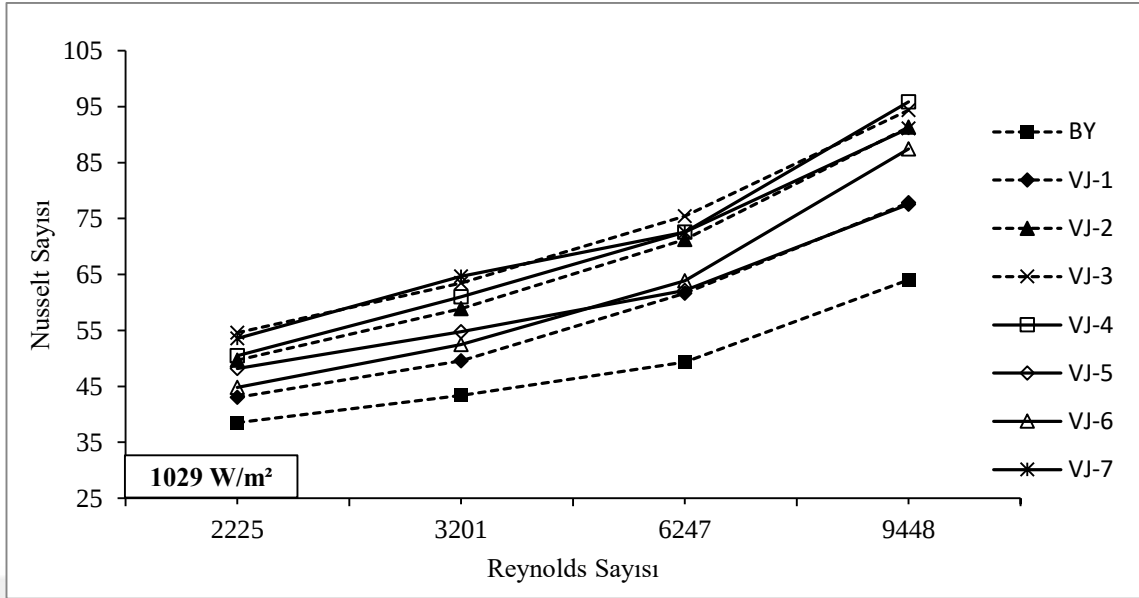
Tüm ısı akılarında şekil 4.4’ teki 4 grafik değerlendirildiğinde boş yüzeyin Nusselt değerleri en düşüktür. Vorteks jeneratörleri kendi aralarında kıyaslandığında ise VJ-1’ in ortalama olarak Nusselt değerleri en düşüktür. Buna karşılık VJ-7 vorteks jeneratöründe, ortalama olarak en yüksek Nusselt sayısı değerlerine ulaşılmıştır.

Bu sonuçlar geometrik yapının ısı verimlilik üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

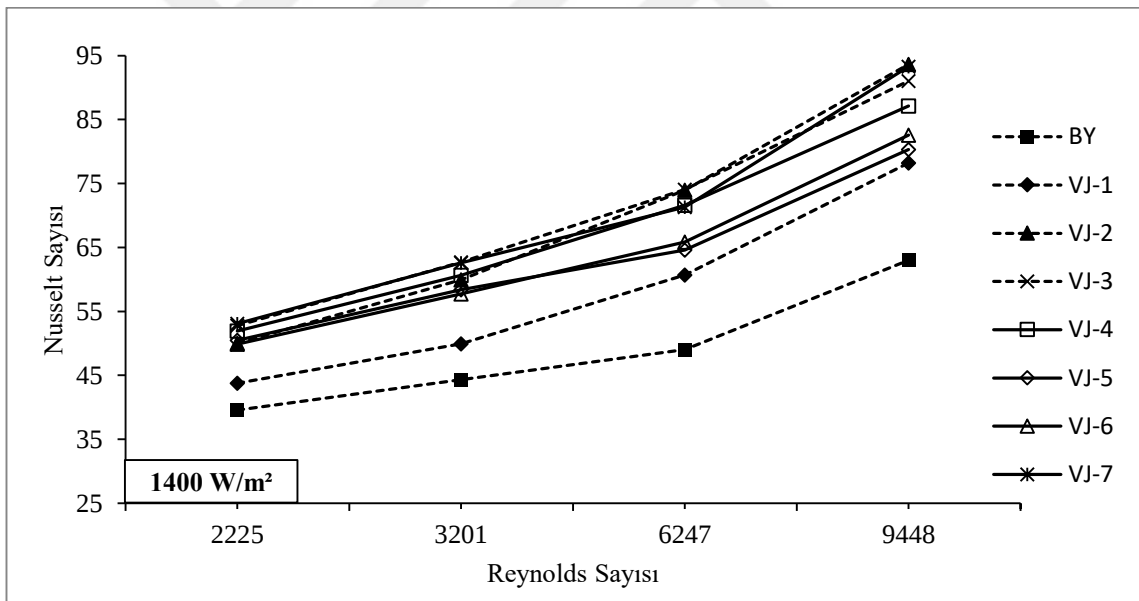


(a)

Şekil 4.4. Nusselt sayılarının çeşitli Reynolds Sayılarına göre farklı tipdeki vorteks jeneratörleri için değişimi (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²

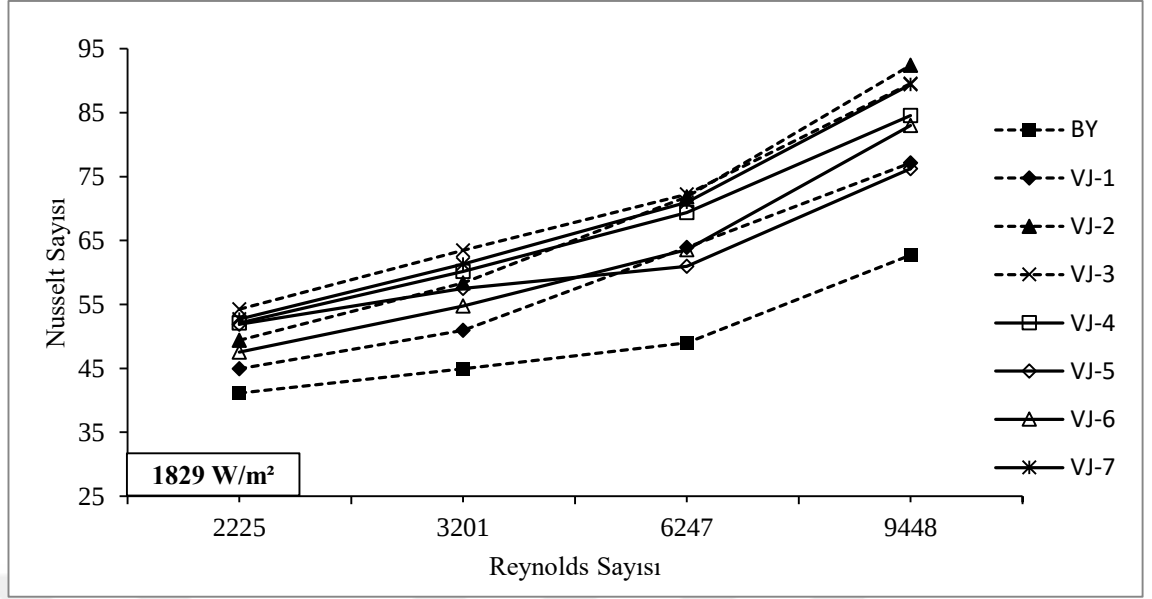


(b)



