T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ELİPTİK ÇUKUR KANATÇIKLI KARE KESİTLİ KANALDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ TERMOHİDROLİK PERFORMANSA ETKİLERİ

FURKAN YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. MEHMET GÜRDAL

OCAK - 2026
KASTAMONU

TEZ ONAYI

FURKAN YILDIRIM tarafından hazırlanan "**ELİPTİK ÇUKUR KANATÇIKLI KARE KESİTLİ KANALDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ TERMOHİDROLİK PERFORMANSA ETKİLERİ**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **19.01.2026** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Mehmet GÜRDAL Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Kamil ARSLAN Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Yasin ÖZCAN Kastamonu Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. Selahattin KAYMAKCI .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Furkan YILDIRIM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİPTİK ÇUKUR KANATÇIKLI KARE KESİTLİ KANALDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ TERMOHİDROLİK PERFORMANSA ETKİLERİ

FURKAN YILDIRIM

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN:DOÇ. DR. MEHMET GÜRDAL

Bu tez çalışmasında, pasif ısı transferi iyileştirme tekniklerinden biri olan eliptik çukur kanatçıklar ile yüzey modifikasyonu ile ZnO/H_2O nanoakışkanının birleşik kullanımının, kare kesitli bir kanal içerisindeki termohidrolik performansa etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Araştırma, laminer akış rejimini ($500 \leq Re \leq 2000$) kapsamakta olup, 2000 W/m^2 sabit ısı akısı sınır şartlarında yürütülmüştür. Referans düz test kanalı (DTK) ile karşılaştırmalı olarak, üç farklı adım oranına (P/b=20, 15 ve 10) sahip çukur kanatçıklı kanallar (ÇTK) test edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak su ve %1,0 hacimsel konsantrasyonlu ZnO/H_2O nanoakışkanı kullanılmıştır. Çalışmadaki sayısal analizler ANSYS Fluent yazılımı ile sonlu hacimler yöntemi, SIMPLE algoritması ve ikinci mertebeden ayrıklaştırma şemaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağ bağımsızlık testleriyle belirlenen 297.690 elemanlı model, deneysel verilerle Nusselt sayısı için ortalama %5,43 sapma oranıyla doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, Reynolds sayısı ve çukur kanatçık sıklığının artışıyla performansın belirgin şekilde iyileştiğini göstermiştir. Su deneylerinde, en sık kanatçık yapısına sahip P/b=10 geometrisi, Re=2000 değerinde Nusselt sayısını %21,63 artırırken, tüm aralıkta ortalama artış %16,37 olmuştur. Aynı koşullarda sadece nanoakışkan kullanımı, nanopartiküllerin yüksek iletkenliği ve Brownian hareketi sayesinde %22,78'lik bir artış sağlamıştır. Yöntemlerin sinerjik etkisi değerlendirildiğinde, P/b=10 geometrisi ve nanoakışkan kombinasyonu maksimum performansı sunmuş; Re=2000 noktasında Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) 1,25 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sürtünme katsayısındaki %6,22 artışa rağmen, harcanan birim pompalama gücü başına %25 daha fazla ısı transferi elde edildiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca P/b=10 geometrisi, daha seyrek olan P/b=20 yapısına kıyasla sistem verimliliğinde %11,87 ek iyileşme sağlamıştır. Sonuç olarak, önerilen hibrit yöntemin termodinamik açıdan verimli olduğu ve P/b=10 konfigürasyonunun optimum tasarım parametresi olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Isı Transferi İyileştirme, Nanoakışkan, Eliptik Çukur Kanatçık, Kare Kanal, Deneysel Analiz, CFD

Ocak 2026, 121 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECTS OF NANOFLUID FLOW ON THE THERMOHYDRAULIC PERFORMANCE IN AN ELLIPTICAL DIMPLED SQUARE CROSS-SECTION CHANNEL

FURKAN YILDIRIM

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR:ASSOC. PROF. MEHMET GÜRDAL

In this thesis study, the effects of the combined use of ZnO/H_2O nanofluid with surface modification using elliptical dimple fins, one of the passive heat transfer improvement techniques, on the thermohydraulic performance within a square-section channel were investigated experimentally and numerically. The research covers the laminar flow regime ($500 \leq Re \leq 2000$) and was conducted under constant heat flux boundary conditions of 2000 W/m^2. Compared to the reference flat test channel (FTC), three different step ratios (P/b=20, 15, and 10) of dimpled test channels (DTC) were tested. Water and ZnO/H_2O nanofluid with a 1.0% volume concentration were used as the working fluids. The numerical analyses in the study were performed using ANSYS Fluent software with the finite volume method, SIMPLE algorithm, and second-order discretisation schemes. The 297,690-element model, determined by mesh independence tests, was validated with experimental data with an average deviation rate of 5.43% for the Nusselt number. The findings showed that performance improved significantly with increasing Reynolds number and pit fin density. In water experiments, the P/b=10 geometry with the highest dimple density increased the Nusselt number by 21.63% at Re=2000, with an average increase of 16.37% across the entire range. Under the same conditions, the use of nanofluids alone provided a 22.78% increase due to the high conductivity and Brownian motion of the nanoparticles. When evaluating the synergistic effect of the methods, the combination of the P/b=10 geometry and nanofluid provided maximum performance; the Performance Evaluation Criterion (PEC) was calculated as 1.25 at Re=2000. This value proves that, despite a 6.22% increase in the friction coefficient, 25% more heat transfer was achieved per unit of pumping power expended. Furthermore, the P/b=10 geometry provided an additional 11.87% improvement in system efficiency compared to the less dense P/b=20 structure. Consequently, it has been determined that the proposed hybrid method is thermodynamically efficient and that the P/b=10 configuration represents the optimal design parameter.

KEYWORDS: Heat Transfer Enhancement, Nanofluid, Elliptical Dimple Fin, Square Channel, Experimental Analysis, CFD

January 2026, 121 Page

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitim sürecimin ilk gününden itibaren bana yol gösteren, bilgisi, birikimi ve tecrübeleriyle bana yeni ufuklar açan, akademik çalışmalarımın ve akademik kariyerimin temellerini atan değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet GÜRDAL' a bana kattıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Tezim kapsamında kurmaya çalıştığım deney düzeneğinin kurulmasında ve deneylerimin yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Arif UZUN' a, Prof. Dr. Fuat KARTAL' a, Dr. Öğr. Üyesi Erman ZURNACI' ya, Dr. Öğr. Üyesi Yasin ÖZCAN' a ve Dr. Öğr. Üyesi Emrehan GÜRSOY' a ve Büşra YILDIRIM' a teşekkürü borç bilirim.

Son olarak yüksek lisans eğitim sürecim boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen anneme, babama ve kardeşime tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Furkan YILDIRIM

Kastamonu, 2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER **1**
ŞEKİLLER DİZİNİ **3**
TABLOLAR DİZİNİ **5**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ **6**
1. GİRİŞ **7**
1.1 Isı Transferi Artırma Yöntemleri 9
1.1.1 Aktif Isı Transferi Artırma Yöntemleri 11
1.1.1.1 Mekanik yardımlar 11
1.1.1.2 Yüzey titreşimi 12
1.1.1.3 Akış kaynaklı titreşim 13
1.1.1.4 Jet çarpması 14
1.1.1.5 Sprey 16
1.1.1.6 Elektroaktif malzeme 17
1.1.1.7 Elektrohidrodinamik 18
1.1.1.8 Ultrasonik titreşim 18
1.1.2 Pasif Yöntemler 20
1.1.2.1 Girdap üreteçleri 21
1.1.2.2 Kanatçık yapıları 22
1.1.2.3 İşlenmiş yüzeyler 23
1.1.2.4 Genişletilmiş yüzeyler 24
1.1.2.5 Kanal Geometrisi 26
1.1.2.6 Nanoakışkan kullanımı 27
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **28**
3. BORU VE KANALLARDA AKIŞ **34**
3.1 Reynolds Sayısı 34
3.2 Laminer Akış 35
3.3 Türbülanslı Akış 35
3.4 Hidrodinamik Sınır Tabaka 36
3.5 Isıl Sınır Tabaka 37
3.6 Kanal İçi Akışta Nanoakışkan Kullanımı 37
3.7 Kanal İçi Akışta Çukur Kanatçıların Kullanımı 40
4. YÖNTEM **42**
4.1 Deneysel Yöntem 43
4.1.1 Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar 44
4.1.2 Nanopartikül Temini ve Nanoakışkanın Hazırlanması 53
4.1.3 Verilerin Analizi ve Deneysel Hesaplamalar 55
4.1.4 Belirsizlik Analizi 59
4.2 Sayısal Yöntem 60
4.2.1 HAD Analizinde Çözüm Ağının Oluşturulması 64

4.2.2 Korunum Denklemleri 65
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR 66
5.1 Deneysel Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Bulgular 66
5.1.1 Su Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Deneysel Bulguları 67
5.1.2 Nanoakışkan Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Deneysel Bulguları ... 73
5.2 Sayısal Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Bulgular 76
5.2.1 Su Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Sayısal Bulguları 77
5.2.2 Nanoakışkan Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Sayısal Bulguları 80
5.3 Deneysel ve Sayısal Bulguların Karşılaştırılması 83
5.4 Sıcaklık, Hız ve Nusselt Sayısı Dağılımları 91
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 96
KAYNAKLAR 100
ÖZGEÇMİŞ 115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Isı transferi artırma yöntemlerinin uygulandığı başlıca sektörler 9
Şekil 1.2 a) Aktif ve b) pasif ısı transferi artırma yöntemlerine örnekler 10
Şekil 1.3 Aktif ısı transferi artırma yöntemleri 11
Şekil 1.4 İki kazıyıcıya sahip kazınmış yüzeyli ısı eşanjörü 12
Şekil 1.5 Yüzey titreşimi uygulanmış çift borulu ısı eşanjörü 13
Şekil 1.6 Mikrokanala monte edilmiş sentetik jet 15
Şekil 1.7 Sprey soğutmanın ısı transfer mekanizmaları 16
Şekil 1.8 Bükülebilir ve eliptik aktüatörler 17
Şekil 1.9 Ultrasonik titreşim uygulanmış kabuk ve borulu ısı eşanjörü 19
Şekil 1.10 Pasif ısı transferi artırma yöntemleri 20
Şekil 1.11 Bükülmüş girdap üreteci içeren dairesel kanal 22
Şekil 1.12 Kanal içine yerleştirilmiş silindirik kanatçık yapıları 23
Şekil 1.13 İç yüzeyi işlenmiş kanal yapısı 24
Şekil 1.14 V şekilli iç yüzey alanına sahip kanal 25
Şekil 1.15 Geometrisi değiştirilmiş kanallar 26
Şekil 3.1 Kanal içi akışta hidrodinamik tabakanın gelişimi 36
Şekil 3.2 Kanal içi akışta ısıl sınır tabakanın gelişimi 37
Şekil 4.1 Çalışma planı algoritması 43
Şekil 4.2 Deney düzeneğinin şematik görünümü 45
Şekil 4.3 Deney düzeneğinin genel görünümü 46
Şekil 4.4 Rezistans ısıtıcı kablo ve ısıl çiftlerin test kanalına bağlantısı 47
Şekil 4.5 Düz ve çukur kanatçık uygulanmış test kanalları 48
Şekil 4.6 Ayarlı güç kaynağı 49
Şekil 4.7 Veri kaydedici 49
Şekil 4.8 Sirkülasyon pompası 50
Şekil 4.9 Plastik türbin debimetre 51
Şekil 4.10 Arduino debi göstergesi 51
Şekil 4.11 Basınç fark transmitterinin deney düzeneğine bağlantısı 52
Şekil 4.12 Rezervuar tankı 52
Şekil 4.13 Isı değiştiricinin deney düzeneğine bağlantısı 53
Şekil 4.14 Nanoakışkan hazırlanışında kullanılan malzemeler 54
Şekil 4.15 Nanoakışkanın ultrasonik karıştırıcıda hazırlanışı 55
Şekil 4.16 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz süreci 60
Şekil 4.17 Sayısal analizler süresince takip edilen çözüm adımları 61
Şekil 4.18 Sayısal analiz çözümlerinde kullanılan viskoz model 62
Şekil 4.19 Basınç-hız çiftinin ilişkilendirilmesi ve ayrıklaştırılması için kullanılan model 62
Şekil 4.20 Sayısal analizde kullanılan kanalın 3 boyutlu görünümü ve sınır şartları 63
Şekil 4.21 Çukur kanatçıklı test kanalının kesit görüntüsü 63
Şekil 4.22 Sayısal analiz için yapılan ağ bağımsızlık çalışması 64
Şekil 5.1 DTK içindeki su akışında Nu ve f sonuçlarının literatür ile kıyaslanması 68
Şekil 5.2 DTK içindeki su ve ZnO/H_2O nanoakışkanı için Nu ve f değerlerinin kıyaslanması 69

Şekil 5.3 DTK ve ÇTK içindeki su akışında deneysel Nu değerlerinin kıyaslanması 70
Şekil 5.4 DTK ve ÇTK içindeki su akışında deneysel *f* değerlerinin kıyaslanması ... 71
Şekil 5.5 ÇTK içindeki su akışında deneysel PDK değerlerinin kıyaslanması 72
Şekil 5.6 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel Nu değerlerinin kıyaslanması 74
Şekil 5.7 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel *f* değerlerinin kıyaslanması 75
Şekil 5.8 ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel PDK değerlerinin kıyaslanması 76
Şekil 5.9 Seçilen ağ yapısının a) ön görünüşü, b) kesit görünüşü 77
Şekil 5.10 DTK ve ÇTK içindeki su akışında sayısal Nu değerlerinin kıyaslanması 78
Şekil 5.11 DTK ve ÇTK içindeki su akışında sayısal *f* değerlerinin kıyaslanması 79
Şekil 5.12 ÇTK içindeki su akışında sayısal PDK değerlerinin kıyaslanması 80
Şekil 5.13 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında sayısal Nu değerlerinin kıyaslanması 81
Şekil 5.14 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında sayısal f değerlerinin kıyaslanması 82
Şekil 5.15 ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında sayısal PDK değerlerinin kıyaslanması 83
Şekil 5.16 DTK içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması ... 84
Şekil 5.17 DTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 85
Şekil 5.18 P/b=20 içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 86
Şekil 5.19 P/b=20 içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 87
Şekil 5.20 P/b=15 içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 88
Şekil 5.21 P/b=15 içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 89
Şekil 5.22 P/b=10 içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 90
Şekil 5.23 P/b=10 içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması 91
Şekil 5.24 Sayısal analizler sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları 92
Şekil 5.25 Sayısal analizler sonucu elde edilen hız dağılımları 94
Şekil 5.26 Sayısal analizler sonucu elde edilen Nu dağılımları 95
Şekil 6.1 Gelecek çalışmalar için öneriler 98

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Literatürde nanoakışkan kullanılarak yapılan çalışmalar 38
Tablo 4.1 Çalışma kapsamında yürütülen deneyler 44
Tablo 4.2 Çukur kanatçık parametreleri 48
Tablo 4.3 Nanoakışkan hazırlanışında kullanılan yüzey aktif madde miktarı 54
Tablo 4.4 Baz akışkan ve ZnO nanopartiküllerinin termofiziksel özellikleri 55
Tablo 4.5 Deneylerde kullanılan cihazların belirsizlik analizi 60
Tablo 4.6 Çıkış parametrelerindeki hata oranı 60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

a	**:** çukur kanatçık uzunluğu (mm)
A	**:** yüzey alanı
Al_2O_3	**:** alüminyum oksit
b	**:** çukur kanatçık genişliği (mm)
c	**:** özgül ısı (J/kgK)
CuO	**:** bakır oksit
D	**:** test kanalı kenar uzunluğu (mm)
$\vec{E}$	**:** rezistans ısıtıcıya aktarılan enerji (J)
f	**:** darcy sürtünme katsayısı
Fe_3O_4	**:** manyetit
h	**:** ısı taşınım katsayısı (W/m^2)
H_2O	**:** su
k	**:** ısı iletim katsayısı (W/mK)
L	**:** kanal boyu (mm)
nm	**:** nanometre
Nu	**:** nusselt sayısı
P	**:** ısıtma kapasitesi (W)
P/b	**:** kanatçık adım oranı
ΔP	**:** basınç farkı
Pr	**:** prandtl sayısı
q''	**:** ısı akısı (W/m^2)
Re	**:** reynolds sayısı
T	**:** sıcaklık
V	**:** akışkan hızı (m/s)
ZnO	**:** çinko oksit
μ	**:** dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	**:** yoğunluk (kg/m^3)
φ	**:** hacimsel konsantrasyon oranı (%)

Kısaltmalar

ÇTK	**:** Çukur Kanatçıklı Test Kanalı
DTK	**:** Düz Test Kanalı
DTK	**:** Düz Test Kanalı
EG	**:** Etilen glikol
EHD	**:** Elektrohidrodinamik
HAD	**:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAD	**:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MWCNT	**:** Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
PDK	**:** Performans Değerlendirme Kriteri
SDS	**:** Sodyum Dodesil Sülfat
SSHE	**:** Kazınmış Yüzeyli Isı Eşanjörü
TEP	**:** Ton Eşdeğer Petrol

1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfus, modernleşme süreci ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerji talebinin keskin bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Özellikle Hindistan ve Çin gibi gelişmekte olan ülkelerde, hızlı sanayileşme, kentleşme ve küresel pazarlardaki rekabet baskısı, enerji talebini tarihsel olarak en yüksek seviyelere taşımıştır (Wang vd., 2018). Bu durum, enerji arzı ve tüketimi arasındaki dengenin korunmasını giderek daha karmaşık hale getirmekte ve enerji kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini zorunlu kılmaktadır (Omer, 2008). Artan enerji talebi genel olarak iki temel yaklaşımla karşılanabilmektedir: enerji arzının artırılması veya enerji kayıplarının azaltılması. Ancak enerji arzını artırmaya yönelik çözümler, mevcut doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı artırmakta ve enerji üretimi, işletimi ile çıkarımı süreçlerinde ciddi maliyet artışlarına yol açmaktadır (Jia vd., 2024). Ayrıca, fosil yakıt temelli enerji üretiminde arzın artırılması, sera gazı emisyonlarını yükselterek çevresel sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir (Shafiei ve Salim, 2014).

Enerji tasarrufu, içinde bulunduğumuz yüzyılın en hayati konularından biridir ve yakın gelecekte de en önemli zorluklardan biri olacağı kesindir. Bu nedenle bilim insanları bu önemli meseleyi ele almaya çalışmaktadır (Dincer, 2000). Endüstriyel cihazlarda ısıtma veya soğutma konusunda kaydedilen ilerlemeler, enerji tasarrufu ve ısı transferinin iyileştirilmesine neden olmakta ve ekipmanın çalışma ömrünü uzatmaktadır (Alahmer vd., 2025). Enerji tasarrufu, enerjinin verimli kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Enerji dönüşümü, korunması ve geri kazanımı enerji tasarrufu için bazı yollardır (Jouhara vd., 2018).

Enerji tasarrufu kavramı, günlük yaşantımızın yanı sıra endüstriyel tesislerde de hayati bir öneme sahiptir, çünkü bu tesisler büyük bir enerji miktarını tüketir. Enerji tasarrufu, aynı işi daha az enerji kullanarak gerçekleştirmek anlamına gelir ve enerji tasarrufu, enerjiyi hiç kullanmamak anlamına gelmez (Töre vd., 2022). Bu, bilinen genel yöntemleri, geliştirme prosedürlerini ve yeni teknolojileri kullanarak sosyal hayat standartlarını gözeterek enerjiyi daha etkili bir şekilde kullanmayı ifade eder. Unutulmamalıdır ki, en ucuz enerji tasarruf edilmiş enerjidir (Yousuf vd., 2024).

Türkiye'de enerji tüketiminin %41'i endüstriyel tesislerde, %31'i binalarda ve %20'si taşımacılıkta gerçekleşmektedir. Özellikle Türkiye'deki endüstriyel tesislerde yılda 3,7 milyon ton eşdeğer petrol (TEP) tüketilmektedir. Yapılan bazı çalışmalar, Türk sanayisinde kullanılan enerjinin %30'unun tasarruf edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, enerji tasarrufu çabaları, sadece maliyetleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği artırır ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkıda bulunur. Endüstriyel tesislerde ve diğer sektörlerde enerji tasarrufu uygulamaları hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir gelecek için önemlidir (Kanoğlu, 2010).

Isı değiştiricileri; proses endüstrilerinde, buharlaştırıcılarda, elektronik bileşenlerin soğutulmasında, termik santrallerde, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde, uzay araçları radyatörlerinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan temel ısı transferi ekipmanlarıdır (Kumar Ahirwar ve Kumar, 2025). Bu cihazların performansındaki iyileşme, daha verimli ve ekonomik tasarımların geliştirilmesine olanak tanıyarak enerji, malzeme ve maliyet açısından önemli tasarruflar sağlar. Isı değiştiricilerinin termal performansını artırma gereksinimi, bu tasarruf hedefleri doğrultusunda çeşitli ısı transferi iyileştirme tekniklerinin geliştirilmesine yol açmıştır (J. Zhang vd., 2019). Bu yöntemler, literatürde aynı zamanda ısı transferinin yoğunlaştırılması veya geliştirilmesi olarak da anılmaktadır. Temel amaç, ısı değiştirici içerisinde oluşan toplam termal direnci azaltarak konvektif ısı transfer katsayısını yükseltmektir (Suri vd., 2018).

Enerji sektöründe temel hedef, daha az enerji tüketimiyle daha fazla iş yapılabilmesidir. Bu doğrultuda, enerji verimliliğini artırmak ve ısı transfer süreçlerini iyileştirmek amacıyla çeşitli ısı transferi artırma yöntemleri geliştirilmiş ve özellikle endüstride yaygın olarak kullanılan ısı değiştiricilerinde uygulanmaya başlanmıştır (Marzouk vd., 2023). Enerji maliyetlerinin artması ve sistem boyutlarının küçültülme gereksinimi, bu tekniklerin kullanımını giderek daha önemli hale getirmektedir. Isı transferinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar; ısı taşınım katsayısının artırılması ve ısı transfer yüzey alanının genişletilmesi gibi temel yaklaşımlar üzerine kuruludur (Sohrabi vd., 2024). Bu amaçla geliştirilen yöntemler arasında, ısı transfer yüzeyinin döndürülmesi, akışta türbülans oluşturmak amacıyla boru içerisine türbülatörlerin

yerleştirilmesi, elektrostatik alanların uygulanması, pürüzlü yüzeylerin, kanatçıkların veya farklı geometrilere sahip elemanların kullanılması sayılabilir. Ayrıca, ısı transfer yüzeyine düşük frekansta titreşim uygulanması ya da akışkana mekanik titreşim verilmesi gibi yöntemlerle de ısı transfer performansının artırılması mümkün olmaktadır (Y. Cheng vd., 2024).