(c)

Şekil 4.4.'ün devamı



(d)

Şekil 4.4.'ün devamı

Çizelge 4.4. Nusselt sayılarının çeşitli Reynolds Sayılarına göre farklı tipdeki vorteks jeneratörlerinin yüzey sıcaklığı ile kıyaslanması (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²

715 W/m²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 15.37	% 36.61	% 29.22	% 41.41	% 27.13	% 28.57	% 52.81
3201	% 21.91	% 44.67	% 40.00	% 52.10	% 36.86	% 36.63	% 67.25
6247	% 33.37	% 59.07	% 46.55	% 55.48	% 36.03	% 44.73	% 77.54
9448	% 30.18	% 51.27	% 35.82	% 55.00	% 28.72	% 43.22	% 57.97

(a)

Çizelge 4.4.'ün devamı

1029 W/m ²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 11.77	% 31.22	% 29.14	% 41.86	% 25.24	% 16.38	% 39.18
3201	% 14.22	% 40.55	% 35.70	% 46.23	% 26.22	% 20.93	% 49.00
6247	% 24.84	% 47.06	% 44.34	% 52.81	% 25.90	% 29.45	% 46.99
9448	% 21.54	% 49.74	% 42.69	% 47.42	% 21.11	% 36.61	% 42.32

(b)

1400 W/m ²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 10.56	% 31.23	% 26.45	% 33.42	% 27.54	% 26.07	% 34.06
3201	% 12.64	% 36.87	% 35.26	% 41.49	% 31.75	% 30.28	% 41.22
6247	% 23.79	% 46.03	% 50.79	% 51.06	% 31.71	% 34.32	% 45.41
9448	% 24.18	% 38.34	% 48.63	% 44.47	% 27.52	% 31.04	% 48.08

(c)

1829 W/m ²	Vorteks Jeneratör Numarası						
Reynolds Sayısı	VJ-1	VJ-2	VJ-3	VJ-4	VJ-5	VJ-6	VJ-7
2225	% 9.21	% 26.65	% 20.06	% 31.94	% 26.19	% 15.60	% 28.17
3201	% 13.32	% 33.87	% 29.87	% 41.23	% 27.90	% 21.86	% 36.39
6247	% 30.44	% 41.60	% 46.64	% 47.45	% 24.47	% 29.73	% 44.92
9448	% 23.02	% 34.83	% 47.32	% 42.80	% 21.58	% 32.33	% 42.53

(d)

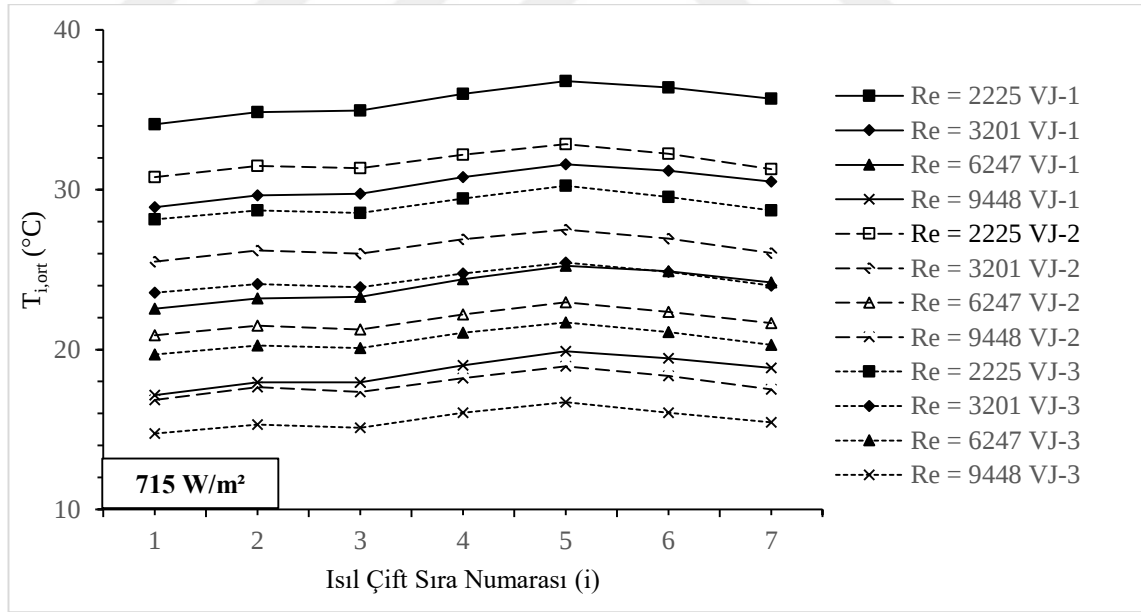
Yukarıda yapılan genel karşılaştırmalarda boş yüzeye kıyasla en düşük yüzey sıcaklık farkının VJ-7 vorteks jeneratörü olduğu, en yüksek basınç kaybının ise VJ-2 vorteks jeneratöründe olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında kullanılan vorteks jeneratörlerinin tasarımında belirlenen geometrik parametreler olan büküm aralığının, delik çapının ve büküm yönünün ısı transferine etkileri incelenecektir. Elde edilen sonuçlar başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

4.1.1. Büküm aralığı etkisi

Çalışmada büküm aralığının etkisini incelemek amacıyla üretilen vorteks jeneratörleri sırasıyla 10 mm (VJ-1), 25 mm (VJ-2) ve 40 mm (VJ-3) büküm aralığında tasarlanmış olup, elde edilen sıra ortalama yüzey sıcaklık değerlerinin ısı çift sıra numarasına göre değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Reynolds sayısı ve ısı akılarında verilen sonuçlar incelendiğinde Reynolds sayısı arttıkça sıcaklıkların genel olarak azaldığı görülmüştür. VJ-1 vorteks jeneratöründe tüm ısı akıları ve tüm Reynolds sayılarında en yüksek sıra ortalama sıcaklık değeri elde edilmiştir. Buna karşılık VJ-3 vorteks jeneratöründe ise, özellikle yüksek Reynolds sayılarında en düşük sıra ortalama sıcaklık değerleri görülmüştür. Bu bulgular, geometrik yapı ve akış koşullarının lokal sıcaklık dağılımını doğrudan etkilediğini göstermektedir.

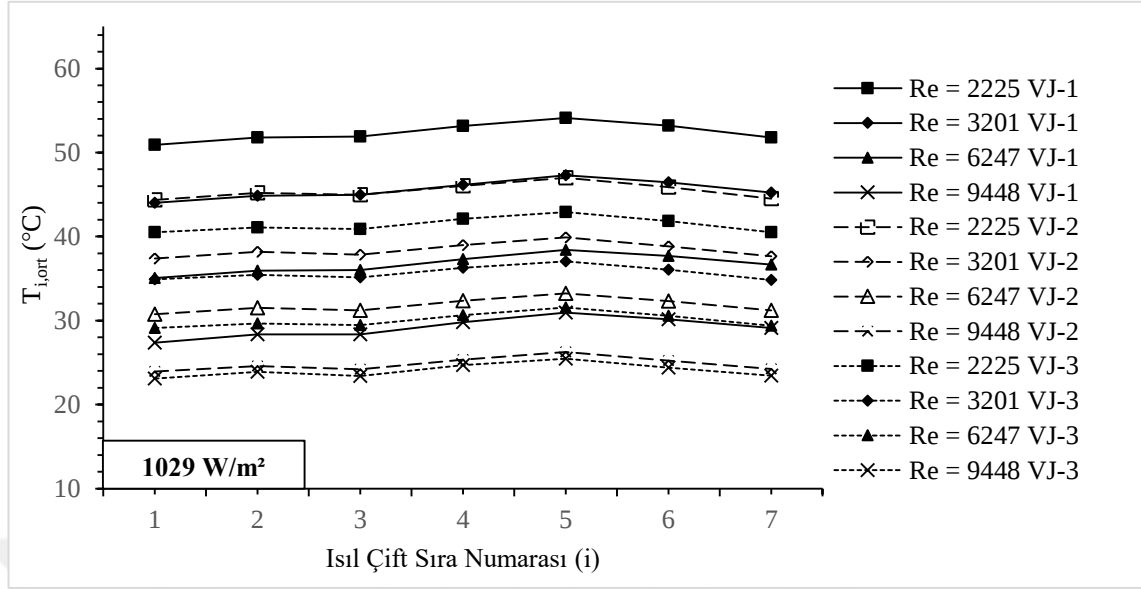
Ayrıca bu farkın, kullanılan iki vorteks jeneratörü arasındaki büküm uzunluğu farklılığından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Büküm uzunluğundaki değişim, akış yapısını ve türbülans oluşumunu etkileyerek sıcaklık dağılımını doğrudan etkilemiştir.

Şekil 4.5' te farklı ısı akıları altında, farklı tiplerdeki vorteks jeneratörleri için test bölgesindeki Sıcaklık farklarının test bölgesi uzunluğu ile değişimi verilmiştir.

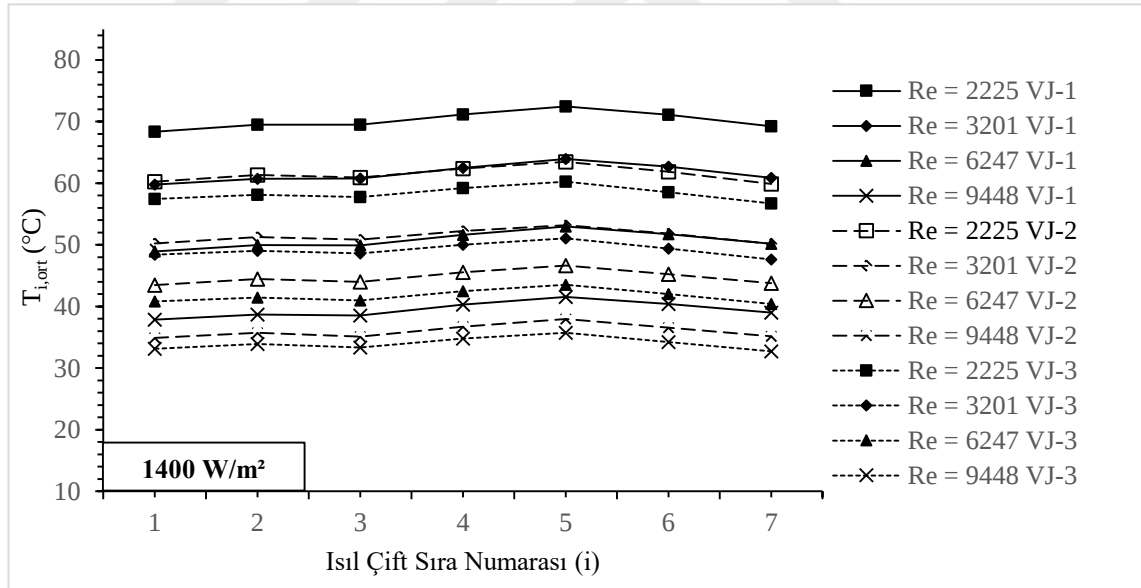


(a)

Şekil 4.5. Sıcaklık farklarının büküm aralığı etkisine göre farklı tipteki vorteks jeneratörleri için karşılaştırması (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²