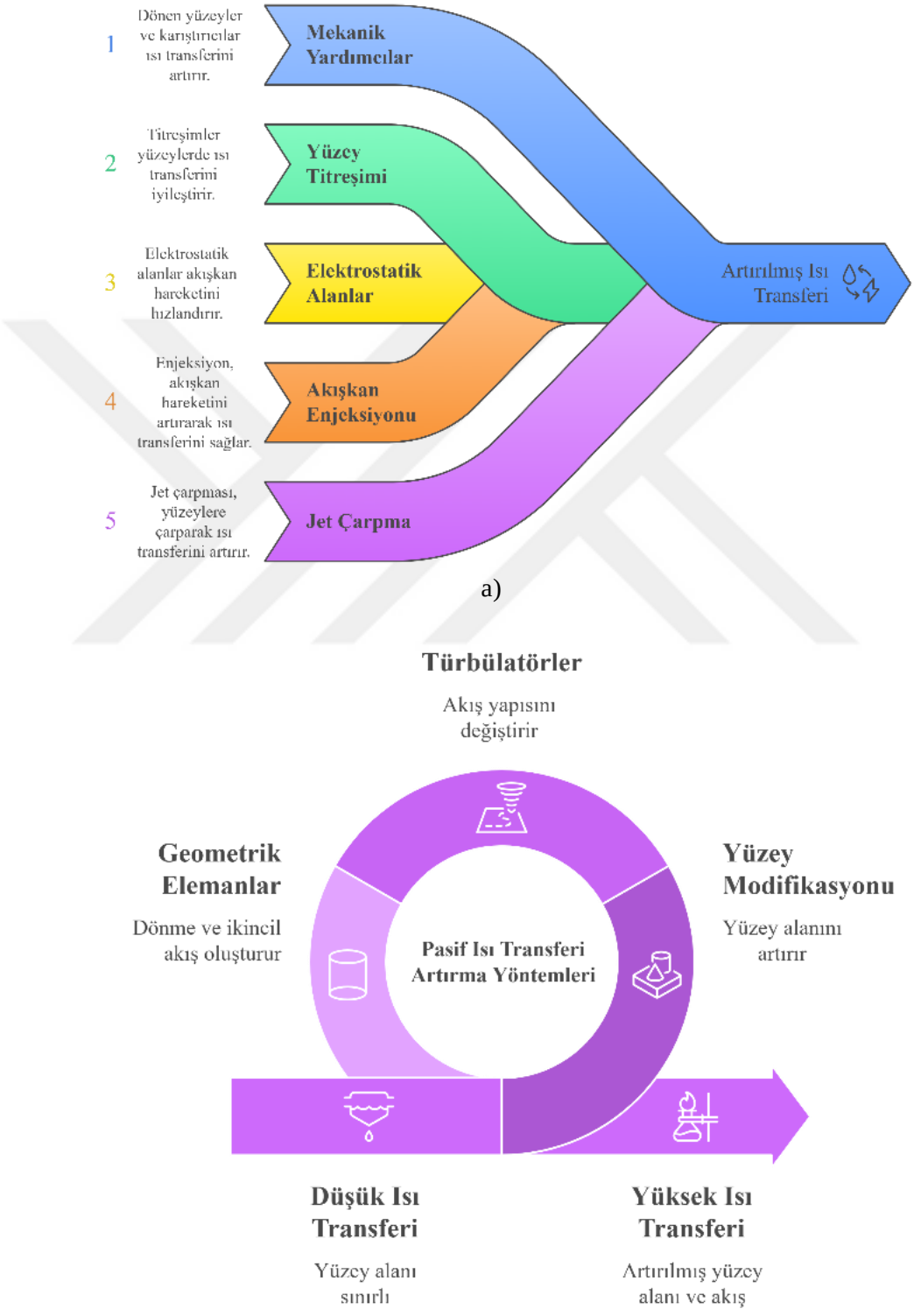


Şekil 1.1 Isı transferi artırma yöntemlerinin uygulandığı başlıca sektörler (Nawaz vd., 2025)

1.1 Isı Transferi Artırma Yöntemleri

Isı transferini artırma yöntemleri genel olarak aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır (Bhattacharyya vd., 2022). Bu sınıflandırma, ısı transfer sürecine dışarıdan enerji girdisinin gerekliliğine veya gereksizliğine bağlı olarak yapılmaktadır. Isı transferinin gerçekleştiği akışkana veya ortama ilave enerji verilmesi yoluyla ısı transfer katsayısının artırılmasını amaçlayan yöntemler aktif

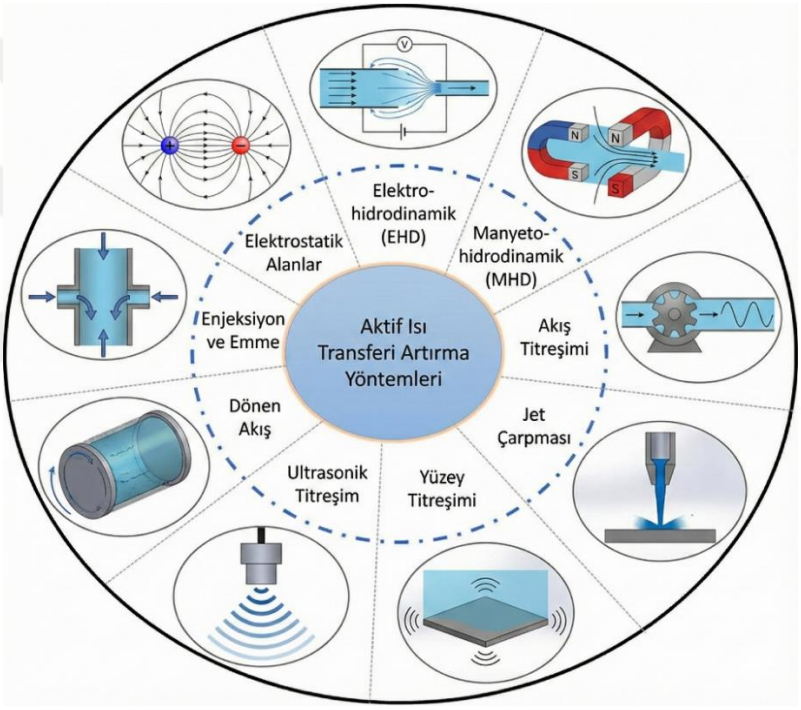
yöntemler (Shank vd., 2023), herhangi bir dış enerji girdisi olmadan ısı transfer performansını iyileştirmeyi amaçlayan yöntemler ise pasif yöntemler olarak adlandırılmaktadır (Dizaji vd., 2022). Şekil 1.2'de bu yöntemlere örnekler verilmiştir.



Şekil 1.2 a) Aktif ve b) pasif ısı transferi artırma yöntemlerine örnekler

1.1.1 Aktif Isı Transferi Artırma Yöntemleri

Isı transferini artırmak amacıyla uygulanan aktif yöntemler, ısı geçiş sürecine dışarıdan enerji girdisi sağlanarak akış ve sıcaklık alanlarının kontrol edilmesini hedefler. Bu kapsamda, çeşitli mekanik ve elektromekanik yöntemler kullanılmaktadır (Habibishandiz ve Saghir, 2022). Örneğin, mekanik yardımcı elemanların kullanılması, ısı transfer yüzeyinin döndürülmesi veya akışın mekanik elemanlarla karıştırılması gibi yaklaşımlar, akış içerisinde türbülans seviyesini artırarak konvektif ısı transfer katsayısının yükselmesine katkı sağlar (Abdollahi vd., 2024).



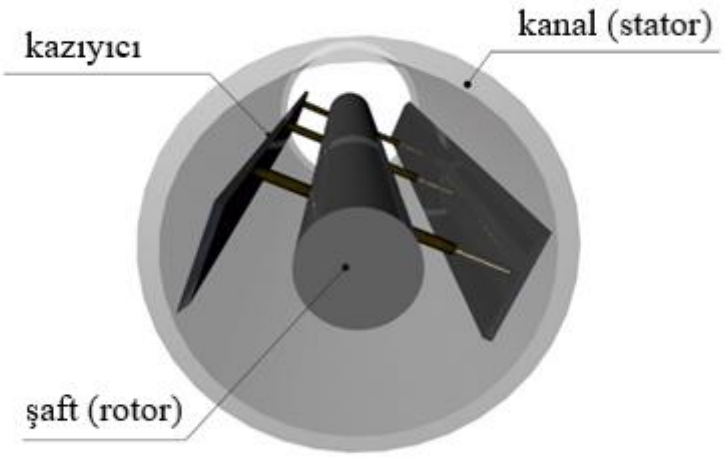
Şekil 1.3 Aktif ısı transferi artırma yöntemleri (Duan vd., 2018; Pukhovoy vd., 2021; Johari vd., 2025)

1.1.1.1 Mekanik yardımlar

Aktif ısı transferi artırma yöntemleri arasında yer alan mekanik yardımlar, akış alanına dışarıdan mekanik enerji verilerek ısı transferinin artırılmasını amaçlayan uygulamalardır. Bu yöntemlerde, akışın karıştırılması veya dönme hareketinin

oluşturulması gibi fiziksel etkilerle sınır tabaka yapısı bozulur ve türbülans seviyesi artırılır. Böylece, akışkan ile yüzey arasındaki sıcaklık gradyanı büyüyerek konvektif ısı transfer katsayısı yükselir (D'Addio vd., 2013).

Błasiak ve Pietrowicz (2019) kazınmış yüzeyli ısı eşanjörü (SSHE) kullanarak ısı transferinin iyileştirilmesi üzerine kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Kazınmış yüzeyli ısı eşanjörü (SSHE), Şekil 1.4'te gösterildiği gibi kanatların termal sınır tabakalarını sürekli olarak kesmesi nedeniyle daha iyi ısı transferi sağlayan akışkanları karıştırmak için en çok kullanılan mekanik yardımcıdır. SSHE, ilaç ve gıda endüstrisinde ısıl işlem sürecinden geçen viskoz akışkanları karıştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırma sonucunda kazıyıcı ve kanal duvarı arasındaki boşluğun ısı transfer oranında çok kritik öneme sahip olduğu ve minimum boşluk ile daha yüksek Nusselt sayısı elde edildiği tespit edilmiştir. Bu kazıyıcı bıçağın hareketi sayesinde yüksek oranda ısı transferi sağlanmıştır.



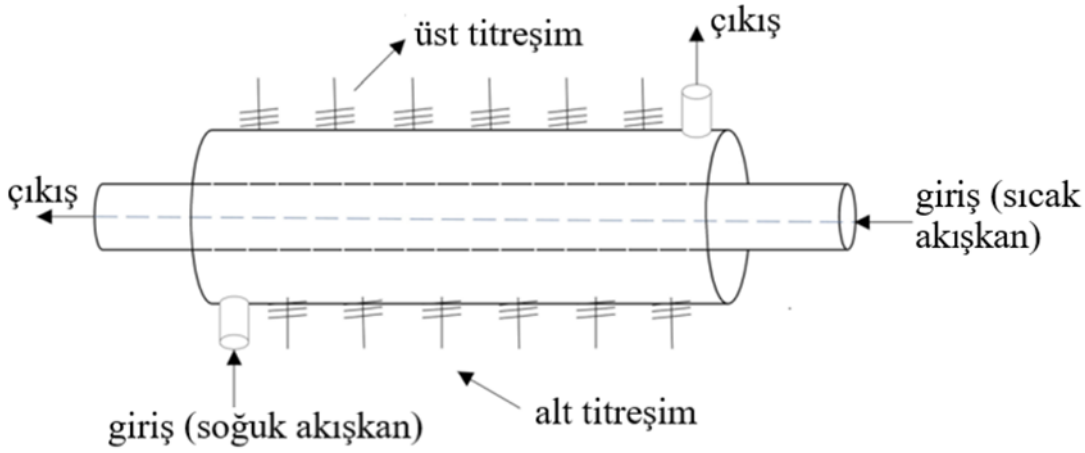
Şekil 1.4 İki kazıyıcıya sahip kazınmış yüzeyli ısı eşanjörü (Błasiak ve Pietrowicz, 2019)

1.1.1.2 Yüzey titreşimi

Yüzey titreşimi, ısı transferini artırmaya yönelik aktif yöntemler arasında öne çıkan etkili tekniklerden biridir. Bu yöntemde, ısı transfer yüzeyine uygulanan periyodik titreşimler, akış alanında türbülans seviyesini artırarak sınır tabaka kalınlığının

azalmasına ve dolayısıyla ısı transfer oranının yükselmesine neden olur. Titreşim etkisiyle akışkan içerisindeki karışımın iyileşmesi, sıcaklık gradyanının artmasına ve konvektif ısı transfer katsayısının belirgin şekilde yükselmesine katkı sağlar (Hosseinian vd., 2018).

Şekil 1.5'te gösterilen yüzey titreşimli çift borulu bir ısı değiştiricisi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bu yöntemin etkinliğini araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre ısı transfer oranı, titreşim seviyesinin artmasıyla birlikte önemli ölçüde yükselmiştir. En yüksek artış, 9 m/s² titreşim ivmesinde yaklaşık %97 oranında ısı transfer artışı olarak elde edilmiştir. Kütle akış hızındaki artış, sistemdeki titreşim etkisinin göreli katkısını azaltmış ve buna bağlı olarak titreşim katsayısında azalma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, yüzey titreşiminin özellikle düşük veya orta Reynolds sayılarında çalışan sistemlerde ısı transfer performansını artırmak için etkili bir aktif yöntem olduğunu ortaya koymaktadır (Hosseinian ve Meghdadi Isfahani, 2017).



Şekil 1.5 Yüzey titreşimi uygulanmış çift borulu ısı eşanjörü (Hosseinian ve Meghdadi Isfahani, 2017)

1.1.1.3 Akış kaynaklı titreşim

Aktif ısı transferi iyileştirme teknikleri arasında yer alan bir diğer yöntem, akış kaynaklı titreşim yöntemidir. Bu yöntem, yüzey titreşimi tekniğinden farklı olarak, ısı transferini artırmak için sisteme harici bir titreşim uygulanmasını gerektirmez. Bunun

yerine, akışkanın kendi hareketiyle sistemde doğal olarak oluşan titreşimlerden yararlanılır (Duan vd., 2022).

Literatürde gerçekleştirilen bir çalışmada, akan akışkanları taşıyan bobinlerin eğrilik merkezini değiştirerek akış kaynaklı titreşimler üretilmiştir. Bu yöntem, her bir bobinin doğal frekansını değiştirme prensibine dayanmaktadır. Araştırmacılar, farklı eğrilik merkezlerine sahip spiral bobinler kullanarak sistemde değişken doğal frekanslar oluşturmuş ve böylece akıştan kaynaklanan titreşimlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, akış kaynaklı titreşim yöntemi yalnızca ısı transfer katsayısında iyileşme sağlamakla kalmamış, aynı zamanda kirlenme faktöründe azalma açısından da önemli avantajlar sunmuştur. Özellikle, ısı eşanjörlerinin duvarlarında kireç veya tortu birikimi, ısı alışverişini sınırlayan önemli bir sorun olup, titreşimli akış sayesinde bu birikimin azaltıldığı gözlemlenmiştir (L. Cheng vd., 2009).

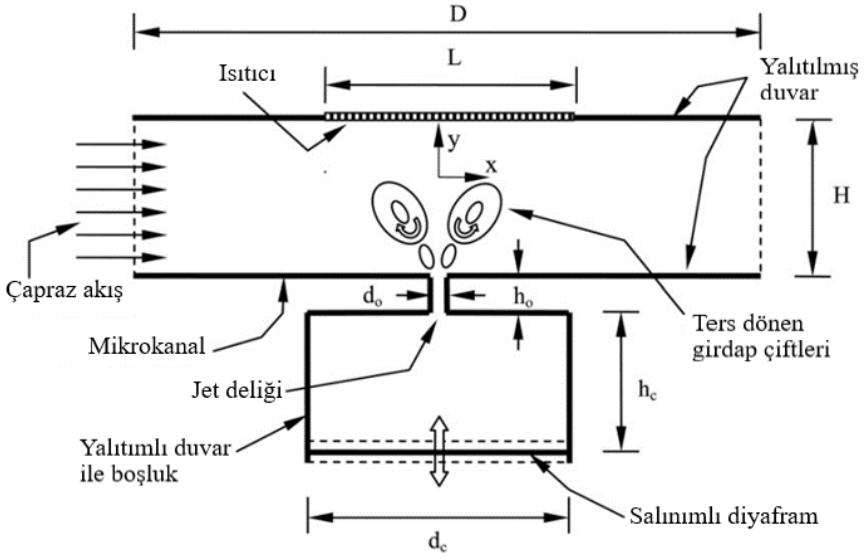
Bununla birlikte, akış kaynaklı titreşim yönteminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle yüksek titreşim frekanslarında sistem elemanlarında mekanik gerilmeler artmakta, bu da ekipmanlarda hasar oluşumuna ve işletim zorluklarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, yöntemin uygulanabilirliği titreşim genliği, frekans aralığı ve sistem dayanımı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesine bağlıdır (Yakut ve Sahin, 2004).

1.1.1.4 Jet çarpması

Mikro kanallarda ve elektronik devrelerde kullanılan mikroişlemcilerde meydana gelen ısı değişimi, sistemin güvenli çalışması açısından son derece kritik bir konudur. Bu tür sistemlerde aşırı ısı üretimi, bileşenlerin aşırı ısınmasına, dolayısıyla malzeme ömrünün kısalmasına ve performans düşüşüne neden olabilmektedir. Bu nedenle, mikro ölçekli ısı transferini artırmaya yönelik yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Gan vd., 2019). Bu kapsamda yapılan araştırmalarda, sentetik jet teknolojisinin mikrokanal ve mikro yapı sistemlerinde ısı dağılımını iyileştirmede oldukça etkili olduğu belirlenmiştir (Silva-Llanca ve Ortega, 2017). Sentetik jet; genellikle bir Helmholtz rezonatörü gibi davranan, bir akışkan boşluğu,

bu boşluğu sınırlayan esnek bir diyafram ve dar bir açıklık membranından oluşan bir cihazdır. Diyaframa uygulanan dalgalı voltaj, periyodik bir salınım hareketi oluşturarak çevredeki akışkana momentum aktarır ve böylece titreşimli bir jet akışı meydana gelir. Bu jet akışı, termal sınır tabakaya doğrudan nüfuz ederek ısı transferini önemli ölçüde artırır. Ayrıca, karmaşık borulama sistemlerine gerek duymadan mevcut yapılara entegre edilebilmesi, sentetik jetlerin mikro ölçekli soğutma uygulamaları için son derece uygun hale gelmesini sağlamaktadır (Sharma vd., 2021).

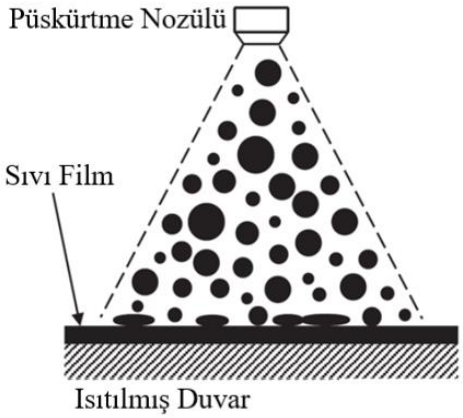
Chandratilleke vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, Şekil 1.6'da verilen titreşimli sentetik jetin mikrokanal içindeki termal performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, test edilen parametre aralıklarında sentetik jet uygulanan mikrokanalın ısı dağılımı, jet uygulanmayan kanala kıyasla yaklaşık 4,3 kat artış göstermiştir. Bu bulgu, sentetik jetlerin mikro ölçekli soğutma teknolojilerinde etkili bir aktif ısı transferi artırma yöntemi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1.6 Mikrokanala monte edilmiş sentetik jet (Chandratilleke vd., 2010)

1.1.1.5 Sprey

Sprey soğutma, özellikle kompakt boyutlu ev tipi iklimlendirme sistemlerinde ve mikro ölçekli ısı değiştiricilerde kullanılan etkili bir aktif ısı transferi artırma yöntemidir. Bu yöntemde, oda sıcaklığındaki hava ile atmosferik hava arasında gerçekleşen ısı alışverişi, mikro ölçekli yüzeyler üzerinde püskürtülen sıvı damlacıkları aracılığıyla iyileştirilir (J. L. Xie vd., 2013). Sistemdeki kompresör, sprey mekanizmasının çalışması için gerekli olan harici enerjiyi sağlar. Genellikle alüminyumdan imal edilen mikrokanalların yüzeyine suyun püskürtülmesiyle, buharlaşma yoluyla ısı reddi artırılır ve böylece sistemin genel ısı transfer performansı iyileştirilir (Yang vd., 2022). Chen vd. (2013) düz alüminyum tüplerden oluşan bir mikrokanalda, Şekil 1.7'de verilen sprey soğutmalı ısı eşanjörü üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, su spreyi debisinin artışıyla birlikte ısı reddinde belirgin bir artış gözlemlemişlerdir. Ancak bu artışın belirli bir eşik değerine kadar geçerli olduğu, bu değerin aşılması durumunda mikro buharlaşan su damlacıklarının yüzeyde sıvı bir film tabakası oluşturduğu ve bunun da akış geçiş alanını daraltarak ısı transfer verimliliğini düşürdüğü rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, sprey soğutma yönteminin düşük ve orta debi aralıklarında yüksek ısı transfer katsayısı sağladığını; ancak fazla püskürtme oranlarında film oluşumu nedeniyle ısı direncinin arttığını göstermektedir. Dolayısıyla, bu yöntemin etkinliği, sprey debisi, damlacık boyutu, yüzey özellikleri ve hava akış hızı gibi parametrelerin dikkatli şekilde optimize edilmesine bağlıdır.

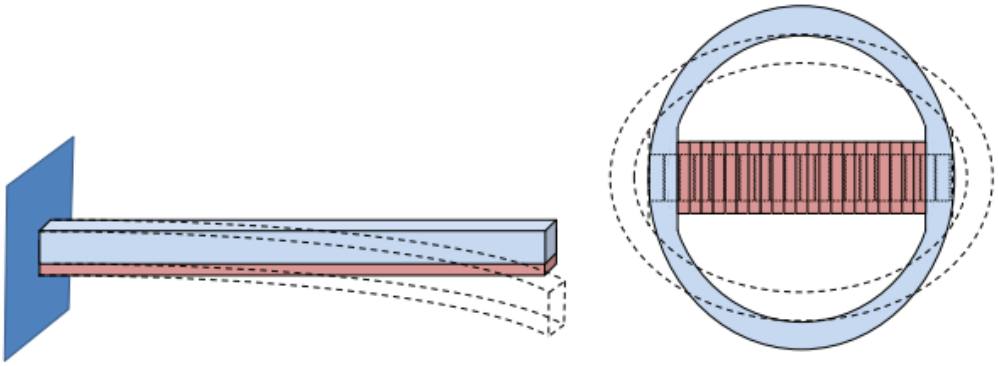


Şekil 1.7 Sprey soğutmanın ısı transfer mekanizmaları (Chen vd., 2013)

1.1.1.6 Elektroaktif malzeme

Elektroaktif malzemeler, üzerine bir elektrik alan uygulandığında boyut veya şekil değişimine uğrayan akıllı malzemelerdir. Bu sınıfın en yaygın örneği, piezoelektrik malzemelerdir. Isı transferinin geliştirilmesinde bu tür malzemeler, ters piezoelektrik etki prensibiyle kullanılır. Bu prensipte, bir elektrik alanı uygulandığında Şekil 1.8'deki verildiği gibi malzemede mekanik deformasyon oluşturulur ve bu deformasyon, akışkan ortamda mikro ölçekli hareketler meydana getirerek karışımı ve türbülans seviyesini artırır. Böylece, ısı transfer katsayısında belirgin bir iyileşme sağlanır (Kararoodi vd., 2025). Bu amaçla genellikle kurşun zirkonat titanat veya baryum titanat esaslı seramikler tercih edilmektedir; çünkü bu malzemeler yüksek elektromekanik bağlanma katsayısına sahiptir (Thapa vd., 2021).

Léal vd. (2013) piezoelektrik malzemelerin ısı eşanjörlerinde kullanımı üzerine yaptıkları çalışmalarında, duvar yer değiştirmesinin büyüklüğünün ısı eşanjörünün kompaktlığına ve akışkan karışımının etkinliğine doğrudan etki ettiğini belirtmişlerdir. Bulgular, duvarın daha büyük yer değiştirmesiyle ısı transfer veriminin arttığını göstermiştir. Sonuç olarak, elektroaktif malzemelerin kullanıldığı bu aktif yöntem, ek bir pasif iyileştirme elemanına gerek duymadan sistemin termal performansını artırabilen etkili bir tekniktir. Ayrıca, sistem tasarımına entegre edilmesi görece kolay olup, yüksek hassasiyetli mikrokanal uygulamalarında umut vadeden bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 1.8 Bükülebilir ve eliptik aktüatörler (Léal vd., 2013)

1.1.1.7 Elektrohidrodinamik

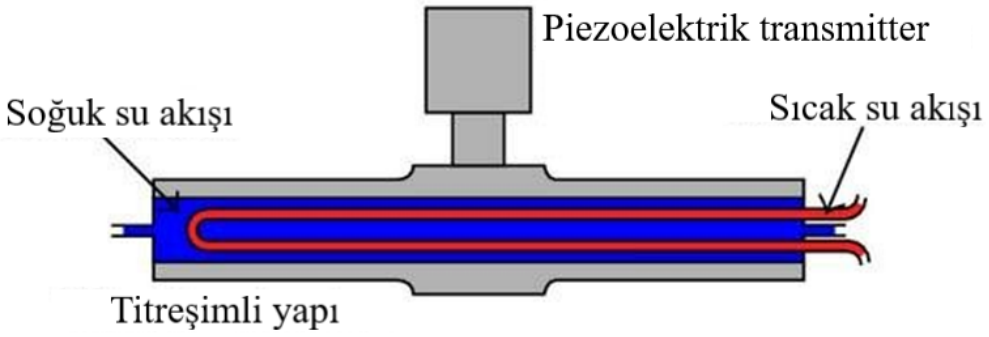
Elektrohidrodinamik (EHD) ısı transferi geliştirme yöntemi, bir dielektrik akışkan ortamına elektrik alanı uygulanması prensibine dayanır (Abadeh vd., 2018). Bu yöntemde, elektrik alanının etkisiyle akışkan içerisindeki serbest veya zayıf bağlı yükler elektrotlar arasında yönlenir ve bu hareket sonucunda akışkan karışımı artar, sınır tabaka üzerinde mikro ölçekli girdap yapıları oluşur. Bu mekanizma, ısı transfer yüzeyi ile akışkan arasındaki enerji alışverişini hızlandırarak ısı transfer katsayısında belirgin bir iyileşme sağlar (T. H. Wang vd., 2017).

Laohalertdecha vd. (2007) yaptıkları deneysel çalışmada elektrohidrodinamik yöntemin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemiş ve önemli bulgulara ulaşmıştır. Reynolds sayısı sabit tutulduğunda, elektrohidrodinamik yöntem daha düşük viskoziteye sahip akışkanlarda daha yüksek etkinlik göstermektedir. Reynolds sayısındaki artışla birlikte, EHD etkisinin azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, elektrohidrodinamik yöntemin özellikle düşük akış hızlarında ve dielektrik özellikleri belirgin akışkanlarda uygulanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu yöntem, harici mekanik ekipman gerektirmemesi ve enerji girdisinin elektriksel olarak kontrol edilebilmesi açısından, aktif ısı transferi artırma teknikleri içinde yenilikçi ve enerji verimliliği yüksek bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

1.1.1.8 Ultrasonik titreşim

Ultrasonik dalgaların kullanılmasıyla akışkan içerisinde titreşim oluşturulması, özellikle boru ve kanallarda akışın daha etkin bir biçimde karıştırılması için geliştirilen önemli aktif ısı transferi iyileştirme tekniklerinden biridir (D. Zhang vd., 2020). Şekil 1.9'da gösterildiği üzere ultrasonik dalgalar, akışkan hacmi boyunca yüksek frekanslı titreşim alanları yaratarak sınır tabaka davranışını doğrudan etkilemekte ve ısı transferini artırmaktadır. Bu yöntemin temel prensibi, akustik dalgaların akışkan içindeki hız dağılımını bozarak karıştırmayı artırması, böylece konvektif ısı transferi katsayısının iyileştirilmesidir (Setareh vd., 2019).