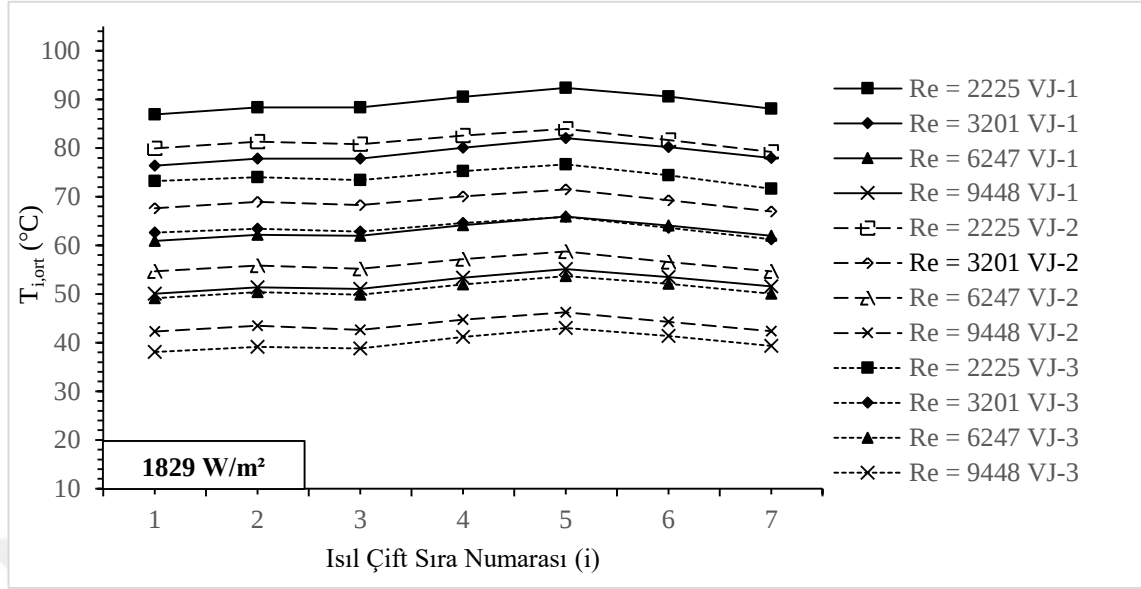


(b)



(c)

Şekil 4.5.'in devamı



(d)

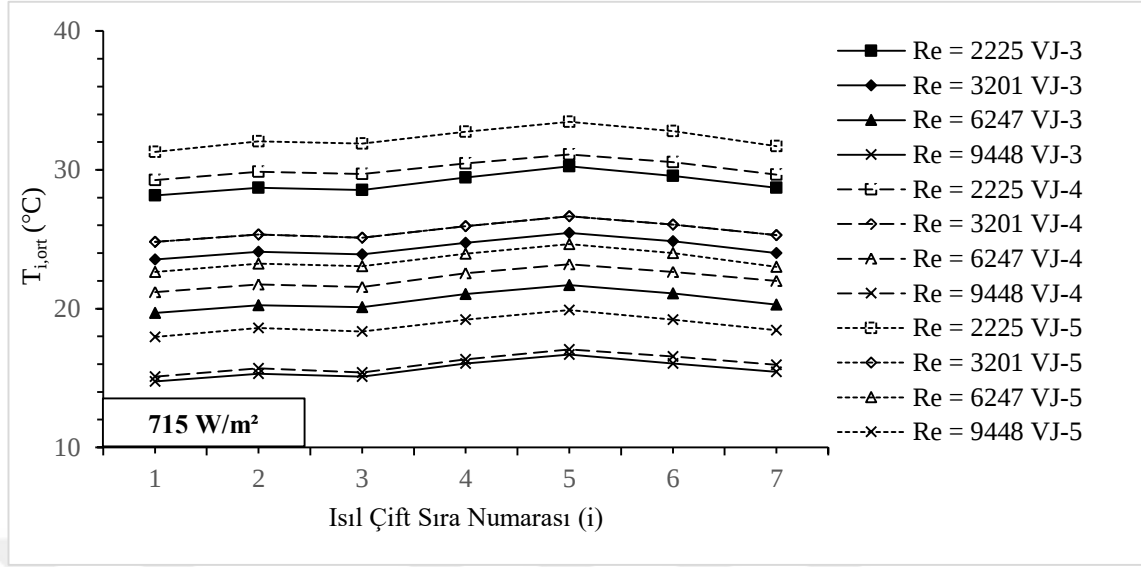
Şekil 4.5.'in devamı

4.1.2. Delik etkisi

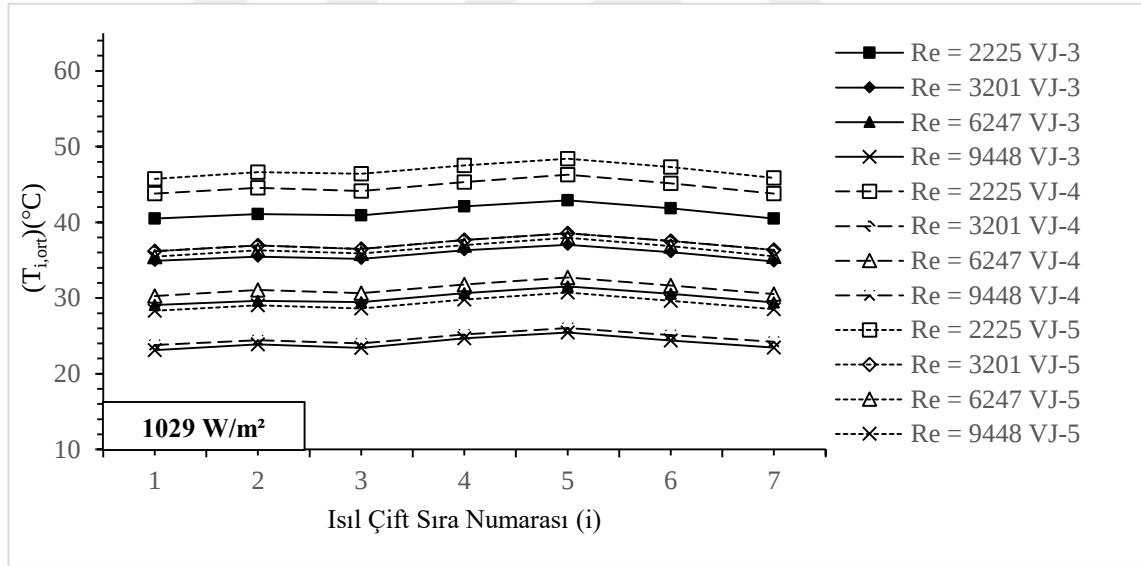
Delik etkisinin ısı transferine etkisini incelemek amacıyla öncelikle deliksiz (VJ-3) sonra vorteks jeneratörü üzerine $d = 3$ mm (VJ-4) ve $d = 7$ mm (VJ-5) çaplarında delikler açılarak deneyler yapılmıştır. Elde edilen sıra ortalama sıcaklık değerlerinin ısı çift sıra numarasına göre dağılımı Şekil 4.6' da verilmiştir.

VJ-3 vorteks jeneratörü, tüm ısı akılarında ve özellikle düşük Reynolds sayılarında (2225 ve 3201) en düşük sıra ortalama sıcaklık değerini ($T_{i,ort}$) sağlayarak ısı açıdan daha iyi performans göstermiştir. Buna karşılık, Reynolds sayısının 9448' e ulaşmasıyla birlikte tüm vorteks jeneratörü tipleri için sıcaklık değerlerinde gözle görülür bir azalma olmuştur.

Vorteks jeneratörleri birbiri ile kıyaslandığında en düşük yüzey sıcaklıkları VJ-3 vorteks jeneratöründe olduğu görülmüştür. Yüzeye farklı çaplarda delikler açılmasının ısı transferi üzerindeki etkilerinin oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.

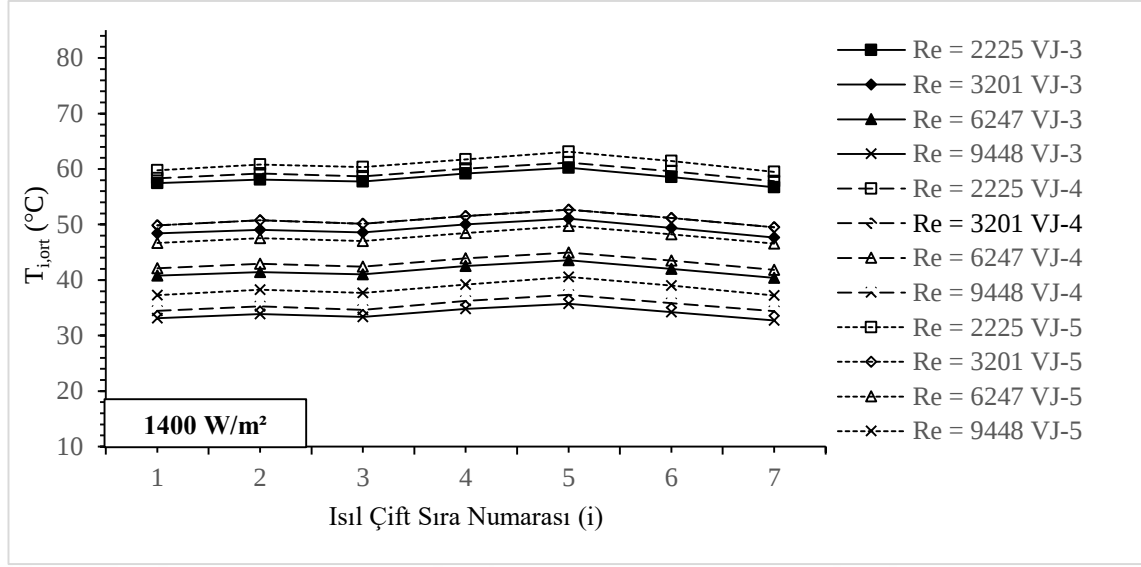


(a)

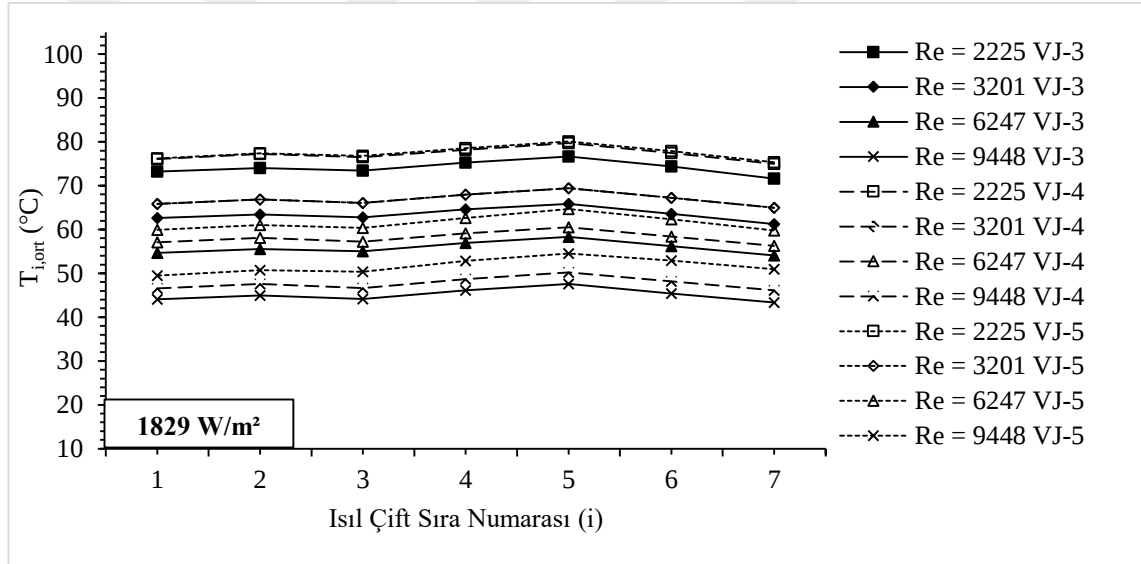


(b)

Şekil 4.6. Sıcaklık farklarının delik etkisine göre farklı tipdeki vorteks jeneratörleri için karşılaştırması (a) 715 W/m^2 , (b) 1029 W/m^2 , (c) 1400 W/m^2 , (d) 1829 W/m^2



(c)



(d)

Şekil 4.6.'nın devamı

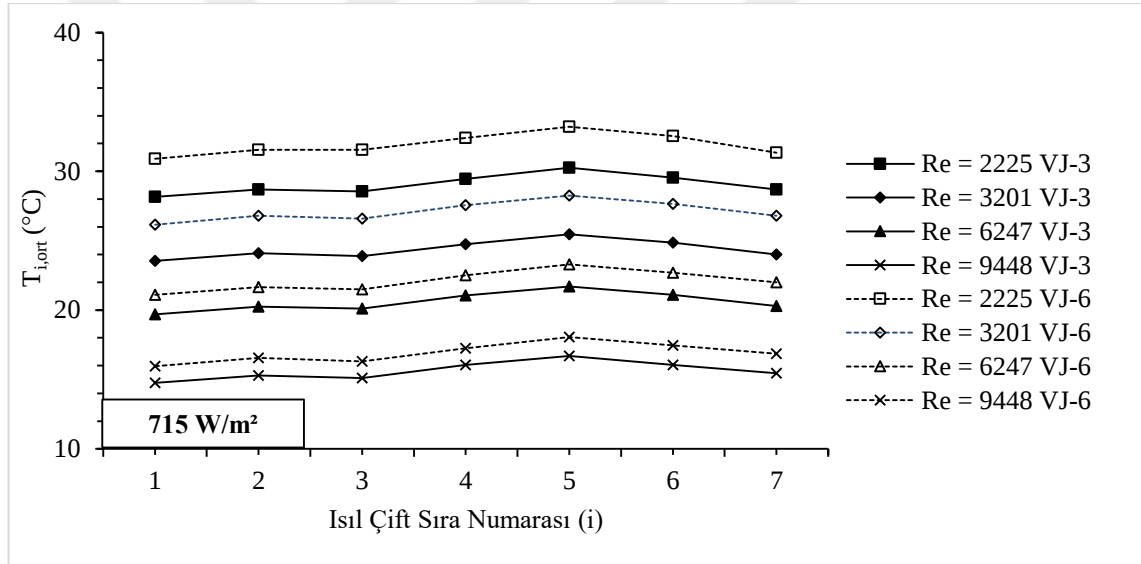
4.1.3. Yön etkisi

Bu kısımda vorteks jeneratörü tasarımında büküm yönünün ısı transferine etkisi incelenmiş olup, kıyaslamalarda VJ-3 ve VJ-6 vorteks jeneratörleri kullanılmıştır. VJ-3 vorteks jeneratörü düz bükümlü olacak şekilde, VJ-6 ise aralıklı ve saptırmalı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 4.7’ de farklı büküm yönlerinde üretilen vorteks jeneratörlerinin kullanımı sonucu sıra ortalama yüzey sıcaklıklarının ısı akısı ve ısı çift sıra numarasına göre değişimi verilmiştir.