Legay vd. (2012) ultrasonik titreşimlerin akışkan-akışkan tipi ısı eşanjörlerinde neden son derece etkili olduğunu detaylı olarak incelemiştir. Araştırmacılara göre, ultrasonik dalgalar boru içerisindeki hız vektörlerini daha homojen hâle getirerek akış bölgesinde daha düzgün bir hız profili oluşturur. Bu durum, sınır tabakanın incelmesine ve ısı transfer direncinin azalmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Ayrıca akustik dalgaların neden olduğu mikro ölçekli akış hareketleri, akışkan yüzey gerilimini azaltmakta ve yüzeyle etkileşimi artırmaktadır.



Şekil 1.9 Ultrasonik titreşim uygulanmış kabuk ve borulu ısı eşanjörü (Legay vd., 2012)

Çeşitli araştırmacılar tarafından ısı değiştiricileri ve benzer termal sistemlerde kullanılan aktif ısı transferi iyileştirme yöntemlerine ilişkin yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda aşağıdaki genel değerlendirmeler ortaya konulmuştur:

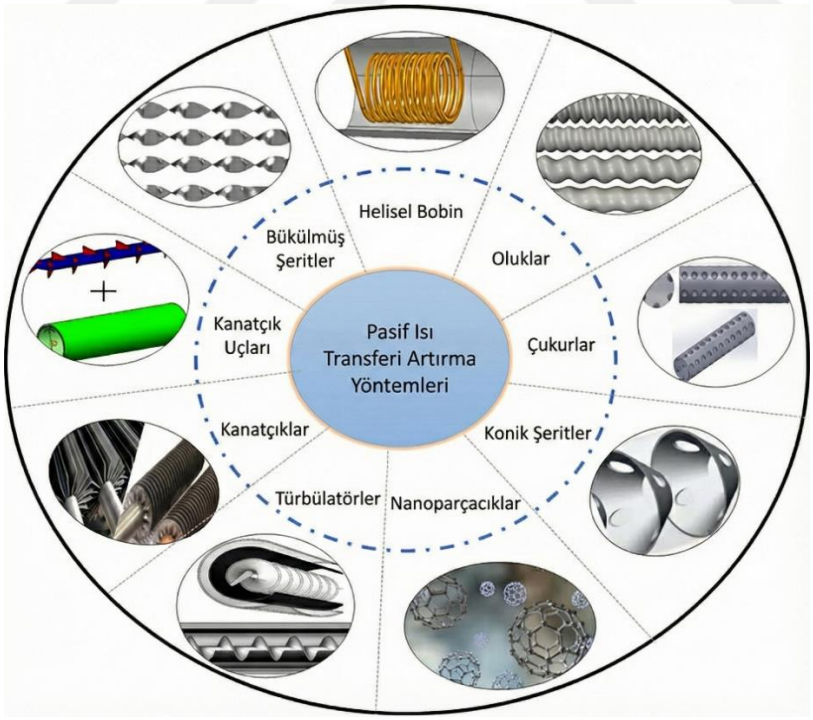
- Aktif yöntemlerde harici güç gereksinimi belirgindir. Bu teknikler, iyileştirmenin etkin bir şekilde sağlanabilmesi için akış düzenleme mekanizmaları, elektriksel güç beslemeleri, ultrasonik dalga yoğunluğu gibi çeşitli parametrelerin kontrol edilmesini veya optimize edilmesini gerektirir. Dolayısıyla sistemin performansı doğrudan doğruya bu parametrelerin doğru şekilde ayarlanmasına bağlıdır.

- Aktif yöntemler, ısı transferini artırırken sürtünme faktöründe istenmeyen artışlara yol açabilir. Ancak aktif yöntemlerin esnek parametre ayarlama imkânı, pasif tekniklerde sınırlayıcı bir unsur olan sürtünme faktöründeki artışı minimize ederek istenen iyileştirmeyi sağlama açısından önemli bir avantaj sunar.

- Manyetik ve elektroaktif malzemeler hem aktif hem de pasif tekniklerle entegre edilebildikleri için gelecekteki çalışmalar açısından oldukça umut vadedicidir. Bu malzemelerin akışkan karışımını iyileştirme, ısı transfer katsayısını artırma ve kirlenmeyi azaltma gibi çok yönlü etkileri literatürde giderek daha fazla dikkat çekmektedir.

1.1.2 Pasif Yöntemler

Isı transfer yüzeylerinin işlenmesi yoluyla gerçekleştirilen yüzey kaplama, yüzey modifikasyonu, pürüzlendirme veya yüzey üzerinde ek çıkıntılar oluşturma gibi uygulamalar, pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerine verilen en karakteristik örneklerdir (Ajarostaghi vd., 2022). Bu tür uygulamalarda temel amaç, yüzey alanını artırarak veya akış yapısını değiştirerek ısı transfer mekanizmasını harici enerji gerektirmeden geliştirmektir. Nitekim yüzey alanının büyütülmesi, neredeyse tüm ısı değiştiricilerinde yaygın olarak kullanılan en temel pasif iyileştirme yaklaşımıdır (C. vd., 2022).



Şekil 1.10 Pasif ısı transferi artırma yöntemleri (Bhattacharyya vd., 2022; Alqaed vd., 2024; Khan vd., 2025)

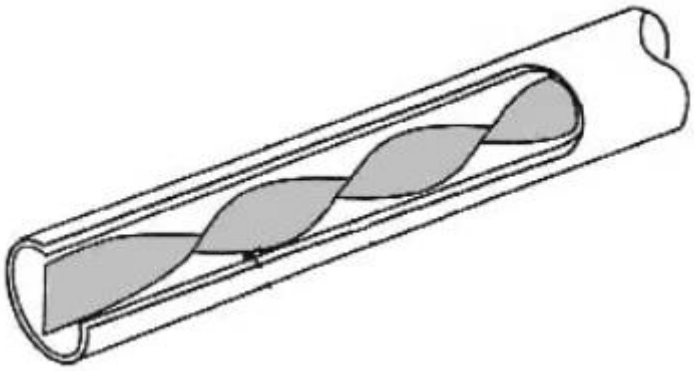
Kanatçıklı yüzeyler veya sabit yönlendirici kanatlar, geçmişte yüzey alanını artırmak için sıklıkla tercih edilmesine rağmen; imalat süreçlerinin karmaşıklığı, yüksek üretim maliyetleri, ısı değiştiricisi boyutlarını artırmaları ve özellikle bakım-onarım işlemlerinde oluşturdukları zorluklar nedeniyle son yıllarda kullanım oranlarını kayda değer şekilde azaltmıştır (Sayed Ahmed vd., 2015). Bu yapıların yerini, daha düşük maliyetli, bakım kolaylığı sunan ve sistem içerisinden kolaylıkla çıkarılıp takılabilen türbülatörler almaya başlamıştır. Bu tür türbülatörler, akış alanı içerisinde türbülansı artırarak sınır tabaka yapısını bozmakta ve böylece ısı transfer katsayısında önemli iyileşmeler sağlamaktadır (Pourahmad vd., 2021).

Zorlanmış taşınım koşullarında dönme ve ikincil akışların oluşturulması amacıyla borular içerisine yerleştirilen çok çeşitli geometrik elemanlar pasif yöntemlere önemli örnekler sunmaktadır. Bunlar arasında; boru içi parçalar, helisel biçimde bükülmüş borular, giriş bölgesine yerleştirilen girdap üreticileri, bükümlü bantlar, vida tipi döndürücüler, sarımlı tel elemanlar, yönlendirici kanatlar ve akış enerjisi ile kendi kendine dönen minyatür pervaneler sayılabilir (Shelare vd., 2022). Bu elemanlar akış alanında karışımı artırarak hem akışın daha homojen bir şekilde ilerlemesini sağlar hem de sınır tabakanın sürekli yenilenmesini mümkün kılarak ısı transferini uygulanan enerji girişi olmadan artırır (Farnam vd., 2018).

1.1.2.1 Girdap üreteçleri

Girdap üreteçleri, son birkaç on yılda ısı transferini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan etkili pasif yöntemlerden biri hâline gelmiştir (Y. Luo vd., 2025). Özellikle kompakt ısı eşanjörlerinde, cihaz boyutlarının küçültülmesi ve maliyetlerin azaltılması hedeflendiğinde en çok tercih edilen iyileştirme elemanları arasında yer almaktadır. Bu amaç doğrultusunda bükümlü bantlar, farklı büküm oranlarında, farklı büküm yönlerinde, tam veya kısmi uzunluklarda, delikli veya kesikli formlarda ve geçmeli ya da gevşek montaj yapılabilen çeşitli konfigürasyonlarda uygulanmaktadır. Bu çeşitlilik, akış yapısının kontrol edilmesinde ve istenilen türbülans seviyesinin elde edilmesinde önemli esneklik sağlamaktadır (Chaurasiya vd., 2024).

Saha vd. (2001), tam uzunlukta bükümlü bantların yerine, Şekil 1.11'de verilen belirli aralıklarla yerleştirilmiş bükümlü bantların kullanıldığı alternatif bir yaklaşımı deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında büküm oranı, bantlar arasındaki boşluk oranı, bant genişliği ve faz açısının ısı transferi üzerindeki etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, bant genişliğinin azaltılmasının ısı transferi performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Bunun yanı sıra faz açısının sıfırdan büyük değerlerde kullanılmasının ısı transferinde kayda değer bir iyileşme sağlamadığı, aksine üretim süreçlerini daha karmaşık hâle getirdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, girdap üreteçlerinin geometrik tasarımının ısı transferi performansı üzerinde kritik öneme sahip olduğunu ve optimum geometrik parametrelerin belirlenmesinin sistem verimliliği açısından gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

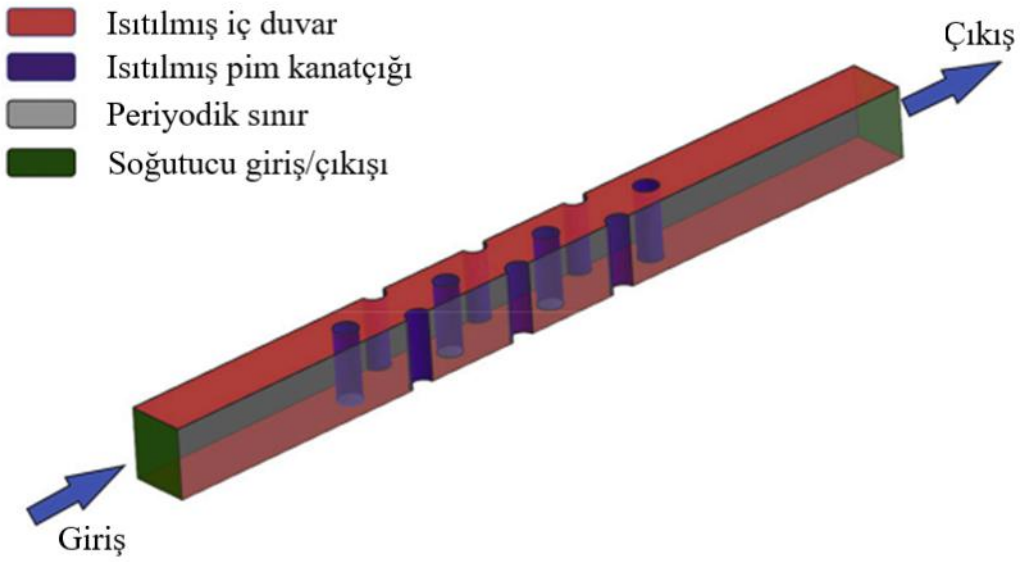


Şekil 1.11 Bükülmüş girdap üreteci içeren dairesel kanal (Saha vd., 2001)

1.1.2.2 Kanatçık yapıları

Kanatçıklar, dikdörtgen, delta ve V biçimli elemanlar ile akış alanına doğru bükülebilen delikli kanatçıklar gibi çeşitli şekil ve geometrik konfigürasyonlarda tasarlanabilmektedir (Islam vd., 2025). Bu tür kanatçıklar, akış alanında ikincil akışlar ve türbülans yapıları oluşturarak ısı ve kütle transferinin iyileştirilmesine katkı sağlar. Söz konusu geometrik düzenlemeler; ısı eşanjörleri, vorteks yakıcılar ve güneş enerjili hava kanalları gibi birçok mühendislik uygulamasında performans artırıcı pasif teknikler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Saenpong vd., 2025).

Zhang vd. (2012), çift borulu bir ısı eşanjörünün kabuk tarafında sarmal kanatçık ve girdap üreteci kullanımının ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada iç boruya Şekil 1.12'deki gibi helisel kanatçık, delta kanatlı helisel kanatçık ve helisel kanatçığa ek olarak dikdörtgen kanatçık yerleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, helisel kanatçık üzerine eklenen kanat yapılarının ısı transferini belirgin ölçüde artırdığını; özellikle delta kanatlı helisel kanatçıkların, basınç düşüşünde %51–122 arasında değişen bir artışa rağmen, yalnızca helisel kanatçığa kıyasla ısı transferini %35–46 oranında iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca sonuçlar, birim girdap üreteci başına en yüksek ısı transferi artışının delta kanatlı konfigürasyonlarda elde edildiğini; bunu sırasıyla delta kanatçık çifti, dikdörtgen kanatçıklar ve yalnızca dikdörtgen kanatlı yapıların izlediğini göstermiştir.

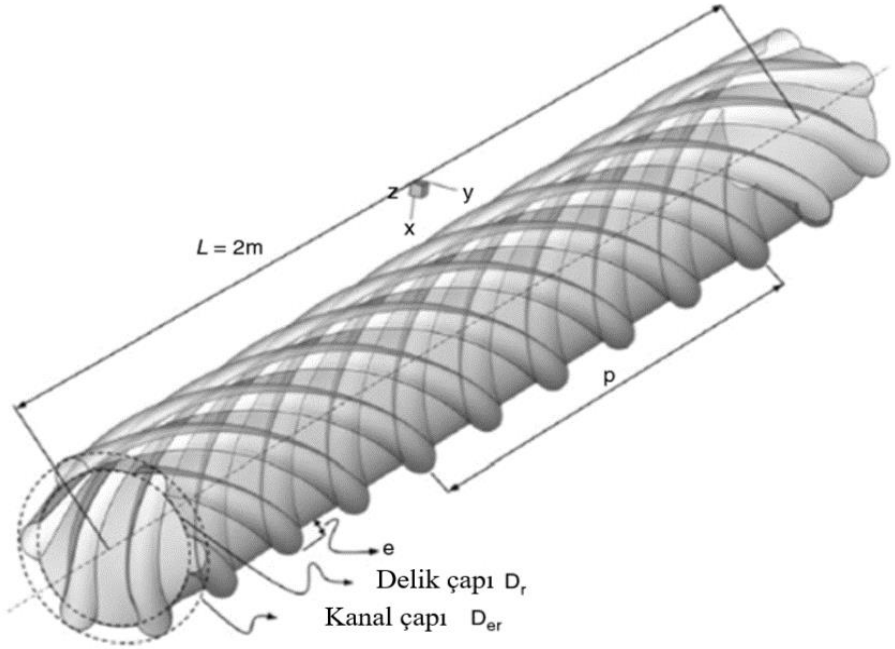


Şekil 1.12 Kanal içine yerleştirilmiş silindirik kanatçık yapıları (Zhang vd., 2012)

1.1.2.3 İşlenmiş yüzeyler

Son yıllarda pürüzlü, oluklu veya nervürlü yüzeylerin kullanımı, farklı ısı değiştirici sistemleri için en etkili pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (R. Kumar ve Premachandran, 2024). Bu yüzey modifikasyonları, akış alanında türbülans düzeyini artırarak veya sınır tabakayı bozarak ısı transfer mekanizmalarının güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Elshafei vd. (2010), Şekil 1.13'te verilen oluklu kanallar içerisindeki akışın konvektif ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma, sabit oluk oranı ve uniform duvar sıcaklığı koşullarında, Reynolds sayısının 3220–9420 aralığında değiştiği kanallar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada özellikle oluk aralığı ve faz kayması parametrelerinin ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, oluklu kanal geometrisinin belirgin bir ısı transferi artışı sağladığını, ancak bunun aynı zamanda kayda değer bir basınç düşüşü artışı ile birlikte gerçekleştiğini göstermiştir. Ortalama ısı transfer katsayısının, paralel plaka kanalına kıyasla oluk aralığı ve faz kaymasına bağlı olarak yaklaşık 2,6–3,2 kat arttığı; basınç düşüşünün ise benzer şekilde 1,9–2,6 kat yükseldiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, oluklu kanalların ısı transferi iyileştirme potansiyelinin yüksek olduğunu, ancak hidrodinamik cezanın tasarım sürecinde dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



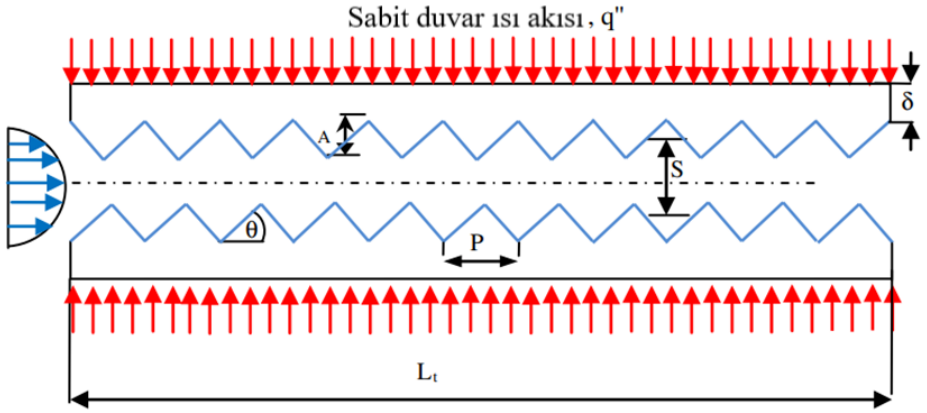
Şekil 1.13 İç yüzeyi işlenmiş kanal yapısı (Elshafei vd., 2010)

1.1.2.4 Genişletilmiş yüzeyler

Genişletilmiş yüzeyler, ısı transfer yüzey alanını artırarak konvektif ısı transfer katsayısının düşük olduğu akışlarda toplam ısı transfer oranını yükseltmek amacıyla kullanılan en yaygın pasif iyileştirme elemanlarıdır (M. S. Kumar ve Abraham, 2025).

Kanatçıklar; düz, delikli, oluklu, V-şekilli, delta-kanatlı, pin-fin veya üç boyutlu nervürlü yüzeyler gibi farklı kesit ve geometrilerde üretilebilmekte olup, yüzey alanını genişletmenin yanı sıra türbülans yoğunluğunu artırma, sınır tabaka gelişimini bozma ve ikincil akış yapıları oluşturarak ısı transfer mekanizmasını güçlendirme gibi çok yönlü etkilere sahiptir (Mahdavi vd., 2024). Bu nedenle genişletilmiş yüzeyler, özellikle yüksek ısıl yük altında çalışan türbin kanatları, elektronik soğutma modülleri, kompakt ısı eşanjörleri ve rejeneratif soğutma sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır (Bashir ve Ali, 2025).

Kumar ve Amano (2014), gaz türbini kanadının soğutma kanalında ısı transferi performansını artırmak amacıyla Şekil 1.14'te örneği verilen V-nervür ve kırık V-nervür konfigürasyonlarının etkisini araştırmıştır. Çalışmada, her biri dört adet 60° V-nervür ve 60° kırık V-nervür içeren, iki geçişli kare kesitli bir soğutma kanalı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, kırık V-nervür konfigürasyonunun toplam ısı transfer performansı açısından klasik V-nervüre göre belirgin şekilde üstün olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, kırık V-nervürlü yapının toplam soğutma performansının V-nervürlü yapıya kıyasla yaklaşık %50 daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Bu bulgular, geometrik modifikasyonlara dayalı yüzey geliştirme tekniklerinin, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında ısı transferi etkinliğini artırmada önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 1.14 V şekilli iç yüzey alanına sahip kanal (Kumar ve Amano, 2014)

1.1.2.5 Kanal Geometrisi

Kanal geometrisinin değiştirilmesi örneğin kanalın bükülmesi, kesit şeklinin kare, eliptik, üçgen gibi farklı formlara dönüştürülmesi veya kanalın spiral hale getirilmesi pasif ısı transferi geliştirme yöntemleri arasında en etkili stratejilerden biridir. Çünkü kanal geometrisindeki değişiklikler, akış alanının yapısını doğrudan etkileyerek sınır tabakasının davranışını kontrol eder (Al-Obaidi, 2025). Bükülmüş veya kıvrımlı kanallarda akış, eğrilik etkisiyle merkezkaç kuvvetine maruz kalır ve bunun sonucu olarak Dean vorteksleri adı verilen ikincil akış yapıları gelişir. Bu vorteksler, akışkanın ana akış doğrultusuna dik yönde döngüsel hareket oluşturur. Böylece duvar yakınındaki düşük enerjili akışkan çekilip ana akışa karışır, sınır tabakası incelir, karışım ve momentum transferi artar (Fares vd., 2024). Bu süreç, doğal olarak Nusselt sayısında artışa, dolayısıyla da daha yüksek ısı transfer katsayısına yol açar. Kanal geometrisinin kesit şekli de bu fenomeni belirgin şekilde etkiler. Örneğin, kare kanal köşe bölgelerinde yüksek hız gradyanı ve daha kuvvetli ikincil akış üretir, eliptik kanal, aerodinamik yapısı nedeniyle daha düşük basınç kaybı oluştururken daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar, bükülmüş kare kanal, köşe etkisi ve bükülme etkisi birlikte çalıştığı için çok kuvvetli vorteks yapıları üretir. Bu nedenle kanal geometrisinin optimize edilmesi, pasif ısı transferi iyileştirme teknikleri arasında hem verimli hem de enerji maliyeti düşük bir yöntem olarak kabul edilir (Dabestani ve Kahani, 2024).



Şekil 1.15 Geometrisi değiştirilmiş kanallar

1.1.2.6 Nanoakışkan kullanımı

Nanoakışkanlar, klasik akışkanlara kıyasla çok daha yüksek ısı transfer katsayısı sağlayarak pasif ısı transferi geliştirme yöntemleri arasında önemli bir yer edinmiştir. Bunun en büyük nedeni, nano ölçekteki parçacıkların akışkanın termofiziksel özelliklerini direnç oluşturmadan geliştirmesidir (Gürdal vd., 2023). Geometrik değişiklikler veya türbülatörler gibi diğer pasif yöntemler akış alanını değiştirerek iyileştirme sağlarken, nanoakışkanlar doğrudan akışkanın kendisini termal olarak daha iletken hale getirir. Bu yönüyle, nanoakışkanlar sistem tasarımına minimum müdahale gerektirir ve ısı taşıyıcı akışkanın performansının iyileştirilmesini hedefleyen optimize edilebilir bir strateji sunar (Gürdal vd., 2022).

Isı transferindeki iyileşme, özellikle laminer rejimde daha belirgindir çünkü nano boyutlu parçacıkların Brownian hareketi, düşük Reynolds koşullarında sınır tabakasına daha fazla etki eder (Thabet vd., 2025). Türbülanslı akışta da iyileşme sürse de etkisi daha sınırlıdır; bununla birlikte türbülanslı akışlarda parçacıkların türbülans kinetik enerjisi ile etkileşimi ısı transferine ek katkı sağlayabilir (Banihashemi vd., 2024). Nanoakışkanlar, harici enerji gerektirmeyen, sistem geometrisini değiştirmeyen ancak akışkanın fiziksel özelliklerini iyileştiren etkili ve modern bir pasif ısı transferi geliştirme yöntemidir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Isı transfer cihazları birçok endüstriyel ve evsel uygulamada ısının dönüştürülmesi ve geri kazanılması için kullanılmaktadır. Bazı örnekler arasında enerji santrallerinde sıvının kaynatılması ve buharın yoğunlaşması, ilaç ve kimya endüstrilerinde yer alan termal işlemler, gıda endüstrilerinde sütün hassas şekilde ısıtılması ve soğutulması, konsantre güneş kolektöründe sıvının ısıtılması ve elektrikli makinelerin ve elektronik cihazların soğutulması sayılabilir. Bu nedenle, bir ısı transfer cihazının performansının arttırılması, enerji, malzeme ve maliyet tasarrufuyla sonuçlanabileceğinden büyük ilgi görmektedir.

Sparrow vd. (1967) dikdörtgen kanalların hidrodinamik giriş bölgesindeki laminer hız ve basınç alanlarının gelişimi deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmada en-boy oranları 5:1 ve 2:1 olan kanal kesitleri kullanılmış ve çalışma akışkanı olarak hava seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda basınç alanı gelişiminin hız alanının gelişiminden çok daha hızlı olduğu bulunmuştur. Hız alanının eksenel gelişimi, kesitin simetri çizgileri boyunca ölçülen bir dizi hız profili ile gösterilmiştir. 5:1 kanalındaki akış gelişiminin 2:1 kanalındakinden biraz daha hızlı olduğu görülmüştür.