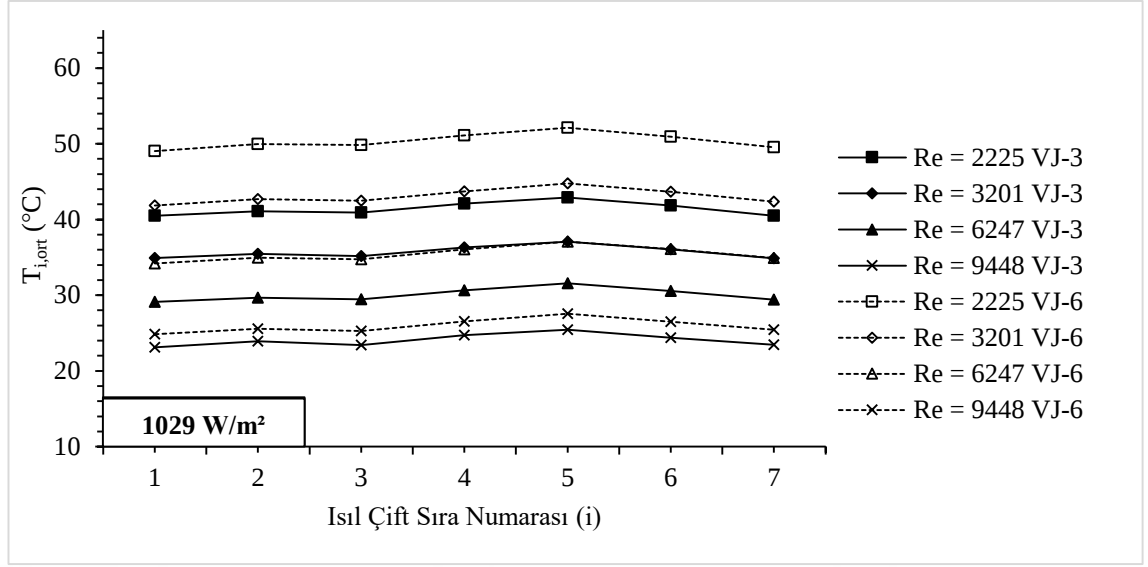
Yapılan karşılaştırmalara göre, VJ-6 vorteks jeneratörü kullanımında bütün ısı akıları için VJ-3’e göre daha yüksek sıcaklık değerlerine sebep olarak değerlerinde daha kötü bir ısı transfer performansı sergilemiştir. VJ-3 kullanımında, özellikle yüksek Reynolds sayısında (9448) en düşük sıcaklık değeri elde edilmiştir. Bu durum, VJ-3’ün daha fazla akışkan karışımı ve konveksiyon etkisiyle yüzey sıcaklığının daha etkin dağıtılmasından kaynaklanabilir olduğunu göstermiştir.

Her iki vorteks jeneratörü için de artan Reynolds sayısı ile sıcaklık değerlerinde azalma eğilimi devam etmiştir.

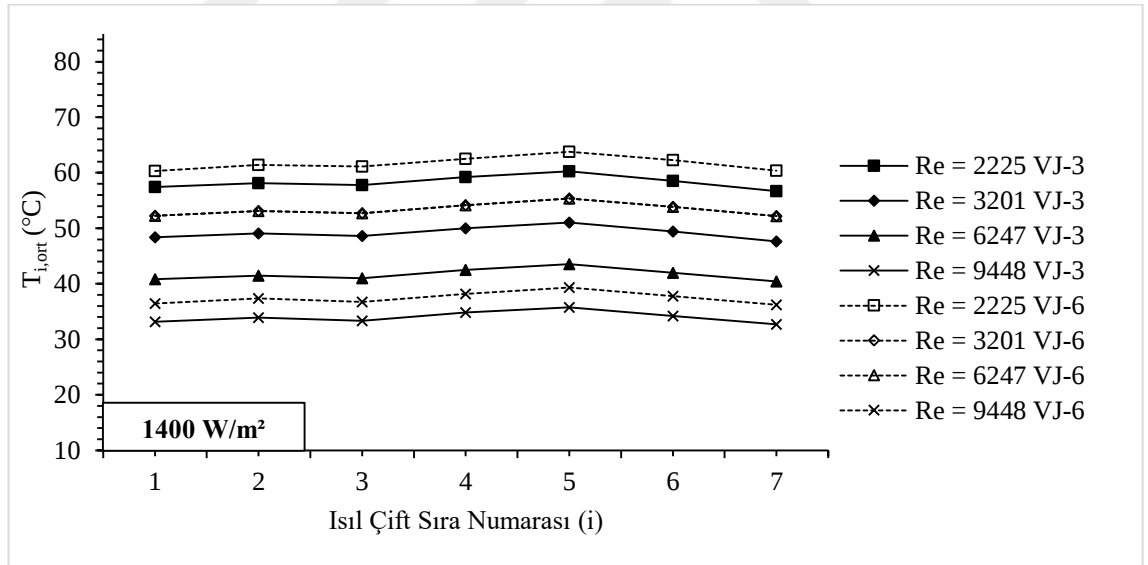


(a)

Şekil 4.7. Sıcaklık farklarının yön etkisine göre farklı tipdeki vorteks jeneratörleri için karşılaştırması (a) 715 W/m², (b) 1029 W/m², (c) 1400 W/m², (d) 1829 W/m²

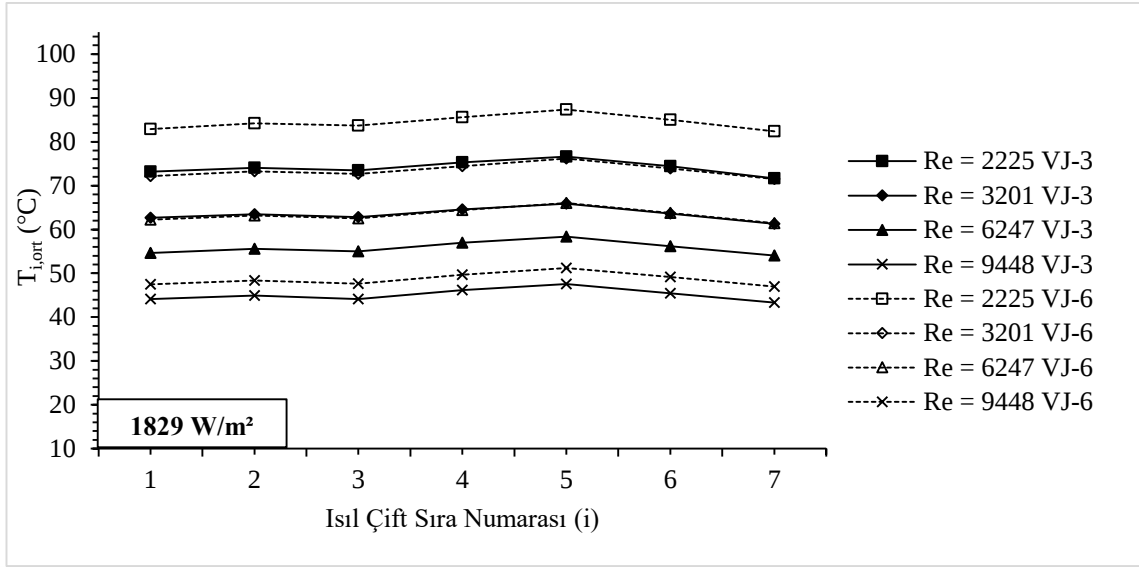


(b)



(c)

Şekil 4.7.'nin devamı



(d)

Şekil 4.7.'nin devamı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmiş yedi farklı bükümlü vorteks jeneratörü tasarımının ısı transfer performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Vorteks jeneratörleri üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA malzemeden üretilmiş ve farklı büküm aralığı, büküm yönleri ve delik çaplarına sahip tasarımlar test edilmiştir. Deneyler sırasında yüzeylere uygulanan sabit ısı akıları 715 W/m^2 ile 1829 W/m^2 arasında, Reynolds sayıları ise 2225 ile 9448 arasında değişmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, tüm vorteks jeneratörü konfigürasyonları boş yüzeye kıyasla ısı transfer performansında anlamlı bir iyileşme sağlamıştır. Bu iyileşmenin temel nedeni, vorteks jeneratörlerinin akışı bozarak türbülans seviyesini artırması ve akışkan ile yüzey arasındaki ısı transferini iyileştirmesidir. Elde edilen bu iyileşme Reynolds sayılarının artmasıyla daha belirgin hale gelmiştir.

Büküm aralığının ısı transferi üzerindeki etkileri incelendiğinde büküm aralığının artırılmasının yüzey sıcaklıklarının düşmesinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir.

Büküm yönünün ısı transferi üzerindeki etkileri incelendiğinde yönün değiştirilmesinin yüzey sıcaklıklarının düşmesindeki etkisinin oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür.

Delik çapı etkisinin ısı transferi üzerindeki etkileri kıyaslandığında yüzeye farklı çaplarda delikler açılmasının düz yüzeye göre etkisinin oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür.

Genel olarak, vorteks jeneratörlerinin kullanımıyla elde edilen ısı transferindeki iyileşme, elektronik soğutma sistemleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında önemli bir avantaj sunmaktadır. Özellikle, kompakt alanlarda etkili soğutma sağlama gereksinimi bulunan sistemlerde vorteks jeneratörlerinin kullanılması, termal performansı artırmak için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, vorteks jeneratörü tasarımlarında farklı malzemelerin kullanımı, daha geniş geometrik parametrelerin test edilmesi ve deneysel sonuçların sayısal analizlerle desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu tür yapıların farklı akışkan tipleri ve akış koşulları altındaki performanslarının değerlendirilmesi, vorteks jeneratörlerinin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Elde edilen deneysel bulgular, boş kanal ile karşılaştırıldığında vorteks jeneratörlerinin ısı transferini anlamlı ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Isı transferindeki iyileşme oranları sırasıyla VJ1 (%9-33), VJ2 (%26-59), VJ3 (%20-51) VJ4 (%32-55), VJ5 (%21-37), VJ6 (%16-45), VJ7 (%28-78) olarak belirlenmiştir. Bu iyileşmeler, vorteks jeneratörlerinin türbülansı artırarak ısı transferini artırdığını göstermektedir. En yüksek etkiyi sağlayan VJ7, tasarımın performans üzerindeki önemini ortaya koymuştur.

6. KAYNAKLAR

- Abdulhamed, A. J., Al-Akam, A., Khudhayer, W. J., & Allw, A. S. (2024). 32- Tubular Heat Enhancement Using Twisted Tape Inserts with Large Holes. *Energy Engineering*, 121(2), 273–290. <https://doi.org/10.32604/EE.2023.045583>
- Arjmandi, H., Amiri, P., & Saffari Pour, M. (2020). 35- Geometric optimization of a double pipe heat exchanger with combined vortex generator and twisted tape: A CFD and response surface methodology (RSM) study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100514. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2020.100514>
- Bilen, K., Tokgoz, N., Solmaz, İ., & Balta, T. (2022). 12- Thermo-hydraulic performance of tube with decaying swirl flow generators. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117643. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117643>
- Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., & Promvonge, P. (2015a). 22- Thermal performance of tubular heat exchanger with multiple twisted-tape inserts. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(5), 755–762. <https://doi.org/10.1016/J.CJCHE.2015.01.003>
- Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., & Promvonge, P. (2015b). 24- Heat transfer augmentation in a circular tube with winglet vortex generators. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(4), 605–614. <https://doi.org/10.1016/J.CJCHE.2014.04.002>
- Chuwattanakul, V., & Eiamsa-Ard, S. (2019). 26- Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100389. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2018.100389>
- Chu, W. X., Tsai, C. A., Lee, B. H., Cheng, K. Y., & Wang, C. C. (2020). 18- Experimental investigation on heat transfer enhancement with twisted tape having various V-cut configurations. *Applied Thermal Engineering*, 172, 115148. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115148>
- Dogan, M., & Erzincan, S. (2023). 29- Experimental investigation of thermal performance of novel type vortex generator in rectangular channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 144, 106785. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2023.106785>
- Eiamsa-ard, S. (2010). 7- Study on thermal and fluid flow characteristics in turbulent channel flows with multiple twisted tape vortex generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(6), 644–651. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2010.02.004>
- Eiamsa-ard, S., Changcharoen, W., Beigzadeh, R., Eiamsa-ard, P., Wongcharee, K., & Chuwattanakul, V. (2021). 25- Influence of co/counter arrangements of multiple twisted-tape bundles on heat transfer intensification. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 160, 108304. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2021.108304>
- He, Y., Liu, L., Li, P., & Ma, L. (2018). 11- Experimental study on heat transfer enhancement characteristics of tube with cross hollow twisted tape inserts. *Applied*