Nandakumar ve Masliyah (1983) en-boy oranı iki olan bükülmüş bir dikdörtgen borudaki akışkan akışı ve ısı transferi özellikleri, momentum ve enerji denklemlerinin sayısal çözümü kullanarak incelemiştir. Akışkan akışı çözümleri, Newton akışkanının tam gelişmiş laminer akışı için sunulmuştur. Isı transferi sonuçları eksenel üniform duvar sıcaklığı durumu için sunulmuştur. Çevresel olarak düzgün duvar sıcaklığı durumu için, bükülmüş dikdörtgen bir borudaki toplam Nusselt sayısının, belirli bükülme uzunlukları aralıklarında düz bir borudan yüzde 30'a kadar daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Levy vd. (1986) dönen ısıtmalı dikdörtgen bir kanaldaki laminer hava akışında basınç düşüşü ve ısı transferi üzerine deneysel sonuçlar elde etmiştir. Test kanalı 2'ye 1 en-boy oranına sahipti ve rotor eksenine paraleldi. Laminer ısı transferi ve basınç düşüşü dönüşten güçlü bir şekilde etkilenmekte ve Grashof sayısının 103'ü aşan değerleri için artmaya başlamaktadır.

Egner ve Burmeister (2005) en-boy oranı 1, 4 ve 8 olan dikdörtgen kesitli üç boyutlu spiral kanallarda laminer akış ve ısı transferini FLUENT hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak belirlemiştir. Çevresel ortalama Nusselt sayısı, girişten uzaklığın ve Dean sayısının bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Dikdörtgen kesitli bir spiral kanal için tam gelişmiş, çevresel olarak ortalaması alınmış Nusselt sayısı, sabit yarıçaplı bir helisel kanalın değerlerinden %5-15 daha yüksek bulunmuştur.

Xing vd. (2013) yaptığı çalışmada en-boy oranının dikdörtgen kanaldaki tek fazlı laminer akış direnci üzerindeki etkileri, duvar kayma gerilmesinin analizi yoluyla teorik olarak incelenmiştir. Sonuçlar, Poiseuille sayısının en-boy oranı azaldıkça arttığını göstermektedir ve geniş kenardan kaynaklanan yüzey sürtünmesinin toplam sürtünme direncine katkısı, en-boy oranının azalmasıyla belirgin bir şekilde artmaktadır.

Kim (2016) mikrokanallarda akışkan akışı ve ısı transferi özelliklerini tahmin etmek için geleneksel boyutlu kanallara dayanan teorik korelasyonların geçerliliğini araştırmak için ampirik bir çalışma yapmıştır. Hidrolik çapları 155-580 μm ve en-boy oranları 0.25-3.8 olan 10 farklı dikdörtgen mikrokanaldan 30 ila 2500 arasında değişen Reynolds sayılarında laminer akışın akış direnci ve termal davranışı incelemiştir. Çalışmaya göre Re<180'de deneysel Nusselt sayıları teorik değerlerden düşük çıkmıştır ve Reynolds sayısının artmasıyla birlikte Nusselt sayısı da hızla artmıştır.

Mohit ve Gupta (2022) pim kanatçıklı bir mikro kanaldaki termal ve akış özelliklerini araştırmak için sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Kanat yüksekliğindeki değişimin termo-hidrolik performans üzerindeki etkisi, kanat yüksekliğinin 0,2 mm'den 1 mm'ye ve Reynolds sayılarının 200'den 1000'e değiştiği ve kanalın tabanına sabit ısı akısı uygulandığı durumlarda değerlendirilmiştir. Genel olarak, ısı transferinin kanat yüksekliği ve Reynolds sayısındaki artışla önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.

Gravndyan vd. (2017) bu çalışmada, girintili bir mikrokanalda laminer akış ve ısı transferinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği incelemiştir. Çalışma sıvısı olarak Su/TiO_2 nanoakışkanı kullanılmıştır. Geometri, L = 6,3 mm uzunluğunda ve H = 70

μm yüksekliğinde iki boyutlu dikdörtgen bir mikrokanaldır. Araştırma sonuçları, TiO_2 nanopartiküllerinin artmasının ısı transferi, sürtünme faktörü ve performans değerlendirme kriteri ve basınç düşüşünün artmasına neden olduğunu göstermektedir.

Osman vd. (2019) tek adımda hazırlanan alümina-su nanoakışkanının konvektif ısı transferi incelemiştir. Test kanalı olarak düzgün ısıtılmış dikdörtgen bir kanal kullanılmıştır. Hacim konsantrasyonları 0,3, 0,5 ve %1 olan nanoakışkanlar kullanılmış ve laminer ve türbülanslı akışların yanı sıra laminerden türbülanslı akışa geçiş rejimini de içeren 200-7000 Reynolds sayısı aralığı dikkate alınmıştır. Sonuçlar, kullanılan nanoakışkanlar için ısı transfer katsayılarının arttığını göstermiştir. %1,0 nanoakışkan, geçişli akış rejiminde %54 ve türbülanslı rejimde %11 değerleriyle en yüksek artışı göstermiştir.

Rahmati vd. (2018), Newtonyen olmayan nanoakışkanın iki boyutlu bir mikrotüp içindeki laminer ve zorlanmış akışını sayısal olarak simüle etmiştir. Bu araştırmada, ısı transfer hızını arttırmak için, söz konusu Newtonyen olmayan akışkan, CuO nanoparçacıklarının %1 ve %1,5 hacim oranları ile birleştirilerek Newtonyen olmayan soğutucu nanoakışkan oluşturulmuştur. Bu araştırma 100, 500, 1500 ve 2000 Reynolds sayılarında incelenmiştir. Sonuçlar, katı nanoparçacıkların hacim oranının ve kayma hızı katsayısının artmasının ısı transferinin artmasına neden olduğunu göstermektedir.

Vatanparast vd. (2020) kademeli yarı gözenekli kanatlara sahip kısmen ısıtılmış kanal içinde zorlanmış konveksiyon nedeniyle toplam entropi üretimini incelemek için sayısal bir araştırma yapmıştır. Hacim-ortalama yöntemine dayanan yönetim denklemlerini çözmek için bir sonlu hacim yöntemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, Reynolds sayısının Re = 100'e yükseltilmesinin Re = 50'ye kıyasla yaklaşık %44 daha fazla toplam entropi üretimine yol açtığını ortaya koymuştur.

Zontul vd. (2021) dikdörtgen yivli üst ve alt duvarlara sahip bir kanaldaki taşınımsal ısı transferi ve akış karakteristikleri için deneysel ve sayısal bir araştırma yapmıştır. Çalışma 2 × 103 ve 6.5 × 103 Reynolds sayıları arasında gerçekleştirilmiştir. Isı transferi deneyleri, kanal üst ve alt duvarlarına sabit ısı akısı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, düz kanallar yerine oluklu kanallar kullanılarak 1,9-

2,4 kat daha büyük Nu değerleri elde edilmiştir. Basınç ölçümleri, oluklu kanalın basınç kaybında artışa neden olduğunu göstermektedir.

Taskesen vd. (2021) bu çalışmada, 16 mm hidrolik çapa ve 1,5 m uzunluğa sahip çeşitli kanal geometrilerinde nanoakışkan akışının laminer akış koşulu altında zorlanmış taşınımı sayısal olarak incelenmiştir. Kanalların yüzeylerine 6 kW/m^2 sabit ısı akısı uygulanmıştır. Analizlerde temel akışkanın konvektif ısı transferini arttırmak için Fe_3O_4/Su nanoakışkanı kullanılmıştır. Analizler, silindirik, kare, dikdörtgen ve üçgen kesitli kanal geometrilerinde $500 \leq Re \leq 2000$ arasındaki Reynolds sayıları ve %1 ile %5 arasındaki nanopartikül hacim konsantrasyonları için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, nanoakışkanın temel akışkana göre daha fazla konvektif ısı transferi artışı sağladığını ve silindirik kesitli kanalın diğer kesitli kanal geometrileri arasında en iyi ısı transferi performansını verdiğini göstermektedir.

Uysal vd. (2016) ZnO-Etilen glikol (EG) nanoakışkanının farklı en-boy oranlarına (α=1 ila 2) sahip dikdörtgen mikrokanallar boyunca akışkan akışı ve ısı transferi özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. ZnO-EG nanoakışkanın farklı nanoparçacık hacim yüzdeleri (φ=%1 ila %4) kullanılmıştır. Akış, tek fazlı, üç boyutlu, kararlı durum, sıkıştırılamaz, termal olarak gelişen, laminer akış koşulları altında ele alınmıştır. Sonuç olarak, en boy oranı değeri 1 olan mikrokanal en yüksek konveksiyon ısı transfer katsayısına ve en düşük basınç düşüşüne sahiptir. Ayrıca, nanoakışkanın nanoparçacık hacim oranı değerinin artmasıyla konveksiyon ısı transfer katsayısının ve basınç düşüşünün arttığı gözlemlenmiştir.

Bhadouriya vd. (2015) bükülmüş kare kanal içindeki hava akışının ısı transferi ve sürtünme faktörü özellikleri deneysel olarak ve üç boyutlu sayısal simülasyonlar aracılığıyla incelemiştir. Deneyler, üniform duvar sıcaklığı sınır koşuluna, 11,5 ve 16,5 büküm oranına ve 600-70.000 Reynolds sayısına sahip hava için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 9500 Reynolds sayısına kadar hem laminer hem de türbülanslı akış rejimlerinde ısı transferi ve basınç düşüşünde önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Büküm oranı 11,5, düz kare kanala kıyasla nispeten daha yüksek ısı transferi ve basınç düşüşü göstermektedir.

Saha vd. (2022) düzgün ısı akısı altında, Reynolds sayısı, en-boy oranı, farklı türde temel akışkanlar, nano-parçacıklar ve nano-parçacıkların çap değişimleri ile bir bölme-oluklu (düzlem, trapez, ikizkenar ve yarım daire) dikdörtgen mikro kanal boyunca laminer nano-akışkan akışının termofiziksel özelliklerini araştırmak için ayrıntılı bir sayısal çalışma yapmıştır. Yönetici denklemleri çözmek için sonlu hacim yöntemi kullanılmış ve simülasyonları çözmek için Fluent yazılımı kullanılmıştır. Mevcut çalışmadan, yarım dairesel bölme-oluk şeklinin tüm bölme-oluk şekilleri arasında en yüksek Nusselt sayısını sağladığı bulunmuştur.

Manglik vd. (2013) yaptığı çalışmada düşük Reynolds sayılı tam gelişmiş girdap akışları, eksenleri boyunca helisel olarak bükülmüş dikdörtgen kanallar boyunca ele alınmıştır. Hesaplamalı modelleme ve simülasyon sonuçlarına dayanarak, akış hızının ($10 \leq Re \leq 1000$) ve kanal geometrisinin girdap akışı oluşumu ve bunun sonucunda ısı transferi ve sürtünme kayıpları üzerindeki parametrik etkileri tartışılmaktadır. Helisel olarak bükülmüş kanal yüzey eğriliğinin yanal akışkan sirkülasyonuna neden olduğu ve bunun da kanalın çekirdeğinde eksenel helisel girdap oluşumuna yol açtığı bulunmuştur.

Falih vd. (2024) çukur yapılı borularda ısı transferinin düşük olduğu bölgelerdeki performansı iyileştirmek amacıyla, farklı çaplardaki çukurların sıralı ve şaşırtmalı dizilimleri ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Su akışkanı ve türbülanslı akış koşulları ($3000 \leq Re \leq 8000$) altında gerçekleştirilen analizlerde; Reynolds sayısının artmasıyla Nusselt sayısının ve basınç düşüşünün arttığı, ısıl direncin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı sonuçlar, şaşırtmalı dizilime sahip modelin, geleneksel düz modele göre Nusselt sayısını yaklaşık iki katına çıkardığını ortaya koymuştur. Ayrıca, şaşırtmalı modelde ısıl direnç 0,0057 K/W değerine kadar düşerken, maksimum Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) 1,33 olarak elde edilmiştir.

Gürsoy vd. (2023) manyetik alanın konumu ve şiddetinin ferroakışkanların ısıl performansına etkisini, Fe_3O_4/Su nanoakışkanı düz ve çukurlu boru konfigürasyonlarında test etmiştir. Sonuçlar, manyetik alan kaynağının boru girişine yerleştirilmesinin ısı transferini maksimize ettiğini göstermektedir. 0,3 T manyetik

alan altında, düz boruda Nusselt sayısı %64,03 oranında artarken, çukurlu boruda bu artış %45,40 seviyesindedir. Çalışmada ayrıca, manyetik alan konumunun basınç düşüşüne önemli bir etkisi olmadığı, ancak termo-hidrolik performans açısından en verimli noktanın B = 0,16 T manyetik alan şiddetinde %33,54 PDK artışı yakalandığı rapor edilmiştir.

Gürdal vd. (2022) tarafından yapılan ısı transferi mekanizmalarının iyileştirilmesine yönelik güncel bir derlemede; nanoakışkan, türbülatör ve manyetik alan parametrelerinin birleşik etkisi masaya yatırılmıştır. Çalışma, literatürde bu üçlü kombinasyonu ele alan araştırmaların azlığını vurgulamakla birlikte; nanopartikül derişimi ve manyetik alan şiddetindeki artışın ısı transferini doğrusal olarak iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Sınır tabaka oluşumunu bozan türbülatörlerin de katkısıyla, özellikle MWCNT (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp) esaslı nanoakışkanlarda %190 gibi çarpıcı iyileştirme oranlarına ulaşıldığı belirtilmiştir.

Ben Said vd. (2025) bu çalışmada, helisel bir ısı değiştirici içerisinde kavisli delikli türbülatör ve farklı hibrit nanoakışkanların kullanımını sayısal olarak modellemiştir. Elde edilen bulgular, Al_2O_3-TiO_2/Su hibrit nanoakışkanının ısı transferini maksimize ettiğini ve referans duruma göre ısı transfer katsayısını yaklaşık %18,19 oranında artırdığını ortaya koymuştur. Ancak çalışma, ısı transferindeki bu artışın yüksek basınç kayıplarıyla dengelendiğini; dolayısıyla türbülatörsüz yapının genel termal performans faktörü açısından hala avantajlı olduğunu vurgulamaktadır. Nanoakışkan konsantrasyonunun artırılması ısı geçişini %3,65 artışla olumlu etkilese de hidrolik dezavantajları tamamen ortadan kaldıramamıştır

3. BORU VE KANALLARDA AKIŞ

3.1 Reynolds Sayısı

Bir akışkanın boru içindeki akışı laminer veya türbülanslı rejimde gerçekleşebilir. Akışın bu iki rejim arasında geçişi; kanal geometrisi, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, duvar sıcaklığı ve akışkanın termofiziksel özellikleri gibi birçok parametre tarafından belirlenir. Akış rejimini kontrol eden temel fiziksel mekanizmanın anlaşılması amacıyla yapılan kapsamlı deneysel çalışmalar sonucunda, Osborne Reynolds (1842–1912), akış davranışının esasen akışkandaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı ile karakterize edildiğini göstermiştir. Bu boyutsuz büyüklük, günümüzde Reynolds sayısı (Re) olarak adlandırılmakta olup, akışın laminer, geçiş bölgeli veya türbülanslı rejimde olup olmadığının belirlenmesinde temel kriter olarak kullanılmaktadır (Avila vd., 2023).

Reynolds sayısı olarak adlandırılan bu boyutsuz parametre, akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını temsil eder ve $Re = \rho VL/\mu$ şeklinde tanımlanır. Burada L, akışı karakterize eden karakteristik uzunluk olup, dairesel kesitli bir boruda boru çapı D ile ifade edilir. Dairesel olmayan kesitli boru veya kanallarda ise karakteristik uzunluk olarak hidrolik çap kullanılmakta ve bu büyüklük $D_h = 4A/Ç$ bağıntısıyla tanımlanmaktadır. Bu ifadede A, akışa dik kesit alanını; Ç ise akışkan tarafından ıslatılan (yalanan) çevre uzunluğunu göstermektedir. Reynolds sayısının hesaplanmasında yer alan V, ortalama akış hızı olup $V= \dot{m}/\rho A$ şeklinde tanımlanır; burada $\dot{m}$ kütlesel debiyi, ρ ve μ ise sırasıyla akışkanın yoğunluğunu ve dinamik viskozitesini temsil eder. Bu temel parametre, akışın laminer, geçiş bölgesi veya türbülanslı rejimde gerçekleşip gerçekleşmediğinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Çengel ve Cimbala, 2020).

Akış rejiminin belirlenmesinde kritik bir parametre olan Reynolds sayısı, akışın karakterini doğrudan tanımlar. Genel kabul gören sınıflandırmaya göre, Reynolds sayısının $Re<2300$ olduğu durumlarda akış tamamen laminer karakterlidir ve akışkan tabakaları düzenli bir şekilde hareket eder. Normal mühendislik uygulamalarında $Re>4000$ değerleri için akış türbülanslı rejime geçer ve girdaplı, karışmalı bir akış

yapısı hâkim olur. Re=2300–4000 aralığında ise akış, giriş şartlarına, yüzey pürüzlülüğüne ve harici bozucu etkilerin varlığına bağlı olarak laminer veya türbülanslı özellik gösterebileceğinden geçiş bölgesi olarak tanımlanır. Bu aralıkta akış, kararsız bir yapıya sahiptir ve laminer-türbülanslı bölgeler akış boyunca bir arada bulunabilir. Bu nedenle geçiş bölgesinde ısı transferi ve sürtünme davranışını doğru bir şekilde öngörmek, mühendislik tasarımı açısından özel önem taşır (Ghajar ve Tam, 1994).

3.2 Laminer Akış

Akışkanların boru ve kanal içindeki hareketi, akım çizgilerinin düzenine bağlı olarak farklı rejimlerde meydana gelebilir. Akış çizgilerinin düzgün, paralel ve zamanla değişmeyen bir yapı sergilediği akış türü laminer akış olarak tanımlanır. Bu rejimde akışkan, birbirine karışmadan hareket eden tabakalar hâlinde akar ve momentum transferi büyük ölçüde moleküler viskozite etkisiyle gerçekleşir. Laminer akış genellikle düşük hızların, yüksek viskoziteye sahip akışkanların veya küçük karakteristik boyutların söz konusu olduğu sistemlerde gözlemlenir. Bu akış rejimi, akış alanında düşük düzeyde karışım ve öngörülebilir hız dağılımları ile karakterize edilir ve bu nedenle mühendislik analizlerinde matematiksel olarak daha kolay modellenebilir (Morini, 2004).

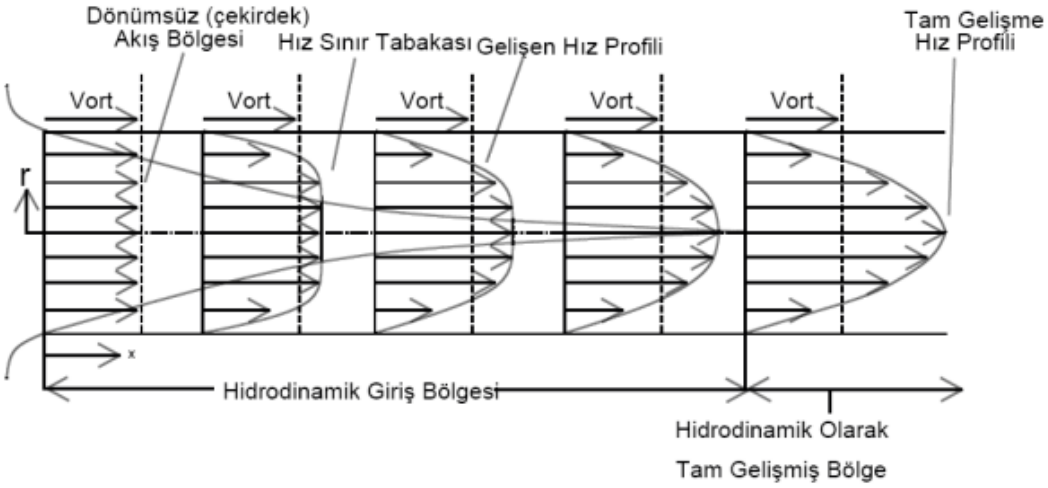
3.3 Türbülanslı Akış

Türbülanslı akış, akışkan hareketinin hem zamana bağlı hem de mekânsal olarak yüksek derecede düzensizlik gösterdiği, girdap oluşumunun baskın olduğu bir akış rejimidir. Bu rejimde hız bileşenleri sürekli olarak dalgalanır ve akış, üç boyutlu, düzensiz ve yüksek karışım özellikleri sergiler. Türbülans genellikle yüksek akış hızlarında, düşük viskoziteli akışkanlarda veya büyük karakteristik boyutlara sahip sistemlerde meydana gelir. Türbülanslı rejimin oluşmasıyla birlikte momentum, ısı ve kütle taşınımı hızlanır; bu nedenle türbülans, mühendislik uygulamalarında ısı transferini artırıcı bir rol oynayabilir. Ancak türbülanslı akış, aynı zamanda sürtünme katsayısını önemli ölçüde yükselterek pompalama gücü ihtiyacını artırır, bu da sistem

tasarımında hidrodinamik kayıpların dikkatle değerlendirilmesini gerektirir (Marusic vd., 2010).

3.4 Hidrodinamik Sınır Tabaka

Kanal veya boru içerisindeki iç akışta, akışkan duvarla temas ettiğinde kaymazlık sınır şartı gereği duvar yüzeyindeki akışkan hızı sıfır olur. Duvarlardan boru merkezine doğru uzaklaşıldıkça akışkan üzerindeki viskoz etkiler zayıflar ve hız kademeli olarak artar. Bu nedenle, herhangi bir kesitte hızın radyal yönde değişimini ifade eden Şekil 3.1'de verildiği gibi karakteristik bir hız profili oluşur. Hız profilinin duvara yakın bölgede hızın keskin şekilde değiştiği kısmı sınır tabakası olarak tanımlanır.

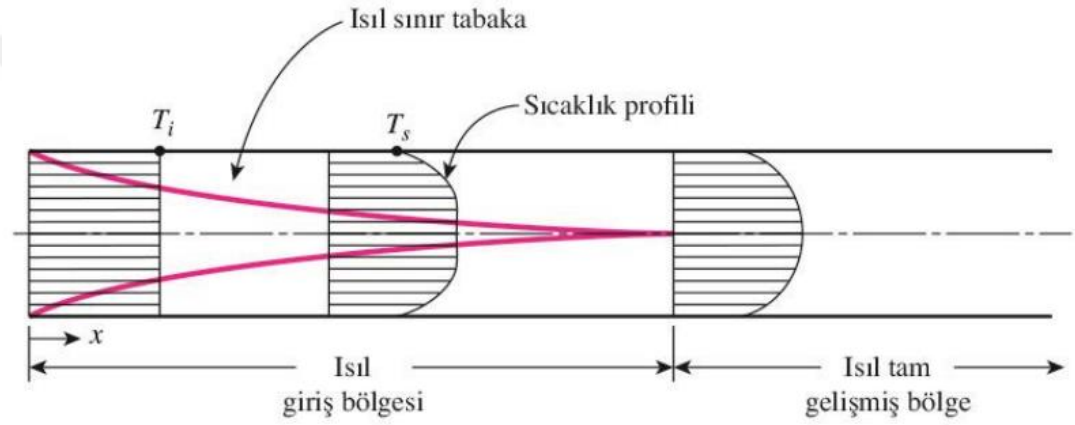


Şekil 3.1 Kanal içi akışta hidrodinamik tabakanın gelişimi (Çengel ve Cimbala, 2020)

Akış, boru girişinden itibaren akış yönünde ilerledikçe sınır tabakaları büyür ve nihayetinde boru merkezine kadar yayılır. Bu bölgedeki hız profili, akış yönü boyunca sürekli olarak değiştiği için akış hidrodinamik olarak gelişmekte olan akış rejimi olarak adlandırılır. Sınır tabakalarının merkezde birleştiği konumdan itibaren hız profili artık akış yönünde değişmez ve yalnızca radyal konumun bir fonksiyonu hâline gelir. Bu bölge ise hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış olarak tanımlanır (Çengel ve Cimbala, 2020).

3.5 Isıl Sınır Tabaka

Boru veya kanal içi akışta, akışkan duvarla temas ettiğinde yalnızca hız profili değil, aynı zamanda sıcaklık profili de duvar şartlarının etkisiyle gelişmeye başlar. Duvar boyunca uygulanan sabit sıcaklık veya sabit ısı akısı sınır şartları nedeniyle Şekil 3.2'deki gibi duvar yakınında bir ısı sınır tabakası oluşur. Isı sınır tabakasının gelişerek boru eksenine ulaştığı akış bölgesi ısıl giriş bölgesi olarak adlandırılır ve bu bölgenin uzunluğu ısıl giriş uzunluğu olarak tanımlanır. Bu bölgede sıcaklık profili akış yönünde değişmekte olduğundan, akış ısıl olarak gelişen akış rejimindedir.