- Thermal Engineering*, 131, 743–749.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.12.029>
- Hong, Y., Du, J., & Wang, S. (2017). 2- Experimental heat transfer and flow characteristics in a spiral grooved tube with overlapped large/small twin twisted tapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 1178–1190.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2016.10.098>
- Hong, Y., Zhao, L., Huang, Y., Li, Q., Jiang, J., & Du, J. (2023). 14- Turbulent thermal-hydraulic characteristics in a spiral corrugated waste heat recovery heat exchanger with perforated multiple twisted tapes. *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 108025. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2022.108025>
- Kosker, M., & Yilmaz, F. (2020). 8-The cross-sectional curvature effect of twisted tapes on heat transfer performance. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 154, 108008. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2020.108008>
- Lim, K. Y., Hung, Y. M., & Tan, B. T. (2017). 10- Performance evaluation of twisted-tape insert induced swirl flow in a laminar thermally developing heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 121, 652–661.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.04.134>
- Mohd Amin, A. T., Wan Hamzah, W. A., & Ismail, M. A. (2023). 33- Effect of diameter, twist angle, and blade count on the thermal-hydraulic performance of a decaying twisted swirler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 50, 103513.
<https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103513>
- Mushatet, K. S., Rishak, Q. A., & Fagr, M. H. (2020). 13- Experimental and numerical investigation of swirling turbulent flow and heat transfer due to insertion of twisted tapes of new models in a heated tube. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115070.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115070>
- Nakhchi, M. E., & Esfahani, J. A. (2019). 21- Numerical investigation of rectangular-cut twisted tape insert on performance improvement of heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 138, 75–83.
<https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.12.039>
- Piriyarungrod, N., Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Pimsarn, M., & Nanan, K. (2015). 28- Heat transfer enhancement by tapered twisted tape inserts. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 96, 62–71.
<https://doi.org/10.1016/J.CEP.2015.08.002>
- Piriyarungrod, N., Kumar, M., Thianpong, C., Pimsarn, M., Chuwattanakul, V., & Eiamsa-ard, S. (2018). 23- Intensification of thermo-hydraulic performance in heat exchanger tube inserted with multiple twisted-tapes. *Applied Thermal Engineering*, 136, 516–530. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.02.097>
- Promvonge, P. (2015). 6-Thermal performance in square-duct heat exchanger with quadruple V-finned twisted tapes. *Applied Thermal Engineering*, 91, 298–307.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.08.047>
- Promvonge, P., & Skullong, S. (2021). 27- Heat transfer in a tube with combined V-winglet and twin counter-twisted tape. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101033. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101033>

- Promvonge, P., Suwannapan, S., Pimsarn, M., & Thianpong, C. (2014). 17- Experimental study on heat transfer in square duct with combined twisted-tape and winglet vortex generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59, 158–165. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2014.10.005>
- Saysroy, A., & Eiamsa-ard, S. (2017). 16- Periodically fully-developed heat and fluid flow behaviors in a turbulent tube flow with square-cut twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 112, 895–910. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.10.154>
- Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2015). 30- Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 444–469. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.113>
- Singh, S. K., Kacker, R., Chaurasiya, P. K., & Gautam, S. S. (2022). 34- Correlations on heat transfer rate and friction factor of a rectangular toothed v-cut twisted tape exhibiting the combined effects of primary and secondary vortex flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 139, 106503. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2022.106503>
- Singh, V., Chamoli, S., Kumar, M., & Kumar, A. (2016). 3- Heat transfer and fluid flow characteristics of heat exchanger tube with multiple twisted tapes and solid rings inserts. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 102, 156–168. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2016.01.013>
- Skullong, S., Promvonge, P., Jayranaiwachira, N., & Thianpong, C. (2016). 4- Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 109, 164–177. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2016.09.005>
- Skullong, S., Promvonge, P., Thianpong, C., Jayranaiwachira, N., & Pimsarn, M. (2018). 15- Thermal performance of heat exchanger tube inserted with curved-winglet tapes. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1197–1211. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.10.110>
- Skullong, S., Thianpong, C., Jayranaiwachira, N., & Promvonge, P. (2016). 9- Experimental and numerical heat transfer investigation in turbulent square-duct flow through oblique horseshoe baffles. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 99, 58–71. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2015.11.008>
- Tamna, S., Kaewkohkiat, Y., Skullong, S., & Promvonge, P. (2016). 1- Heat transfer enhancement in tubular heat exchanger with double V-ribbed twisted-tapes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 7, 14–24. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2016.01.002>
- Xu, Y., Islam, M. D., & Kharoua, N. (2018). 19- Experimental study of thermal performance and flow behaviour with winglet vortex generators in a circular tube. *Applied Thermal Engineering*, 135, 257–268. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.01.112>
- Yadav, R. J., Kore, S., Raibhole, V. N., & Joshi, P. S. (2015). 31- Development of Correlations for Friction Factor and Heat Transfer Coefficient for Square and Hex

- Duct with Twisted Tape Insert in Laminar Flow. *Procedia Engineering*, 127, 250–257. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.11.337>
- Yang, T., Sun, Y., Xu, L., Xi, L., Gao, J., & Li, Y. (2023). 20- Comparative study on flow and heat transfer characteristics of swirling impingement jet issuing from different nozzles. *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 107914. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2022.107914>
- Yang, W., Jin, C., Zhu, W., Xie, C., Huang, L., Li, Y., & Xiong, B. (2024). 5-Innovative design for thermoelectric power generation: Two-stage thermoelectric generator with variable twist ratio twisted tapes optimizing maximum output. *Applied Energy*, 363, 123047. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2024.123047>
- Holman J. P. 1994. Experimental methods for engineers. The McGraw-Hill companies, Singapore City, 739 s.



ÖZGEÇMİŞ

Yiğit ÇAKIR

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2021	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Ar-ge Mühendisi	Cw Enerji
2022-2023	Lityum Batarya Bölümü, Antalya
Ar-ge Mühendisi	İmecar
2021-2022	Lityum Batarya Bölümü, Antalya
Ar-ge Mühendisi	DAMEN Shipyard
2021-2021	Devreye Alma Bölümü, Antalya