Şekil 3.2 Kanal içi akışta ısıl sınır tabakanın gelişimi (Çengel ve Cimbala, 2020)

Isı sınır tabakasının kanal kesitini tamamen doldurduğu noktadan itibaren sıcaklık profili artık akış yönünde değişmez ve yalnızca radyal konumun bir fonksiyonu hâline gelir. Bu bölge ısıl olarak tam gelişmiş akış bölgesi olarak isimlendirilir. Akışın hem hidrodinamik hem de ısıl açıdan tam gelişmiş olduğu durumda gerek hız profili gerekse boyutsuz sıcaklık profili akış yönünde sabit kalır. Bu durum, mühendislik uygulamalarında tam gelişmiş iç akış olarak tanımlanır (Heaton vd., 1964).

3.6 Kanal İçi Akışta Nanoakışkan Kullanımı

Son yıllarda nanoakışkanlar, kanal içi akışlarda ısı transfer performansını artırmaya yönelik en etkili pasif yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Nanoakışkan; metal, metal oksit, karbür veya karbon esaslı nanoparçacıkların (1–100 nm boyut aralığında) su, glikol veya yağ gibi baz akışkanlar içerisinde homojen olarak dağıtılmasıyla elde

edilen kolloidal bir sıvıdır. Bu akışkanlar, klasik soğutucu akışkanlara kıyasla daha yüksek termal iletkenlik, ısı yayılım katsayısı, Brownian hareket kaynaklı taşınımla ısı transferi ve türbülans artırıcı etki gibi ek mekanizmalar sayesinde kanal içi ısı transferini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Wang vd., 2007). Kanal içi akışta nanoakışkanların sağladığı iyileştirme temel olarak iki ana mekanizmaya dayanır. Birincisi, nanoparçacıkların baz akışkanın termofiziksel özelliklerini geliştirmesiyle iletim tabanlı ısı transferinin artmasıdır (Bizuneh vd., 2025). Nano boyuttaki parçacıklar yüksek yüzey alanı/hacim oranları nedeniyle baz akışkanın termal iletkenliğini belirgin şekilde artırır ve bu durum özellikle laminer akış rejiminde daha baskın hâle gelir. İkinci mekanizma ise, akış içinde bulunan nanoparçacıkların Brownian hareketi ile ortaya çıkan türbülansın sınır tabaka yapısını zayıflatması ve böylece taşınımla ısı transferinin artmasıdır (Choudhary vd., 2025). Türbülanslı akış rejiminde ise nanoparçacıklar, özellikle akışın çeper yakın bölgesindeki momentum ve enerji taşınımını artırarak Nusselt sayısında ek kazanç sağlamaktadır (Kareem vd., 2025).

Tablo 3.1 Literatürde nanoakışkan kullanılarak yapılan çalışmalar

Yazar	**Akışkan**	**Nanopartikül Konsantrasyonu**	**Bulgular**
Gürsoy vd. (2024)	Al_2O_3/Su	Hacimsel φ=%1,0	Sayısal analiz sonuçlarına göre, incelenen nanopartikül şekilleri arasında platelet (levha) formundaki Al_2O_3 nanopartikülleri, Re=2000 çalışma koşulunda en yüksek Performans Değerlendirme Kriterini (PDK) sağlamıştır.
Pazarlıoğlu vd. (2022)	NiO/Su	Hacimsel φ=%0,6-2,5	En yüksek ısı transferi artışı %2,5 hacimsel nanopartikül derişimli NiO/Su kullanıldığı koşullarda %20 ile elde edilmiştir.
Dağdeviren vd. (2025)	Fe_3O_4/Su	Hacimsel φ=%0-2	Nanoakışkan kullanımının etkisi incelendiğinde, %2,0 hacimsel derişime sahip Fe_3O_4/Su ferroakışkanının kullanımı ısı transferini %38, Performans Değerlendirme Kriterini (PDK) ise %28 oranında artırmıştır.

Tablo 3.1'in devamı

Gürdal (2023)	$NiFe_2O_4$/Su	Hacimsel φ=%1	%1 hacimsel orana sahip $NiFe_2O_4$/Su manyetik nanoakışkanının girdap oluşturuculu borular içerisindeki davranışı, sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Analiz sonuçları, nanoakışkanın sağladığı yüksek ısıl iletkenlik avantajının, dalga oranı 2 olan geometrinin yarattığı akış karışımıyla birleşerek en yüksek ısı transferi performansını ortaya çıkardığını göstermektedir.

3.7 Kanal İçi Akışta Çukur Kanatçıların Kullanımı

Kanal içi akışlarda ısıl performansın artırılması amacıyla geliştirilen pasif yöntemlerden biri de çukur kanatçıklar olarak adlandırılan yüzey geometrilerinin kullanımıdır. Çukur kanatçıklar, düz yüzey üzerine belirli bir düzenle yerleştirilen konkav oyuklardan oluşur ve akışkanın yüzeyle etkileşimini değiştirerek hem akış yapısını hem de ısı geçişini önemli ölçüde etkiler (Al-Haidari vd., 2025). Bu yapıların temel etkisi, oyuk bölgesinde oluşan akış ayrılması, yeniden yapışma bölgeleri ve ikincil vorteks yapıları üzerinden ısı ve momentum transferini artırmalarıdır. Çukur kanatçıkların kanal içi akışlara uygulanmasıyla, duvar yüzeyinde geleneksel pürüz yüzeylere kıyasla daha düzenli ve daha düşük basınç kaybı oluşturan üç boyutlu akış yapıları meydana gelir. Oyuk içine giren akış, çukurun arka kenarında ayrılmakta ve çukur sonrası bölgede yeniden yapışarak lokal türbülans şiddetini artırmaktadır (S. Xie vd., 2019). Bu süreç boyunca oluşan vorteks yapıları, duvar yakınındaki düşük enerjili akış bölgelerini çekip yüksek enerjili ana akışla karıştırarak sınır tabaka içindeki hız ve sıcaklık gradyanlarını güçlendirmektedir (Mashayekh vd., 2026). Bu mekanizma sayesinde, çukur kanatçıklı yüzeylerde Nu sayısında anlamlı bir artış elde edilir.

Tablo 3.2 Literatürde çukur kanatçık kullanılarak yapılan çalışmalar

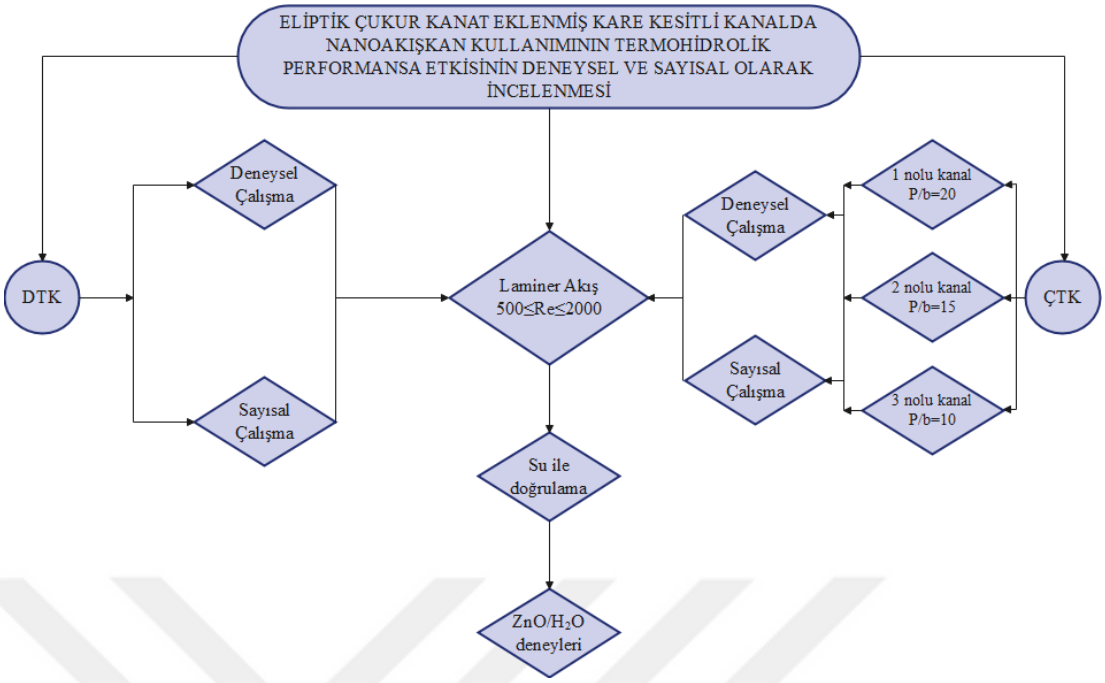
Yazar	Akışkan	Çukur Kanat Geometrisi	Bulgular
Tepe (2021)	Hava	Dairesel ve oval çukur kanatçık	Elde edilen bulgular, Re ≤ 1500 aralığındaki görece düşük akış hızlarında, dairesel kesitli çukur/çıkıntıların oval formlara nazaran ısı transferini iyileştirmede daha etkin olduğunu göstermektedir. Çalışma genelinde ulaşılan maksimum ısı transferi artışı, Re=1500 değerinde ve dairesel konfigürasyon kullanımıyla %26,63 seviyesinde gerçekleşmiştir.
Raad Al-Haidari vd. (2024)	Su	Dairesel çukur kanatçık	Nusselt sayıları pürüzsüz kanallara kıyasla çukur kanatçıklı kanallarda önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Artış, çukur kanatçıkların sayısı, çapı ve aralığına bağlı olarak %29 ile %38 arasında değişmiştir.

Tablo 3.2’nin devamı

Cheraghi vd. (2020)	Su	Oval çukur kanatçık	Nusselt sayısı, daha yüksek çukur çapları ve derinlikleri ile daha düşük aralıklarla artmıştır. Re = 2000'de 18 mm aralık, 18 mm çap ve 6 mm derinlik olduğunda, sabit ısı akısı ile düz boruya kıyasla 6 kata kadar artmıştır.
Deeb (2025)	Hava	Dairesel, eliptik, damla ve kam şekilli çukur kanatçık	İncelenen Reynolds sayısı aralığında, küresel çukurlar 1,3 ile 1,48 arasında değişen en yüksek Nusselt sayısı oranını sergilemiştir, bu da üstün termal performans sergilediklerini ortaya koymuştur. Buna karşılık, damla şeklindeki çukurlar, 1,23 ile 1,28 arasında değişen Nusselt sayısı oranları ile nispeten daha düşük ısı transferi artışı sergilemiştir.
G. Xie vd. (2013)	Hava	Dairesel çukur kanatçık	İç çıkıntılı çukur örneklerinde çukurlu kavisli yüzeyin ortalama ısı transferi, geleneksel küresel çukur örneğine kıyasla sırasıyla %7,28, %9,93 ve %5,02 oranında iyileşmiştir.
Xu vd. (2025)	Hava	Dairesel ve slot çukur kanatçık	P-slot çukur kanatçıklar, geleneksel dairesel çukur kanatçıklara kıyasla %23,8 ile %33,8 arasında değişen bir genel ısı transferi artışı sergilemiştir. Ancak bu, %77 ile %177 arasında bir basınç kaybı artışına neden olmuş ve genel termal performans %10'dan az bir fark göstermiştir. V-slot çukur kanatçıklar, ısı transferini %104 ile %121 arasında daha da iyileştirirken, basınç kaybı %128 ile %347 arasında artmış ve bu da genel termal performansını %25 ile %68,3 arasında iyileştirmiştir.
Gürsoy vd. (2024)	Su	Dairesel, eliptik, yağmur damlası, slot ve küp çukur kanatçık	İncelenen geometriler arasında en yüksek ortalama Nusselt sayısı değerlerine, akışa paralel yerleştirilmiş kübik çukur kanatçık modelinde ulaşılmıştır. Bu modelin ısıl performansı standart düz kanal ile kıyaslandığında; Re=1000 için %95,21, Re=1500 için %176,25 ve Re=2000 için %272,13 gibi dikkat çekici iyileştirme oranları kaydedilmiştir.

4. YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, su ve φ=%1,0 hacimsel konsantrasyona sahip ZnO/H_2O nanoakışkanının düz test kanalı (DTK) ve çukur kanatçıklı test kanalında (ÇTK) zorlanmış taşınım koşulları altındaki ısı transferi ve hidrodinamik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. DTK olarak 1500 mm uzunluğa, D_1=20 mm kenar uzunluğuna ve t=2 mm et kalınlığına sahip alüminyum profil boru kullanılmıştır. ÇTK üzerine ise P/b (P/b=20,15,10) olarak tanımlanan boyutsuz bir geometrik parametre ile eliptik çukur kanatçıklar işlenmiştir. Burada P (mm) iki bitişik çukur kanatçık arasındaki mesafeyi, b (mm) ise tek bir çukur kanadın genişliğini temsil etmektedir. Yapılan çalışmalar laminer akış koşulları (500≤Re≤2000) altında, hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş koşullar altında gerçekleştirilmiştir ve test kanalına sabit olarak q''=2000 W/m^2 ısı akısı uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar Kastamonu Üniversitesi Isı Tekniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği kurulumundan sonra gerçekleştirilen literatür karşılaştırmalarıyla deney düzeneğinin doğruluğu sağlanmış ve deneylere bu şekilde devam edilmiştir. Sayısal çalışmalar ANSYS Fluent 2024R2 yazılımı kullanarak aynı sınır şartları altında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmalar kapsamında elde edilen deneysel ve sayısal çalışmalar literatürdeki çalışmalarla kıyaslanmış ve doğruluğu sağlanmıştır.



Şekil 4.1 Çalışma planı algoritması

4.1 Deneysel Yöntem

Test kanalının tüm yüzeyine rezistans ısıtıcı kablo kullanılarak sabit ısı akısı uygulanan kare kesite sahip kanal içindeki nanoakışkan akışının ısı transferi hidrodinamik performansa etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Test kanalı olarak 1500 mm uzunlukta, D_1=20 kenar uzunluğuna sahip ve literatürde de çokça tercih edilen alüminyum malzemeden üretilmiş kanallar kullanılmıştır. Test kanallarının üzerine hidrolik pres kullanarak P=60 mm, 45 mm, 30 mm aralıklarla eliptik çukur kanatçıklar işlenmiş ve 3 farklı test kanalı imal edilmiştir. Tüm test kanalının yüzeyine uygulanan ısı akısı q'' =2000 W/m^2 değerinde olup, sabit ve üniform olarak uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar laminer akış koşulları altında 500≤Re≤2000 aralığında yürütülmüş ve çalışmanın termal ve hidrodinamik performansı bu koşullar altında değerlendirilmiştir.

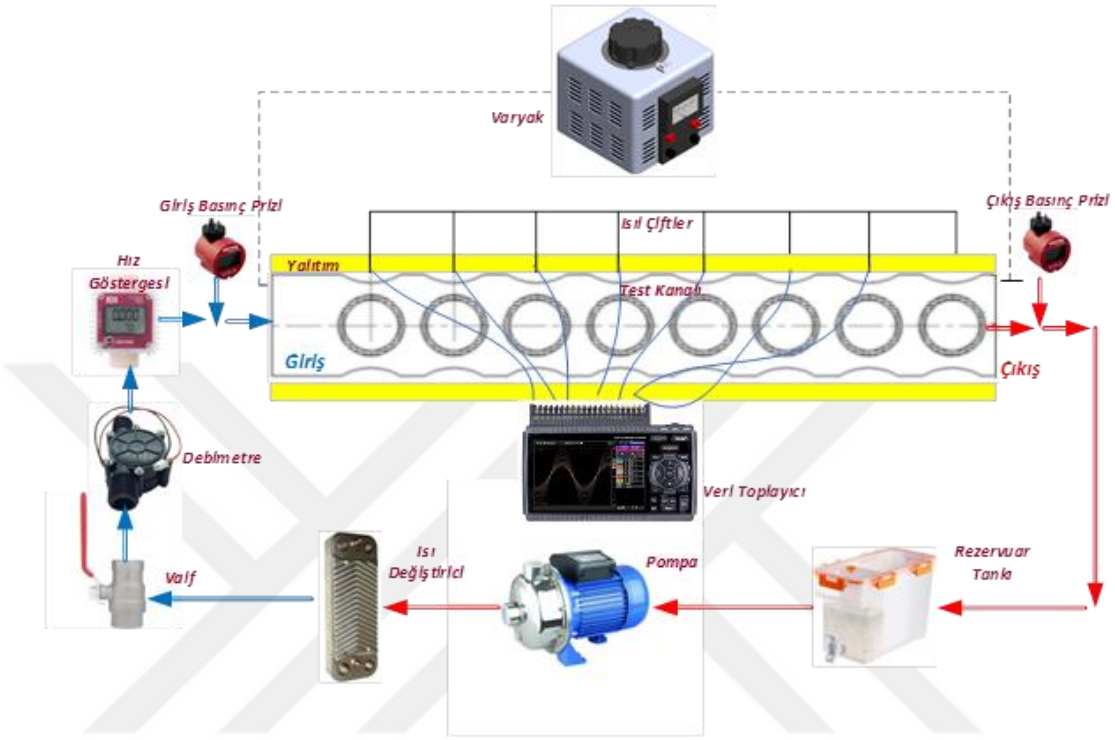
Tablo 4.1 Çalışma kapsamında yürütülen deneyler

Yapılan Deneyler	
Laminer Akış Koşulları (Yapılan deneyler 500≤Re≤2000 aralığında 4 farklı akış hızında gerçekleştirilmiştir.)	
Düz Test Kanalında Yapılan Doğrulama Çalışmaları	
Deney No	**Akışkan**
1. DTK (Re=500)	Su
2. DTK (Re=1000)	Su
3. DTK (Re=1500)	Su
4. DTK (Re=2000)	Su
5. DTK (Re=500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
6. DTK (Re=1000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
7. DTK (Re=1500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
8. DTK (Re=2000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
Çukur Kanatçıklı Test Kanallarında Yapılan Çalışmalar	
9. P/b=20 (Re=500)	Su
10. P/b=20 (Re=1000)	Su
11. P/b=20 (Re=1500)	Su
12. P/b=20 (Re=2000)	Su
13. P/b=20 (Re=500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
14. P/b=20 (Re=1000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
15. P/b=20 (Re=1500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
16. P/b=20 (Re=2000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
17. P/b=15 (Re=500)	Su
18. P/b=15 (Re=1000)	Su
19. P/b=15 (Re=1500)	Su
20. P/b=15 (Re=2000)	Su
21. P/b=15 (Re=500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
22. P/b=15 (Re=1000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
23. P/b=15 (Re=1500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
24. P/b=15 (Re=2000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
25. P/b=10 (Re=500)	Su
26. P/b=10 (Re=1000)	Su
27. P/b=10 (Re=1500)	Su
28. P/b=10 (Re=2000)	Su
29. P/b=10 (Re=500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
30. P/b=10 (Re=1000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
31. P/b=10 (Re=1500)	φ=%1,0 ZnO/H_2O
32. P/b=10 (Re=2000)	φ=%1,0 ZnO/H_2O

4.1.1 Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar

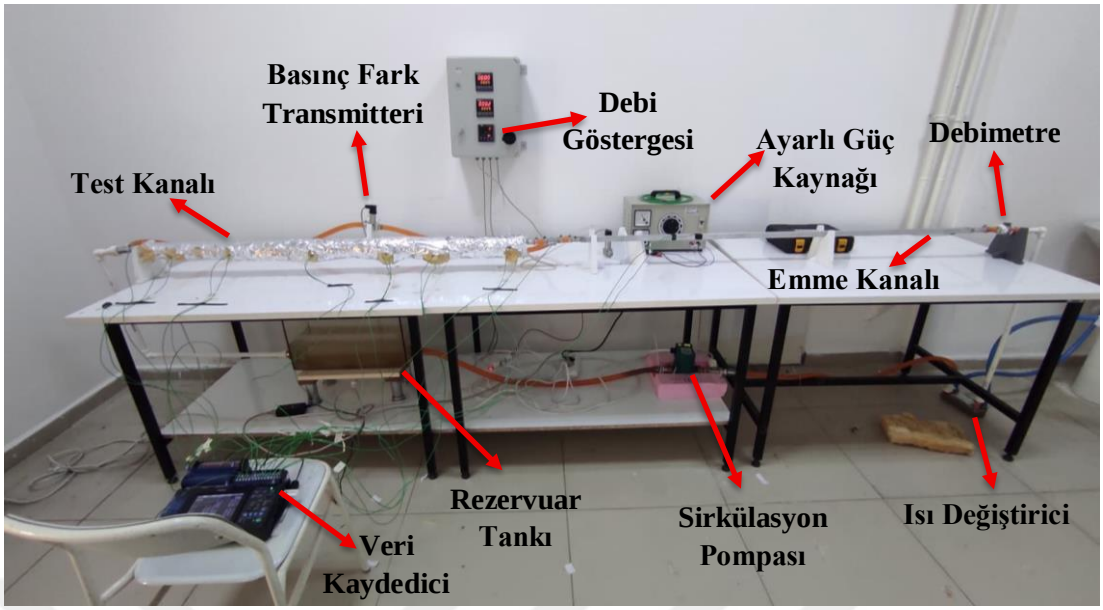
Bu tez çalışması için kurulan deney düzeneği, kare kesitli DTK ve ÇTK kullanılarak laminer akış rejiminde, sabit ısı akısı uygulayarak ısı transferi ve hidrodinamik performansı incelemek amacıyla kurulmuştur. Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği

deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.2'de, genel görüntüsü ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Deney düzeneği kurulumunda kullanılan temel ekipmanlar ve görevleri takip eden bölümde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 4.2 Deney düzeneğinin şematik görünümü

Deney düzeneği sirkülasyon pompası, akış kontrol vanası, 14 plakalı ısı değiştirici, debimetre, ayarlı güç kaynağı, rezistans ısıtıcı kablo, basınç fark transmitteri, ısıl çiftler, veri kaydedici, test kanalı ve rezervuar tankından oluşmaktadır. Deneylerin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi amacıyla sistemin sızdırmazlığına dikkat edilmiştir. Bağlantı elemanlarının birleşim noktalarında metal kelepçe ve ihtiyaç duyulması halinde sıvı conta kullanılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Emme ve test kanalının seçiminde ısı iletim katsayısı yüksek olan ve kaynaklanabilir 6063 kalite alüminyum (k=200 W/mK) malzeme tercih edilmiştir. Test kanalının kesiti kare olarak seçildiğinden, kare kanalın önüne daire kesitli alüminyum kanalın kaynaklanarak sisteme bağlanması ve sızdırmazlığın sağlanması büyük önem taşımaktadır. Test kanalının uzunluğu literatür taraması yapıldıktan sonra ve deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların ölçüm aralığına dikkat edilerek belirlenmiştir.

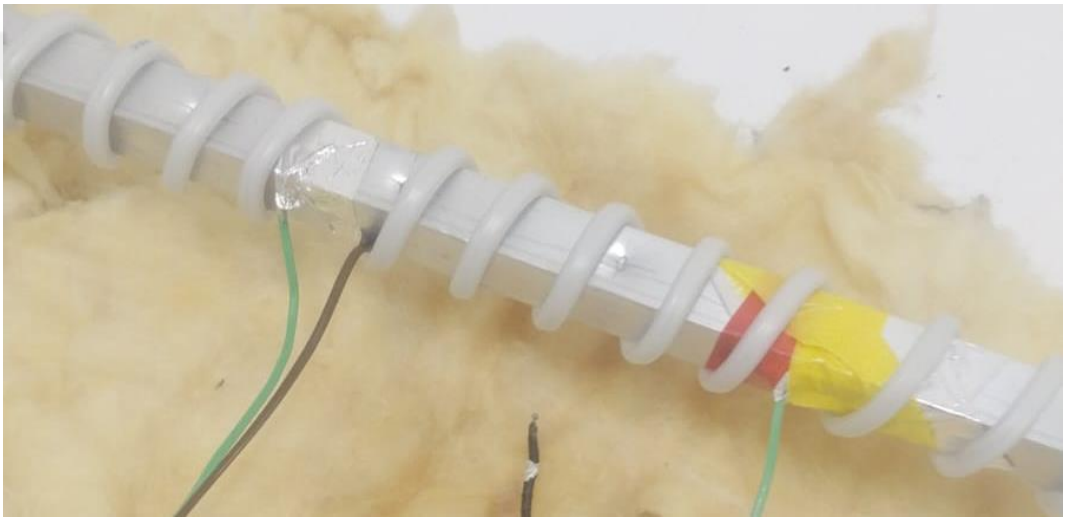


Şekil 4.3 Deney düzeneğinin genel görünümü

Şekil 4.3'te verilen deney düzeneğine göre kare kesitli kanalın önünde yine aynı kesitli ve bağlantı amacıyla dairesel kesitli alüminyum kaynaklanmış emme kanalı bulunmaktadır. Test kanalındaki akışın hidrodinamik açıdan tam gelişmiş akış koşullarına ulaşması için emme kanalının uzunluğu 1500 mm olarak seçilmiştir. Bu uzunluk belirlenirken laminer akış koşullarındaki hidrodinamik sınır tabaka bağıntısı kullanılmıştır. Akış emme kanalından test kanalına doğru geçerken akışkanın uniform hız ve sıcaklık özelliklerini korumak amacıyla deneyde akış debisi ve akışkanın giriş sıcaklıkları sabit tutulmuştur. Rezistans ısıtıcı kablo yardımıyla uygulanan sabit ısı akısı akışın ısıl olarak gelişmesini sağlamaktadır. Sabit ve uniform ısı akısını deney boyunca belirlenen sınır şartında tutmak amacıyla test kanalının yüzeyi cam yünü ile sarılarak yalıtım sağlanmıştır. Isıtıcı eleman olarak düşük maliyet, ısıtma kapasitesi, esneklik ve uygulama kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle rezistans ısıtıcı kablo kullanılmıştır. Bu ısıtıcı eleman 50 W/m ısıtma kapasitesine sahiptir. Test kanalının uzunluğu olan 1500 mm boyunca kanalın etrafına sarılarak, ayarlı güç kaynağına bağlı ısıtıcı kablodan $q''=2000$ W/m^2 değerinde sabit ve uniform ısı akısı uygulanmıştır. Kanala uygulanan bu ısı akısı, literatürde yapılan benzer deneysel ve sayısal çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan akışkan ve test kanalının yüzey sıcaklığını ölçmek amacıyla T tipi bakır ısıl çiftler kullanılmıştır. Deneyler öncesi ölçüm doğruluğunu

sağlamak amacıyla, kullanılacak olan ısıl çiftler hem oda sıcaklığında hem de test kanalı üzerinde denenerek ölçüm doğrulukları test edilmiştir. Deneysel çalışmalar boyunca toplam on altı adet ısıl çift kullanılmıştır. Akışkanın giriş sıcaklığını ölçmek amacıyla test kanalının girişinde bir adet, akışkanın çıkış sıcaklığını ölçmek için test kanalının çıkışında bir adet, yalıtım sıcaklıklarını ölçmek amacıyla cam yünü üzerinde iki adet ve test kanalının yüzey sıcaklıklarını ölçmek amacıyla on iki adet ısıl çift kullanılmıştır. Kullanılan ısıl çiftler altı istasyon şeklinde kanalın alt ve üst yüzeyine yerleştirilmiştir. Rezistans ısıtıcı kablonun test kanalına sarımı ve ısıl çiftlerin test kanalı üzerindeki yerleşimi Şekil 4.4'te verilmiştir.

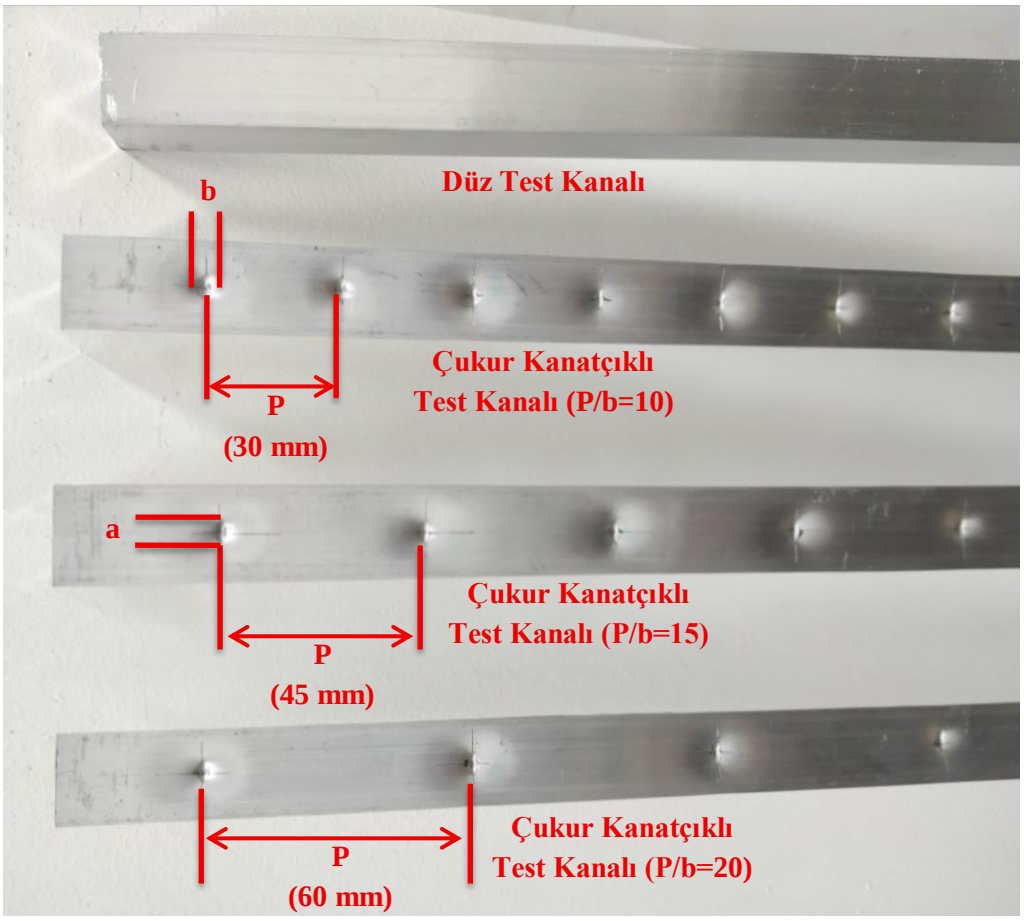


Şekil 4.4 Rezistans ısıtıcı kablo ve ısıl çiftlerin test kanalına bağlantısı

Bu çalışmada, üç farklı aralıkta eliptik geometriye sahip çukur uygulanmış çukur kanatçıklı kanal kullanılmıştır. Çukur kanatçık aralığı (P), çukur kanatçık genişliği (b), çukur kanatçık uzunluğu (a) boyutsuz parametre P/b'nin belirlenmesi açısından temel parametrelerdir. Kanal içi termal ve hidrodinamik performans boyutsuz parametre olan P/b=20-15-10 kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Çukur kanatçıklar hidrolik pres kullanılarak belirlenen aralıkta test kanallarına işlenmiştir. Çukur kanatçık işlenen kanallar Şekil 4.5'te, çukur kanatçıklar için kullanılan parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Çukur kanatçık parametreleri

Geometrik Parametre	Çukur Kanatçık Uzunluğu (mm) (a)	Çukur Kanatçık Genişiği (mm) (b)	Çukur Kanatçık Aralığı (mm) (P)
DTK	-	-	-
P/b=20	6	3	60
P/b=15	6	3	45
P/b=10	6	3	30



Şekil 4.5 Düz ve çukur kanatçık uygulanmış test kanalları

Test kanalına uygulanan ısı akısı, Şekil 4.6'de gösterilen ayarlı güç kaynağı kullanılarak sabit ve uniform bir şekilde uygulanmıştır.



Şekil 4.6 Ayarlı güç kaynağı

Kullanılan ısıl çiftler, test kanalının giriş ve çıkışından itibaren 50 mm uzaklıkta ve 280 mm aralıklı olacak şekilde test kanalının alt ve üst yüzeyine yerleştirilmiştir. Isıl çiftlerin deney düzeneği kurulumunda yerinden oynamaması ve alınan deneylerin doğruluğu için yüzeye alüminyum bant kullanarak sabitlenmiştir. Sıcaklık değerlerini ölçmek için kullanılan ısıl çiftler, Şekil 4.7'de verilen 30 kanallı HIOKI marka LR8402-20 model veri kaydediciye bağlanarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen sıcaklık değerleri USB Bellek yardımıyla veri dönüşümüne gerek kalmadan bilgisayara aktarımı sağlanmıştır.



Şekil 4.7 Veri kaydedici

Deney düzeneğinin düzenli bir çevrim olarak çalışması için maksimum 170 lt/dk çalışma debisine sahip Şekil 4.8'deki Taifu GRS32/8 marka sıcak su sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Akışkan debisinin belirlenen sınır şartlarına uygunluğunu kontrol etmek amacıyla emme kanalının önüne 0,3-6 lt/dk ölçüm aralığına sahip VFA marka plastik türbin debimetre kullanılmıştır. $500 \leq Re \leq 2000$ çalışma aralığı için belirlenen $0,49 \text{ lt/dk} \leq V \leq 2,07 \text{ lt/dk}$ hacimsel debilerin ayarı amacıyla pompa çıkışına küresel vana bağlanmış ve istenen hacimsel debilerin kontrolü bu şekilde sağlanmıştır. Akışkan debisinin kontrolü için Şekil 4.9'daki plastik türbin debimetreye Arduino devresi bağlanmış, çalışma debileri Şekil 4.10'daki ekrandan anlık olarak takip edilmiştir.



Şekil 4.8 Sirkülasyon pompası

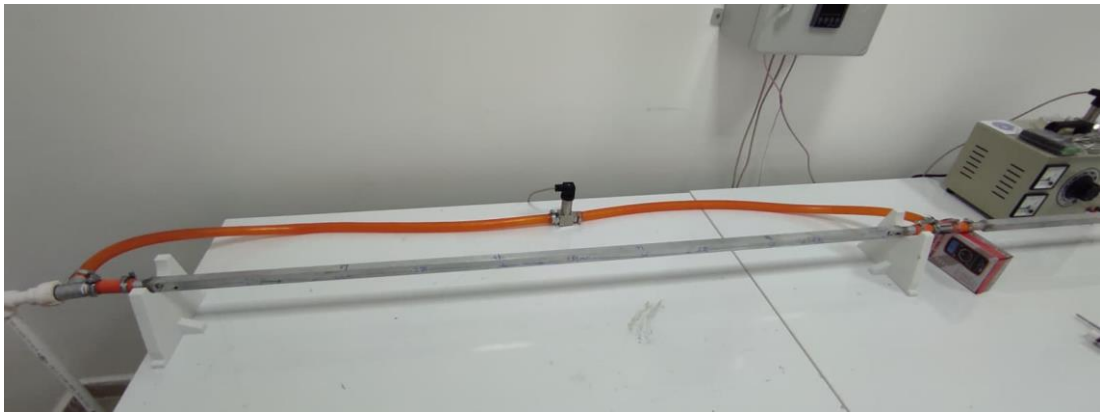


Şekil 4.9 Plastik türbin debimetre



Şekil 4.10 Arduino debi göstergesi

Akışkanın test bölgesindeki hareketi sırasında oluşan sürtünme etkileri, giriş ve çıkış kesitleri arasında basınç kaybına yol açmaktadır. Termo-hidrolik analizlerin doğruluğu için kritik olan bu parametre, Şekil 4.11'de verildiği gibi deney düzeneğine bağlanan ATEK BFT 210 serisi basınç fark transmitteri entegre edilerek ölçülmüştür. ±%0,5 hassasiyete sahip olan basınç fark transmitteri, iki nokta arasındaki basınç farkını doğrudan algılayarak verileri dijital göstergeye aktarmaktadır.

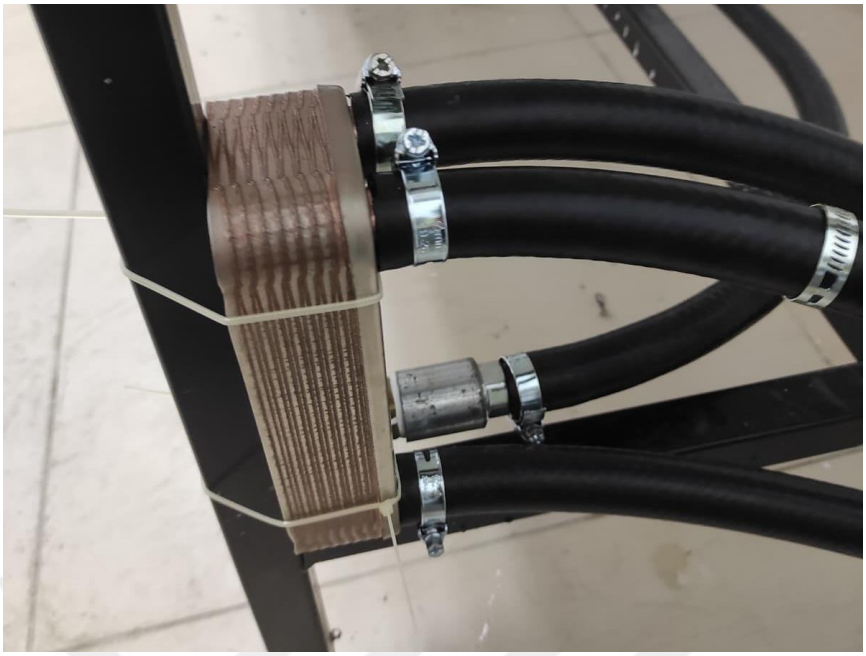


Şekil 4.11 Basınç fark transmitterinin deney düzeneğine bağlantısı

Deneylerde kullanılan ZnO/H_2O nanoakışkanının sistem içerisindeki sirkülasyonunu sağlamak ve akışkanı depolamak amacıyla, Şekil 4.12'de görülen rezervuar tankı kullanılmıştır. 150x200x300 mm boyutlarındaki akvaryum tipi tank, şeffaf yapısı sayesinde nanoakışkanın stabilitesinin ve olası çökelme durumunun görsel olarak takip edilmesine olanak tanımıştır. Sistemin termal kontrolü ise Şekil 4.13'te yer alan 14 plakalı ısı değiştirici vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Isı değiştirici, pompanın çıkışı ile test bölgesinin girişi arasına konumlandırılarak, nanoakışkanın test kanalına istenilen sabit giriş sıcaklığında gönderilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.12 Rezervuar tankı



Şekil 4.13 Isı değiştiricinin deney düzeneğine bağlantısı

4.1.2 Nanopartikül Temini ve Nanoakışkanın Hazırlanması

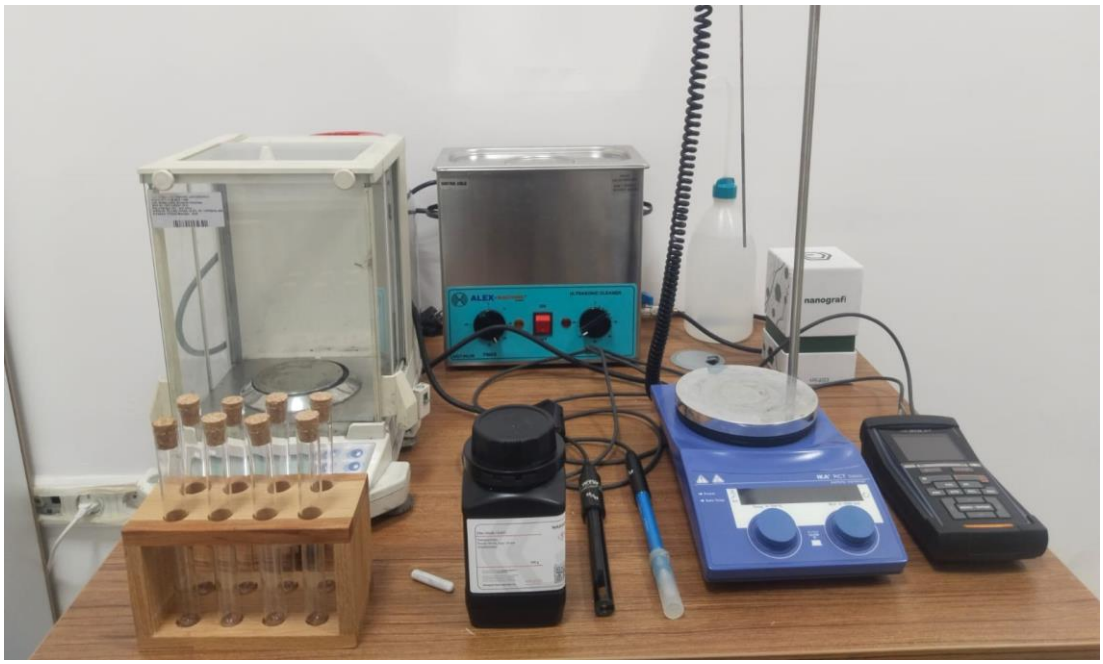
Deneysel çalışmalarda temel ısı transferi akışkanı olarak, üniversite laboratuvarlarından temin edilen saf su ve bu suyun içerisine nanopartikül ilave edilmesiyle oluşturulan %1,0 hacimsel konsantrasyona sahip ZnO/H_2O nanoakışkanı kullanılmıştır. Nanoakışkanın katı fazını oluşturan ZnO nanopartikülleri, Nanografi Nano Teknoloji A.Ş.'den tedarik edilmiş olup teknik özellikleri incelendiğinde; ortalama 18 nm tane boyutuna, küresel geometriye ve %99,95 gibi yüksek bir saflık oranına sahip oldukları görülmektedir.

Nanopartiküllerin baz akışkan içerisinde topaklanarak dibe çökmesini engellemek ve karışımın uzun süre homojen kalmasını sağlamak kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle nanoakışkanın hazırlanma sürecinde, literatürde test edilmiş ve stabilite parametreleri optimize edilmiş olan çift adım yöntemi benimsenmiştir (Topuz vd., 2017). Bu amacı gerçekleştirmek için karışıma yüzey aktif madde olarak Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) ilave edilmiştir. Literatürdeki deneysel veriler ve optimum oranlar referans alınarak Tablo 4.3'te verildiği şekilde, %1,0 hacimsel konsantrasyonlu karışım için nanopartikül kütlesine oranla %15 miktarında SDS kullanımı tercih edilmiştir.

Tablo 4.3 Nanoakışkan hazırlanışında kullanılan yüzey aktif madde miktarı (Topuz vd., 2017)

Hacimsel Konsantrasyon	Baz Akışkan Yoğunluğu (kg/m^3)	Nanopartikül Yoğunluğu (kg/m^3)	SDS Parçaçık Oranı	SDS Ağırlığı (g)
%1,0	998,0	5606	%15	42,05

Hazırlık aşaması, istenilen %1,0 hacimsel konsantrasyona ulaşmak için gerekli olan ZnO nanopartikülü, saf su ve SDS miktarlarının hassas bir şekilde hesaplanmasıyla başlamıştır. Hesaplanan miktarlar, ±0.001 g hassasiyetindeki terazi kullanılarak tartılmış ve bir beher içerisinde birleştirilmiştir. ZnO/H_2O nanoakışkanının hazırlık aşamasında, partiküllerin baz akışkan içerisinde homojen dağılımını sağlamak ve deney süresince çökelmeyi engellemek kritik öneme sahiptir. Bu kararlılığı sağlamak için Labor firmasından temin edilen, 4 L hacimli ve 180 W ısıtma gücüne sahip Şekil 4.14'te görülen Alex marka laboratuvar tipi ultrasonik banyo kullanılmıştır. Hazırlanan karışım, Şekil 4.15'teki gibi 32 kHz (±5) frekansındaki ses dalgalarına ortalama 2 saat boyunca maruz bırakılarak nanopartiküllerin topaklanması önlenmiş ve elde edilen kararlı süspansiyon kapalı çevrim deney sistemine dahil edilmiştir. Deneylerde kullanılan nanopartiküle ve baz akışkana ait termofiziksel özellikler Tablo 4.4'te detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.14 Nanoakışkan hazırlanışında kullanılan malzemeler



Şekil 4.15 Nanoakışkanın ultrasonik karıştırıcıda hazırlanışı

Tablo 4.4 Baz akışkan ve ZnO nanopartiküllerinin termofiziksel özellikleri (Topuz vd., 2017)

Özellikler	**Saf Su (H_2O)**	**Çinko Oksit (ZnO)**
Yoğunluk (ρ) (kg/m^3)	998.2	5606
Özgül Isı (c_p) (J/kgK)	4182	500
Isı İletim Katsayısı (k) (W/mK)	0.60	54
Tane Boyutu (nm)	-	18
Saflık (%)	-	>99.95
Geometri	-	Küresel

4.1.3 Verilerin Analizi ve Deneysel Hesaplamalar

Bu çalışmada, sistemin kararlı rejime ulaştığı varsayımı altında ve radyasyon kaynaklı ısı transferi ihmal edilerek, termodinamiğin birinci yasası (enerji korunumu) temel alınmıştır. Sisteme verilen toplam enerji ile sistemden ayrılan enerji dengesi Eşitlik 4.1 ile ifade edilebilir:

$$\dot{E} - \left(\dot{Q}_{iletim} - \dot{Q}_{taşınım}\right) = 0 \qquad (4.1)$$

Burada $\dot{E}$, ısıtıcı kaynağa sağlanan elektriksel gücü temsil ederken; $\dot{Q}_{iletim}$ yalıtım malzemesi üzerinden çevreye yayılan ısı kaybını, $\dot{Q}_{taşınım}$ ise boru iç yüzeyinden akışkana aktarılan net ısı miktarını (W) göstermektedir. Dolayısıyla, akışkana geçen net ısı miktarı Eşitlik 4.2'deki gibi düzenlenebilir:

$$\dot{Q}_{taşınım} = \dot{E} - \dot{Q}_{iletim} \tag{4.2}$$

Isıtma sistemine sağlanan toplam elektriksel güç, kullanılan rezistans ısıtıcı kablonun birim uzunluktaki gücü (P) ve boru üzerine sarılan toplam kablo uzunluğu (L_t) dikkate alınarak Eşitlik 4.3 ile hesaplanmıştır:

$$E = L_t \; x \; P \tag{4.3}$$

Deney düzeneğinden çevreye olan ısı kayıplarının hesabı, Fourier'in ısı iletim yasası prensibine dayanmaktadır. Yalıtım malzemesinin geometrik özellikleri ve ısıl iletkenliği kullanılarak ısı kaybı Eşitlik 4.4 ile belirlenmiştir (Çengel ve Cimbala, 2020):

$$Q_{iletim} = k_y A_y \frac{\Delta T_y}{\Delta x_y} \tag{4.4}$$

Bu denklemde; k_y cam yünü yalıtım malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısını, A_y ısı transfer yüzey alanını, Δx_y yalıtım kalınlığını ve ΔT_y ise yalıtımın iç ve dış yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkını belirtmektedir.

Akışkan ile kanal yüzeyi arasındaki ısı transfer performansını belirleyen ortalama ısı taşınım katsayısı (h_m), Newton'un soğuma yasasından türetilerek Eşitlik 4.5'teki gibi elde edilmiştir (Çengel ve Cimbala, 2020):

$$h_m = \frac{Q_{taşınım}}{A_s(T_w - T_b)} \tag{4.5}$$

Burada $A_s$borunun iç yüzey alanını, T_w ortalama yüzey sıcaklığını ve T_b ise akışkanın ortalama yığık sıcaklığını ifade etmektedir. Ortalama yüzey sıcaklığı T_w, boru boyunca

farklı istasyonlara yerleştirilen 12 adet ısıl çift verisinin aritmetik ortalaması alınarak Eşitlik 4.6 ile bulunmuştur:

$$T_w = \frac{\sum_{i=1}^{12} T_i}{12} \tag{4.6}$$

Akışkanın ortalama yığık sıcaklığı T_b ise, test bölgesine giriş ($T_{giriş}$) ve çıkış ($T_{çıkış}$) sıcaklıklarının ortalaması alınarak Eşitlik 4.7 ile hesaplanmıştır:

$$T_{akışkan} = \frac{T_{giriş} + T_{çıkış}}{2} \tag{4.7}$$

Isı transferindeki iyileşmeyi boyutsuz olarak ifade eden ortalama Nusselt sayısı (Nu_m), hesaplanan taşınım katsayısı, hidrolik çap (D_h) ve akışkanın ısıl iletkenliği (k) kullanılarak Eşitlik 4.8 ile türetilmiştir (Çengel ve Cimbala, 2020):

$$Nu_m = \frac{h_m D_h}{k} \tag{4.8}$$

Elde edilen deneysel verilerin doğruluğunu test etmek amacıyla, pürüzsüz boru için literatürde kabul görmüş Shah-London korelasyonu (Shah ve London, 2014) kullanılmıştır. Sabit ısı akısı ve laminar akış koşulları için geçerli olan bu bağıntı şu şekildedir:

$$Nu = 1.95 \left(Re\ Pr \frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{4.9}$$

Akış rejimini belirleyen temel parametre olan Reynolds sayısı (Re), akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak Eşitlik 4.10 ile tanımlanmıştır (Çengel ve Cimbala, 2020):

$$Re = \frac{V\ D_h\ \rho}{\mu} \tag{4.10}$$

Burada V ortalama akış hızını, ρ yoğunluğu ve μ dinamik viskoziteyi temsil eder. Akışkanın momentum ve ısıl yayılım oranlarını ilişkilendiren Prandtl sayısı (Pr) ise Eşitlik 4.11 ile hesaplanmıştır (Çengel ve Cimbala, 2020):

$$Pr = \frac{c_p\,\mu}{k} \tag{4.11}$$

kanal boyunca oluşan hidrodinamik direnci belirlemek için basınç düşüşü (ΔP) ölçülmüş ve bu değerden yola çıkılarak Darcy sürtünme faktörü (f) Eşitlik 4.12 yardımıyla elde edilmiştir (Çengel ve Cimbala, 2020):

$$f = \frac{\Delta P\,\left(\frac{D_h}{L}\right)}{\rho\,\frac{V^2}{2}} \tag{4.12}$$

Sistemin genel verimliliğini analiz etmek, yani ısı transferindeki artışın basınç kaybındaki artışa oranını belirlemek için Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) kullanılmıştır. Sabit pompalama gücü kriterine dayanan bu parametre Eşitlik 4.13 ile hesaplanmıştır (Azizi vd., 2024):

$$PDK = \frac{\left(\frac{Nu_{nano}}{Nu_{baz}}\right)}{\left(\frac{f_{nano}}{f_{baz}}\right)^{\frac{1}{3}}} \tag{4.13}$$

Bu denklemde, nanoakışkanlı ve kanatçıklı durumun verileri Nu_{nano}, f_{nano}, baz akışkanın düz borudaki verileri Nu_{baz}, f_{baz} ile oranlanarak sistemin termal-hidrolik performansı ortaya konmuştur.

Çalışmada kullanılan ZnO/H_2O nanoakışkanı, baz akışkan içerisine nanopartiküllerin homojen bir şekilde dağıldığı tek fazlı bir akışkan olarak modellenmiştir. Bu yaklaşımda, nanoakışkanın efektif termofiziksel özellikleri, nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonuna (φ) bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Nanoakışkanın yoğunluğu (ρ_{nf}) ve özgül ısısı ($c_{p,nf}$), karışım teorisi prensiplerine dayalı klasik bağıntılar kullanılarak sırasıyla Eşitlik 4.14 ve Eşitlik 4.15 ile elde edilmiştir (Aghakhani vd., 2023).

$$\rho_{nf} = \varphi_{nf} + (1 - \varphi)\rho_f \tag{4.14}$$

$$c_{pnf} = \varphi_{nf} + (1 - \varphi)c_{pnf} \tag{4.15}$$

Nanoakışkanın akış ve ısı transferi performansını doğrudan etkileyen dinamik viskozite (μ_{nf}) ve ısıl iletkenlik (k_{nf}) değerleri ise, literatürdeki deneysel verilerle uyumlu ampirik korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. ZnO nanopartikülleri için hacimsel konsantrasyona (φ) bağlı viskozite ve ısıl iletkenlik fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 4.16 ve Eşitlik 4.17'de verilmiştir (Aghakhani vd., 2023).

$$\mu_{nf} = \mu_{nf} * [1 + 32{,}795\varphi - 72{,}14x10^2\varphi^2 + 71{,}46x10^4\varphi^3 - 19{,}41x10^6\varphi^4] \tag{4.16}$$

$$k_{nf} = \frac{(1{,}747x10^4 + \varphi)k_f}{1{,}747x10^4 - 1{,}498x10^5\varphi + 1{,}117x10^6\varphi^2 + 1{,}997x10^7\varphi^3} \tag{4.17}$$

4.1.4 Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin güvenilirliği, ölçüm sistemini oluşturan cihazların hassasiyetine, kalibrasyon durumuna, okuma hatalarına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu çalışmada sunulan deneysel bulguların doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini kanıtlamak amacıyla, ölçülen parametrelerin (sıcaklık, basınç, debi, voltaj, akım vb.) ve bu parametrelerden türetilen boyutsuz sayıların (Reynolds, Nusselt, Sürtünme katsayısı) belirsizlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik analizi hesaplamalarında, çok değişkenli deneysel verilerin hata analizi için literatürde yaygın olarak kabul gören ve Moffat tarafından önerilen kökler toplamının karesi yöntemi kullanılmıştır (Moffat, 1988). Deneylerde kullanılan cihazların belirsizlik oranları Tablo 4.5'te, çıkış parametrelerindeki hata oranı ise Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5 Deneylerde kullanılan cihazların belirsizlik analizi

Cihazlar	Parametreler	Hassasiyet	Belirsizlik Oranı %
T tip ısılçift	Yığık sıcaklık	±0.1 0C	%0,18
	Duvar sıcaklığı	±0.2 0C	%0,55
Debimetre	Debi	±0.1 lt/dk	%0,01
Isıtıcı kablo	Isıtma gücü	±1 W	%1,00
Basınç ölçer	Basınç farkı	±%0,5	%0,55

Tablo 4.6 Çıkış parametrelerindeki hata oranı

Parametre	Hata Oranı %
Isı taşınım katsayısı (h)	%2,55
Nusselt sayısı (Nu)	%2,55
Reynolds sayısı (Re)	%1,00
Darcy sürtünme katsayısı (*f*)	%2,25

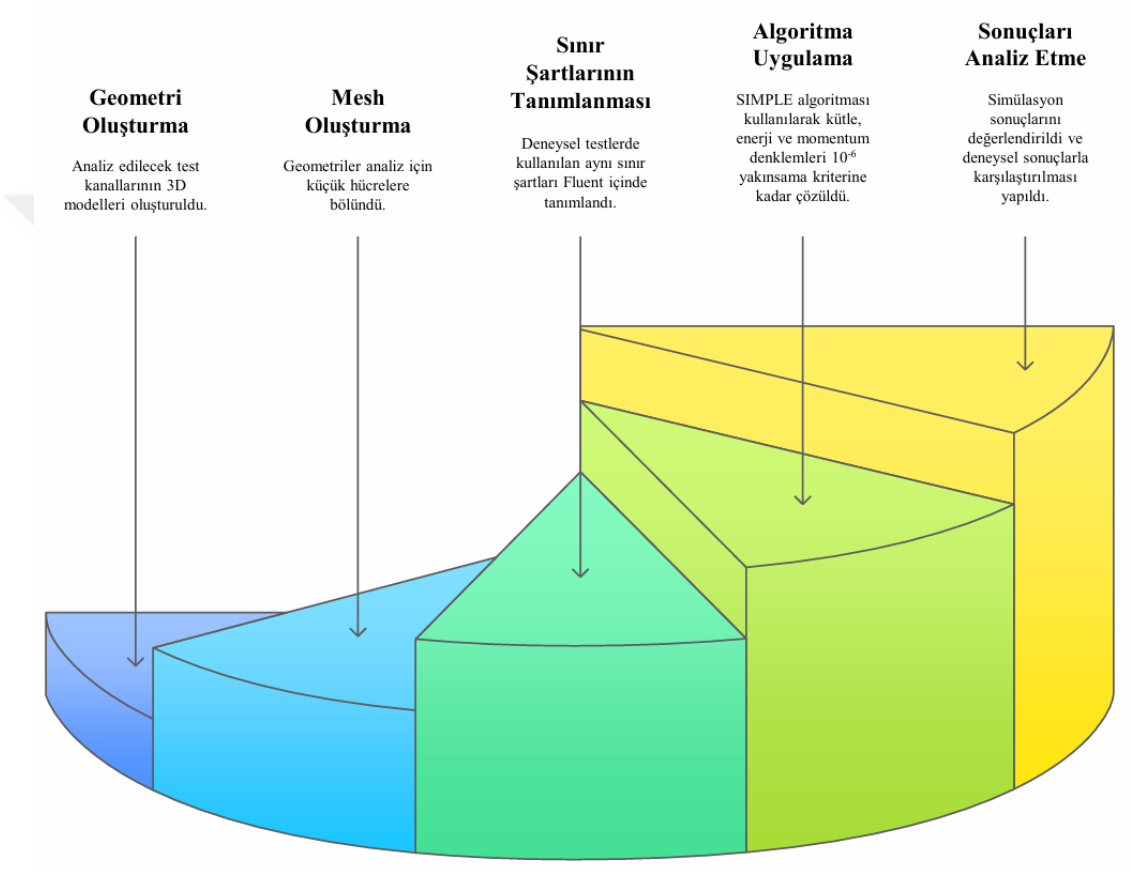
4.2 Sayısal Yöntem

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve ilgili transport olaylarının karmaşık problemlerini bilgisayar tabanlı simülasyonlar aracılığıyla Şekil 4.16'daki süreci takip ederek analiz eden bir mühendislik disiplinidir. Analitik çözümlerin mümkün olmadığı karmaşık geometrilerde, kütle, momentum ve enerji korunum yasalarını ifade eden kısmi diferansiyel denklem setlerinin (Navier-Stokes denklemleri), sayısal yöntemlerle cebirsel denklemlere dönüştürülerek çözülmesine olanak tanır.



Şekil 4.16 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analiz süreci (URL-1, 2016)

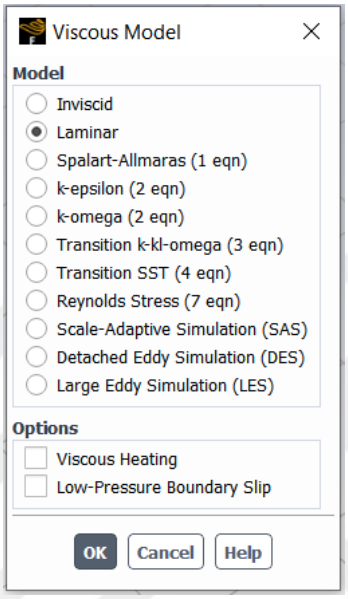
Bu çalışmada, düz ve çukur kanatçıklı boruların ısıl ve hidrolik performansı, sonlu hacimler yöntemine (FVM) dayalı çalışan Ansys Fluent 2024R2 paket programıyla Şekil 4.17'deki çözüm adımları izlenerek incelenmiştir. Analizler; sıkıştırılamaz, Newtonyen ve kararlı rejim akış kabulleri altında gerçekleştirilmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü sırasında ışınım, doğal taşınım ve viskoz yayılım etkileri ihmal edilmiştir.



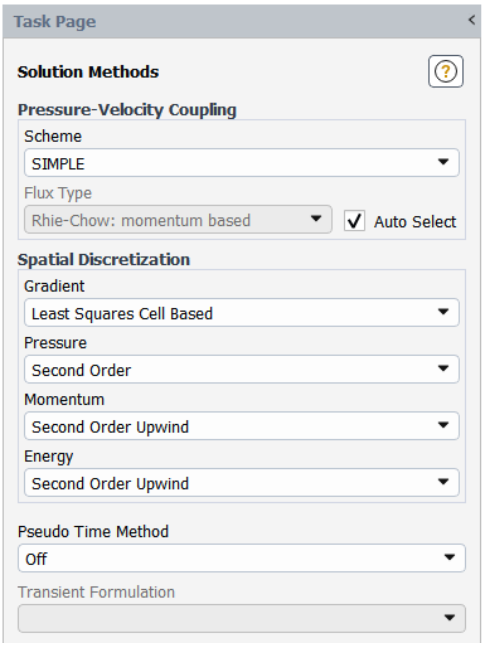
Şekil 4.17 Sayısal analizler süresince takip edilen çözüm adımları

Analiz çözümlerinde Şekil 1.18'de verilen Laminar viskoz model kullanılmıştır. Akış alanının çözümlenmesinde basınç-hız çiftinin ilişkilendirilmesi ve ayrıklaştırılması için Şekil 4.19'daki gibi SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. SIMPLE algoritması, basınç ve hız düzeltmelerini ardışık iterasyonlarla gerçekleştirerek kararlı rejim akış problemlerinde yüksek yakınsama kararlılığı sağlaması ve Coupled çözücülere kıyasla bilgisayar hafızasını daha verimli kullanması nedeniyle bu çalışmada önemli avantajlar sağlamıştır. Momentum ve enerji denklemlerinin ayrıklaştırılmasında, sonuçların doğruluğunu artırmak amacıyla "Second Order Upwind" şeması; gradyan

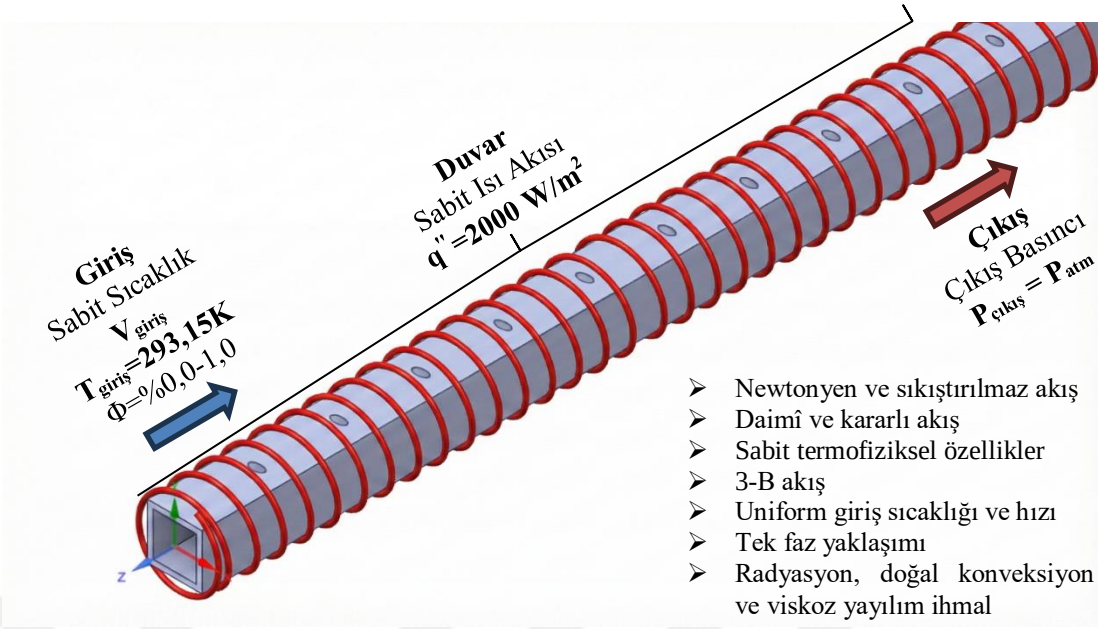
hesaplamalarında ise "Least Squares Cell Based" yöntemi kullanılmıştır. Sayısal analizlerde süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-6} olarak belirlenmiş ve iterasyonlar bu hassasiyete ulaşana kadar sürdürülmüştür. Şekil 4.20'de Sayısal analizde kullanılan kanalın 3 boyutlu görünümü ve sınır şartları, Şekil 4.21'de ise çukur kanatçıklı test kanalının kesit görüntüsü verilmiştir.



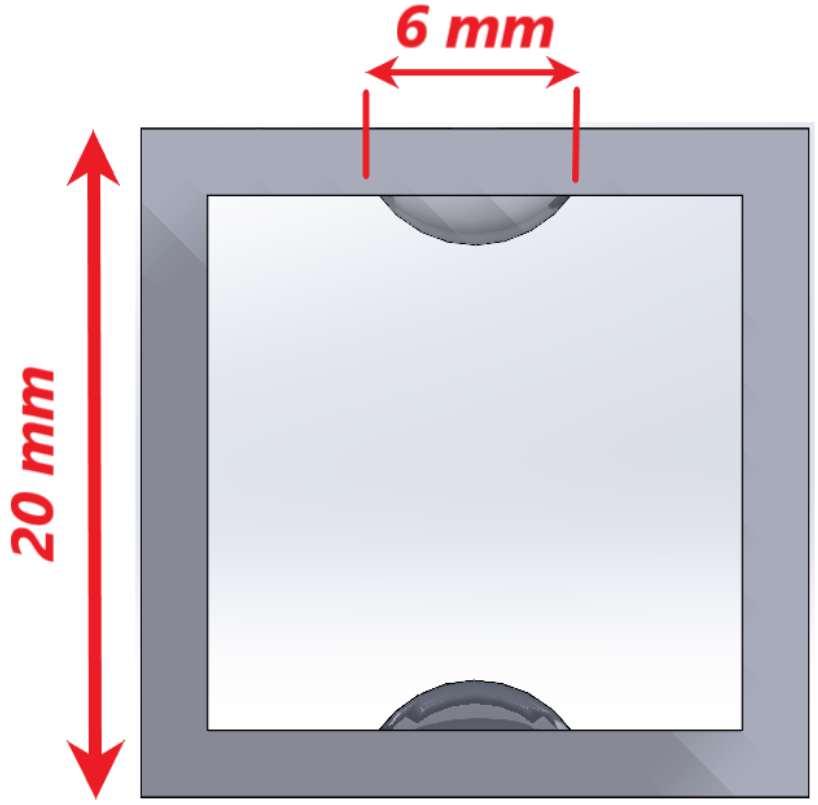
Şekil 4.18 Sayısal analiz çözümlerinde kullanılan viskoz model



Şekil 4.19 Basınç-hız çiftinin ilişkilendirilmesi ve ayrıklaştırılması için kullanılan model



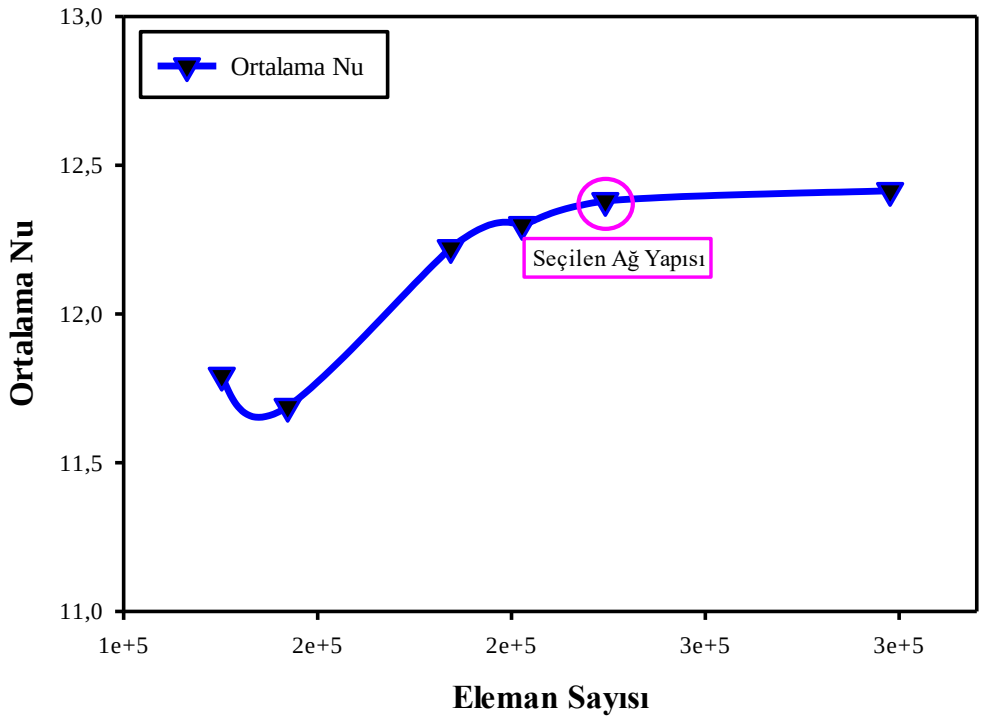
Şekil 4.20 Sayısal analizde kullanılan kanalın 3 boyutlu görünümü ve sınır şartları



Şekil 4.21 Çukur kanatçıklı test kanalının kesit görüntüsü

4.2.1 HAD Analizinde Çözüm Ağının Oluşturulması

Sayısal analiz alanının ayrıklaştırılmasında, Sonlu Hacimler Yöntemi temel alınarak oluşturulan çözüm ağı yapısı kullanılmıştır. Akışkanın katı yüzeyle etkileşiminin kritik olduğu boru cidarları ve özellikle akış ayrılmalarının yaşandığı çukur kanatçık bölgelerinde, sınır tabaka gelişimini doğru çözümleyebilmek adına ağ yapısı sıkılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının eleman sayısından bağımsız olduğunu doğrulamak amacıyla, geometrik karmaşıklığın ve türbülans etkilerinin en yoğun olduğu P/b=10 geometrisi referans alınarak ağ bağımsızlığı çalışması yürütülmüştür. Bu süreçte, artan eleman sayılarına karşılık ortalama Nusselt sayısının (Nu) değişimi Şekil 4.21 üzerinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, düşük eleman sayılarında Nu değerinde dalgalanmalar görülürken, ağ yapısı sıkılaştıkça sonucun asimptotik olarak sabitlendiği gözlemlenmiştir. Yapılan iterasyonlar sonucunda, 297690 eleman sayısından sonra çözüm sonuçlarındaki değişimin ihmal edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle hem hesaplama maliyetini optimize etmek hem de yüksek doğrulukta sonuç almak adına tüm analizler için 297690 elemanlı ağ yapısı "Seçilen Ağ Yapısı" olarak belirlenmiş ve sonraki analizlerde bu yoğunluk temel alınmıştır.



Şekil 4.22 Sayısal analiz için yapılan ağ bağımsızlık çalışması

4.2.2 Korunum Denklemleri

Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizler, akışkanın sıkıştırılamaz ve Newtonyen özellikte olduğu, akışın ise laminer rejimde ve kararlı koşullarda gerçekleştiği kabulleri üzerine kurgulanmıştır. HAD simülasyonlarında yerçekimi ve viskoz yayılım etkileri ihmal edilerek, sistemin fiziksel davranışını yöneten temel korunum yasaları üç boyutlu Kartezyen koordinat sisteminde çözülmüştür.

Söz konusu kabuller ışığında, birim hacimdeki kütlenin zamanla değişmediğini ve giren kütlenin çıkan kütleye eşit olduğunu ifade eden süreklilik denklemi Eşitlik 4.18'de sunulmuştur:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \tag{4.18}$$

Akışkanın hareketini tanımlayan ve Newtonyen akışkanlar için viskoz gerilmeler, atalet kuvvetleri ve basınç kuvvetleri arasındaki dengeyi kuran momentum korunum denklemleri (Navier-Stokes), genel formda Eşitlik 4.19 ile ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial (U_i U_x)}{\partial x} + \frac{\partial \left(U_i U_y\right)}{\partial y} + \frac{\partial (U_i U_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial i} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial \tau_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yi}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zi}}{\partial z}\right) \tag{4.19}$$

Burada U, boyutsuz hız bileşenlerini; P, boyutsuz basıncı ve τ, boyutsuz kayma gerilmesi tensörünü ifade etmektedir. Sistemin termal davranışını analiz etmek amacıyla, ısı transferini konveksiyon ve kondüksiyon mekanizmaları üzerinden modelleyen enerji denklemi ise Eşitlik 4.20'de verildiği gibidir:

$$\frac{\partial (U_x T)}{\partial x} + \frac{\partial \left(U_y T\right)}{\partial y} + \frac{\partial (U_z T)}{\partial z} = \frac{1}{RePr}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{4.20}$$

Bu denklemde T boyutsuz sıcaklığı ifade ederken, Pr (Prandtl sayısı) momentum yayılımının ısıl yayılıma oranını göstermektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, ısı transferi iyileştirme tekniklerinden pasif yöntemler sınıfına giren yüzey modifikasyonu (çukur kanatçıklı test kanalları) ve yeni nesil ısı transferi akışkanlarından olan ZnO/H_2O nanoakışkanının birlikte kullanımının, sistemin termohidrolik performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Çalışma kapsamında, pürüzsüz ve farklı geometrik parametrelere sahip çukur kanatçıklı test kanalları içerisinde gerçekleştirilen akış ve ısı transferi deneylerinden elde edilen bulgular ile Ansys Fluent 2024R2 yazılımı kullanılarak oluşturulan sayısal modelden elde edilen sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Deneysel çalışmalar, akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş ve ısıl olarak gelişmekte olduğu sınır şartları altında, laminer akış rejimini kapsayan $500 \leq Re \leq 2000$ Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Isı transferi akışkanı olarak, temel akışkan saf su ve buna belirli oranlarda ZnO (Çinko Oksit) nanopartikülleri eklenerek hazırlanan ve hacimsel konsantrasyonu %1 olan ZnO/H_2O nanoakışkanı kullanılmıştır. Yüzey geometrisinin etkisini belirlemek adına, DTK referans alınmış ve farklı adım oranlarına (P/b=20,15,10) sahip ÇTK'ların Nusselt sayısı, sürtünme faktörü (*f*) ve performans değerlendirme kriteri (PDK) üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Öncelikle düz test kanalı için gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları sunulmuş, ardından ZnO/H_2O nanoakışkanının ve çukur kanatçık geometrisinin ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri tablolar eşliğinde tartışılmıştır. Elde edilen tüm bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanarak, bu çalışmanın literatüre katkısı ve özgün değeri ortaya konulmuştur.

5.1 Deneysel Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Deney düzeneğinin kurulum aşaması tamamlandıktan sonra, sistemin kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol etmek amacıyla öncelikle kapsamlı bir sızdırmazlık testi ve ölçüm cihazlarının kalibrasyon kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Sistemin güvenilirliği teyit edildikten sonra, deneysel sürecin ilk basamağı olan validasyon çalışmalarına başlanmıştır. Bu kapsamda, DTK içerisindeki su akışı referans alınarak, elde edilen ısı transferi ve basınç düşüşü verilerinin literatürdeki

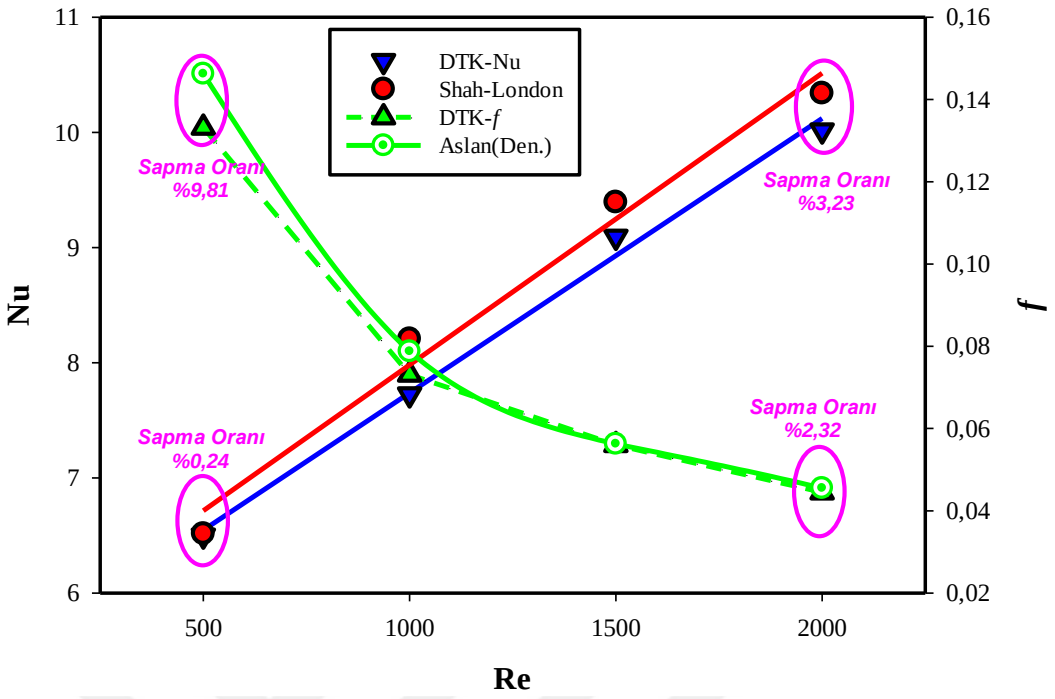
çalışmalarla uyumu test edilmiştir. Validasyon sürecinde literatür verileriyle yüksek mertebede uyum yakalanmasının ardından, belirlenen 32 farklı durum için deneylere geçilmiştir. Deneyler; 500≤Re≤2000 Reynolds sayısı aralığında, su ve ZnO/H_2O nanoakışkanı kullanılarak, DTK ve farklı çukur kanat adım aralığı parametresine sahip ÇTK üzerinde sistematik bir sırayla yürütülmüştür.

5.1.1 Su Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Deneysel Bulguları

Deneysel çalışmaların başlangıç aşamasında, kurulan deney düzeneğinin güvenilirliğini ve ölçüm sisteminin hassasiyetini doğrulamak amacıyla düz test kanalı (DTK) içerisindeki su akışı referans alınarak incelenmiştir. Deneyler boyunca kare kesitli test kanalının dış yüzeyine sabit ve homojen bir ısı akısı uygulanmıştır. Akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısıl olarak ise gelişmekte olduğu sınır şartları altında yürütülen çalışmalar, 500≤Re≤2000 aralığını kapsayan laminer akış rejiminde gerçekleştirilmiştir.

DTK içinde su akışı için elde edilen deneysel Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü verilerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 5.1'de sunulmuştur. Sistemin doğruluğunu test etmek adına, Nusselt sayısı için deneysel bulgular literatürde laminer akış şartları için geçerliliği kabul görmüş Shah-London korelasyonu, sürtünme faktörü için Aslan deneysel çalışmaları ile karşılaştırılarak ile aynı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Şekil 5.1 incelendiğinde, teorik beklentilerle uyumlu olarak artan Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının da artış gösterdiği belirlenmiştir. Literatürdeki Shah-London bağıntısı ile deneysel veriler arasındaki ortalama sapma oranı %2,97 olarak hesaplanmıştır. Bu sapma oranı, kurulan deney düzeneğinin ısı transferi ölçümlerinde yüksek doğruluk sağladığını kanıtlamaktadır (Shah ve London, 2014).

Hidrolik performans açısından değerlendirildiğinde ise, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte artan ortalama akışkan hızı, beklendiği üzere Darcy sürtünme faktörünün azalmasına neden olmuştur. Deneysel sürtünme katsayısı verileri Aslan deneysel çalışması ile kıyaslandığında, azalma eğilimlerinin birbiriyle örtüştüğü görülmüştür. Bu karşılaştırma sonucunda, teorik ve deneysel sürtünme katsayısı değerleri arasındaki ortalama sapmanın %5,29 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir (Aslan, 2021).

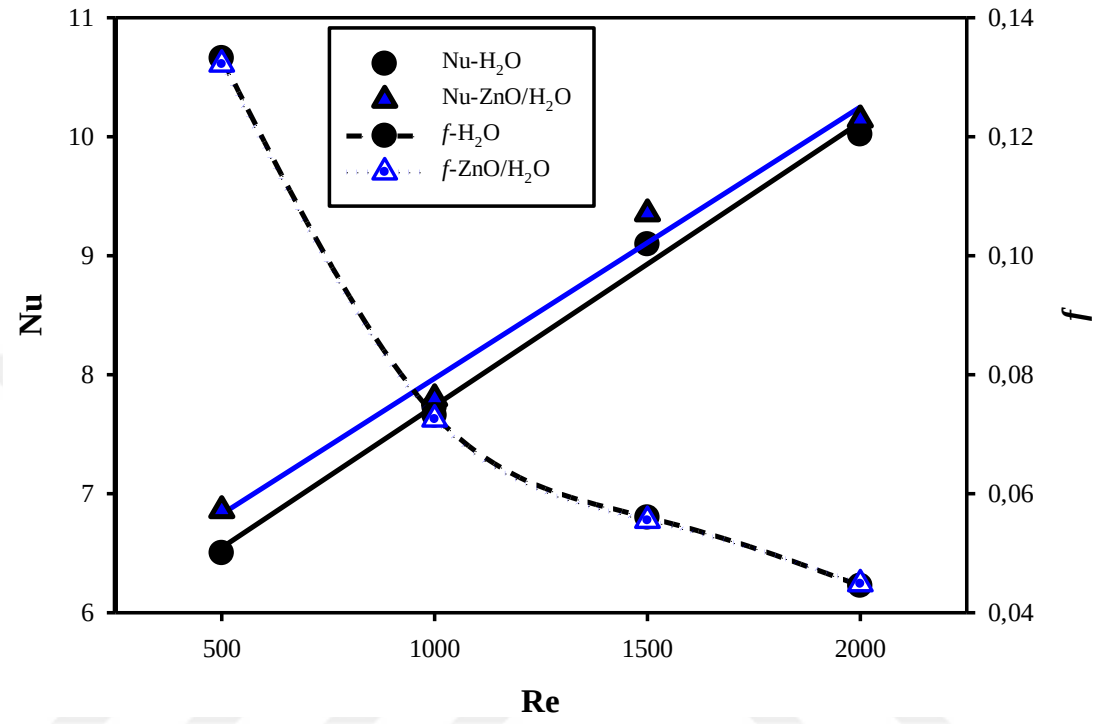


Şekil 5.1 DTK içindeki su akışında Nu ve f sonuçlarının literatür ile kıyaslanması

DTK içerisinde gerçekleştirilen deneylerde, su ve %1,0 hacimsel konsantrasyona sahip ZnO/H_2O nanoakışkanının ortalama Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 5.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikten de açıkça görüldüğü üzere, her iki akışkan için de artan Reynolds sayısı ile Nusselt sayısında artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar aynı çalışma koşulları altında, nanoakışkan kullanımının suya kıyasla ısı transferi performansında belirgin bir iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır. Bu artışın temel nedenlerinden biri, baz akışkan olan suya kıyasla asılı haldeki ZnO nanopartiküllerinin çok daha yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmasıdır (Tawfik, 2017). Ayrıca, nanopartiküllerin akışkan içerisindeki rastgele hareketleri ve bu hareketin yarattığı mikro ölçekli türbülans etkileri, sınır tabakanın incelmesine ve akışkan karışımının artmasına katkıda bulunarak ısı taşınım mekanizmasını güçlendirmiştir (Parsaiemehr vd., 2018).

Şekil 5.2'deki veriler nicel olarak incelendiğinde; ısı transferindeki en yüksek bağıl artış Re=500 değerinde yaklaşık %5,26 olarak kaydedilirken, tüm Reynolds aralığı boyunca ortalama Nusselt artışı %2,29 seviyesinde belirlenmiştir. Hidrolik performans açısından ise, nanoakışkan içerisindeki katı partikül yoğunluğunun viskoziteyi artırması sonucu, ortalama Darcy sürtünme katsayısında suya kıyasla %0,82 oranında

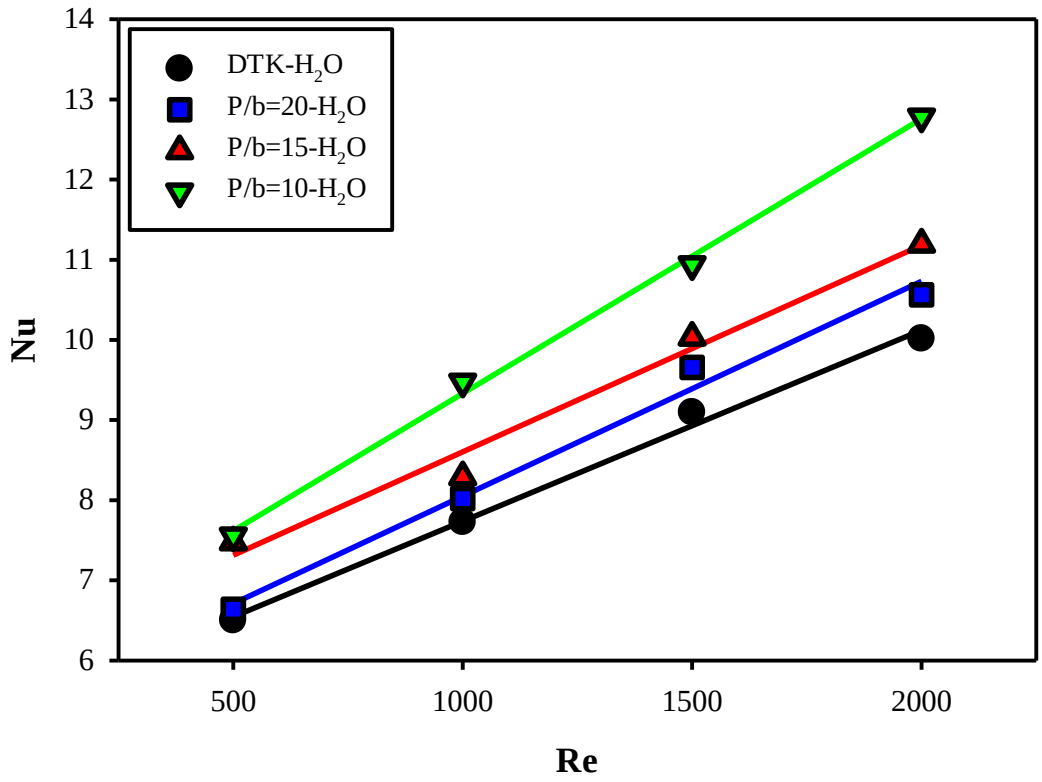
bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, ısı transferindeki iyileşmenin bir bedeli olarak değerlendirilse de elde edilen ısıl kazanç göz önüne alındığında kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.



Şekil 5.2 DTK içindeki su ve ZnO/H_2O nanoakışkanı için Nu ve *f* değerlerinin kıyaslanması

Çalışmanın kare kesitli DTK içi akış ve nanoakışkan etkisi şartlarında incelenmesinin ardından; P/b=20, P/b=15 ve P/b=10 adım oranlarına sahip çukur kanatçıkların ısı transferi üzerindeki etkisi Şekil 5.3'te sunulmuştur. Üç farklı geometrik konfigürasyon (P/b=20-15-10) altında elde edilen ısıl davranışın, DTK ve su akışına kıyasla değişimi Şekil 5.3 üzerinde detaylandırılmıştır. Şekil 5.3 incelendiğinde, kanatçık adım oranının azalmasıyla birlikte ortalama Nusselt sayısı değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Azalan P/b oranının, yani birim yüzeydeki çukur kanatçık sayısının artmasının ısı transferini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Buradaki artış, çukur kanatçık geometrileri sayesinde hidrodinamik sınır tabakanın sürekli olarak bozulması, akışın yüzeyden ayrılarak tekrar tutunması ve çukur bölgelerinde oluşan ikincil girdapların akışkan karışımını artırması sonucu meydana gelmiştir (Mitsudharmadi vd., 2009). Tüm durumlar için artan Reynolds sayısı beraberinde Nusselt sayısında artışı sağlamıştır. Şekil 5.3 analiz edildiğinde, DTK içi su akışı ve

P/b=10 kanatçık yapısının birlikte kullanımı ile ısı transferindeki en yüksek artış Re=2000 değerinde %21,63 olarak elde edilmiştir. Ayrıca aynı şartlarda P/b=10 kanatçık yapısının kullanılmasıyla ısı transferinde tüm Reynolds sayısı aralığı boyunca ortalama artış %16,37 olarak tespit edilmiştir. DTK'ya kıyasla en seyrek kanatçık yapısına sahip P/b=20 durumu incelendiğinde ise ısı transferinde ortalama %4,16 oranında bir artış sağlanmıştır.

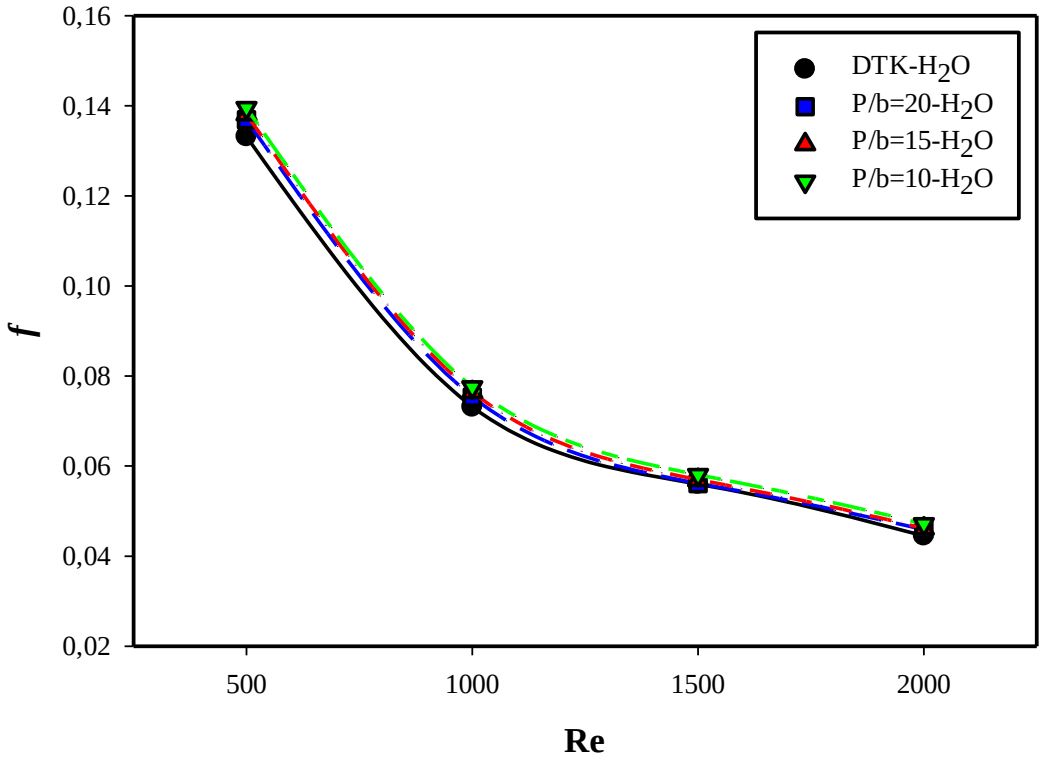


Şekil 5.3 DTK ve ÇTK içindeki su akışında deneysel Nu değerlerinin kıyaslanması

DTK ve farklı adım oranlarına sahip çukur kanatçıklı borular içerisinde su akışında elde edilen Darcy sürtünme katsayısı (f) değişimleri Şekil 5.4'te sunulmuştur. Elde edilen veriler incelendiğinde, tüm kanal tipleri için artan Reynolds sayısı ile sürtünme katsayısının beklendiği üzere azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Boru yüzeyine uygulanan modifikasyonların etkisi değerlendirildiğinde; çukur kanatçıkların akış alanında yarattığı form direnci ve tetiklediği ikincil akışlar, sürtünme katsayısının DTK'ya kıyasla önemli ölçüde artmasına neden olmuştur (L. Luo vd., 2016). Kanatçık adım oranının azalması, yani birim yüzeydeki çukur yoğunluğunun artması,

hidrodinamik sınır tabakanın daha sık bozulmasına ve akış direncinin yükselmesine yol açmaktadır.

DTK verileri referans alındığında; P/b=20, 15 ve 10 geometrileri için sürtünme katsayısındaki ortalama artış oranları sırasıyla %2,54, %3,34 ve %5,92 olarak hesaplanmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri, akışın en fazla bozulmaya uğradığı en sık kanatçık yapısına sahip P/b=10 durumunda kaydedilmiştir. Basınç düşüşündeki bu artış, pasif ısı transferi tekniklerinde beklenen bir durum olup, ısıl performanstaki iyileşme ile değerlendirilmektedir.

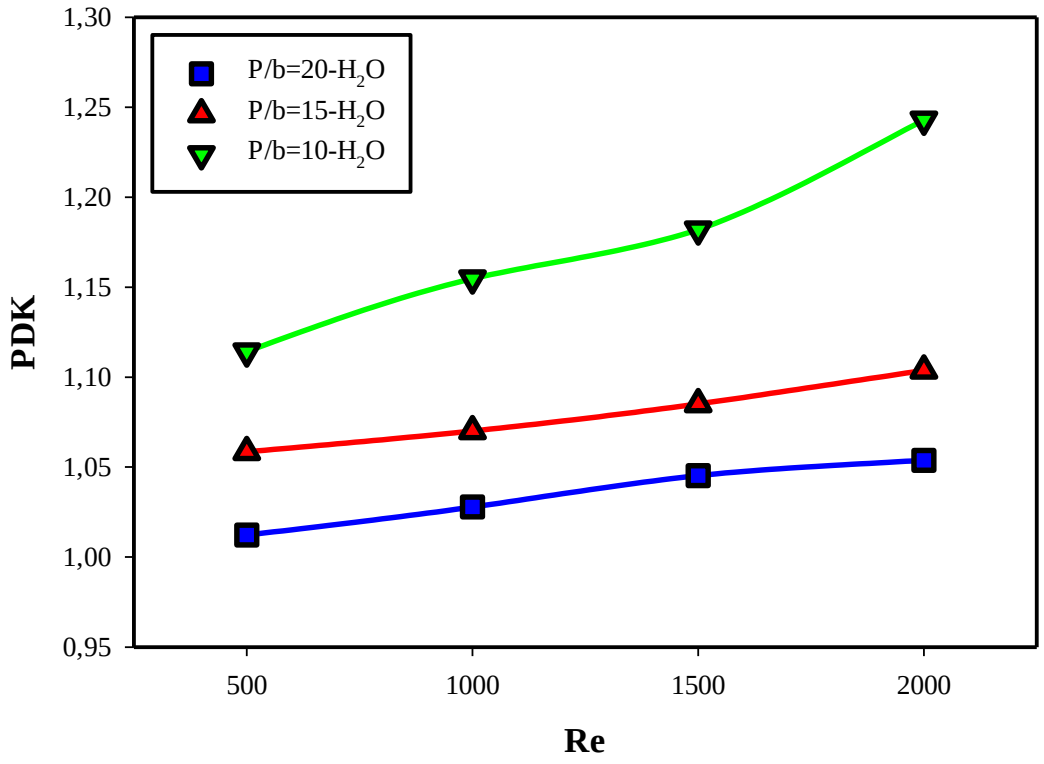


Şekil 5.4 DTK ve ÇTK içindeki su akışında deneysel *f* değerlerinin kıyaslanması

DTK ve farklı adım oranlarına sahip çukur kanatçıklı kanalların termohidrolik performans değerleri, aynı pompalama gücünde elde edilen ısı transferi kazancını ifade eden Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) üzerinden karşılaştırılmaktadır. Bu kriter, yüzey modifikasyonlarının sisteme getirdiği ısıl kazanç ile neden olduğu sürtünme artışı arasındaki dengeyi göstermektedir (Firoozi vd., 2020). Şekil 5.5'te sunulan grafik incelendiğinde, DTK referans alındığında tüm ÇTK konfigürasyonları

için elde edilen PDK değerlerinin 1,0'in üzerinde olduğu görülmüştür. Bu sonuç, çukur kanatçıkların yarattığı ısı transferi artışının, sürtünme katsayısındaki artışı tolere etmeyi başardığını göstermektedir.

Özellikle Re=2000 değerinde ve P/b=10 geometrisinde, sürtünme katsayısındaki artış en yüksek seviyede olmasına rağmen, ısı transferi mekanizmasındaki iyileşme çok daha baskın gelmiştir. Bu sayede, hidrolik dirençteki artışa rağmen sistemin genel enerji verimliliği korunmuş ve su akışında ısıl performans açısından en verimli geometrinin P/b=10 olduğu tespit edilmiştir. Daha seyrek kanatçık yapısına sahip P/b=20 ve P/b=15 durumlarında da sürtünme faktörü daha düşük olmakla birlikte, ısıl kazancın da oransal olarak azalması nedeniyle PDK değerleri 1,0'in üzerinde ancak P/b=10 durumuna kıyasla daha düşük seviyelerde seyretmiştir. Sonuç olarak, incelenen Reynolds aralığında ve su akışında çukur kanatçık kullanımı, basınç düşüşünü artırmasına rağmen sağladığı yüksek ısı transferi performansı sayesinde termodinamik açıdan uygulanabilir ve verimli bir pasif yöntem olduğunu kanıtlamıştır.

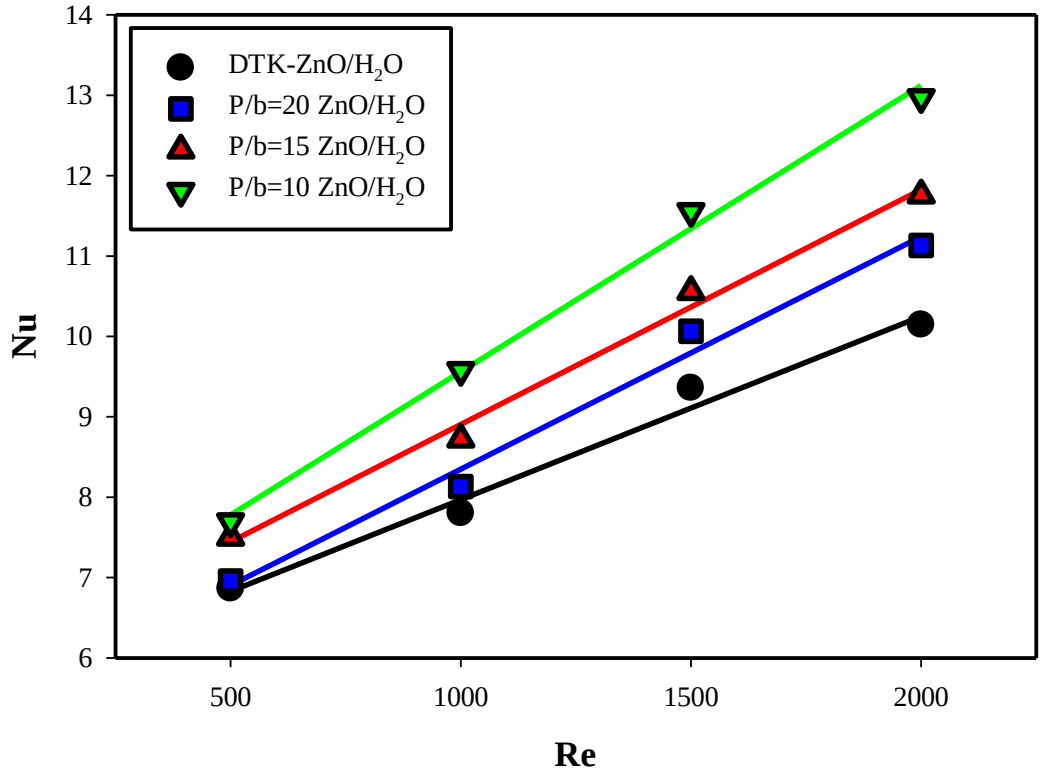


Şekil 5.5 ÇTK içindeki su akışında deneysel PDK değerlerinin kıyaslanması

5.1.2 Nanoakışkan Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Deneysel Bulguları

Şekil 5.6'da sunulan grafik, 500≤Re≤2000 Reynolds aralığında ZnO/H_2O nanoakışkanı için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değişimlerini göstermektedir. Grafik incelendiğinde, ZnO/H_2O nanoakışkanı için de Reynolds sayısının artışıyla birlikte Nusselt sayısının arttığı, ancak nanoakışkan eğrilerinin su eğrisine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek değerlerde seyrettiği görülmektedir. Bunun durumun nedeni ZnO nanopartiküllerinin ısıl iletkenlik katsayısının, baz akışkan olan suya kıyasla çok daha yüksek olması, süspansiyonun efektif ısıl iletkenliğini artırmasıdır. Bu durum, akışkan ile kanal duvarı arasındaki ısı geçiş direncini düşürerek taşınım katsayısını yükseltmektedir. Ayrıca akışkan içerisinde asılı halde bulunan nano boyutlu ZnO partikülleri, sürekli ve rastgele bir titreşim hareketi sergilemektedir. Bu hareketlilik, akışkan içerisinde mikro ölçekli bir çalkalanma etkisi yaratarak, cidar yüzeyinde oluşan viskoz alt tabakanın ve ısıl sınır tabakanın bozulmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca partiküllerin bu kaotik hareketi, akışkanın kendi içerisindeki enerji difüzyonunu hızlandırarak sıcaklık gradyanlarının daha etkin taşınmasına olanak tanımaktadır.

Grafikteki veriler nicel olarak değerlendirildiğinde; DTK ve ÇTK içerisindeki su akışı referans alındığında, ZnO/H_2O nanoakışkanının kullanımı Re=2000 değerinde Nusselt sayısında %22,78 oranında bir artış sağlamıştır. Reynolds sayısı arttıkça, akışkanın hızı ve türbülans şiddeti artmakta, bu da nanopartiküllerin karışım etkisini güçlendirerek ısı transferi artış oranını maksimize etmektedir.

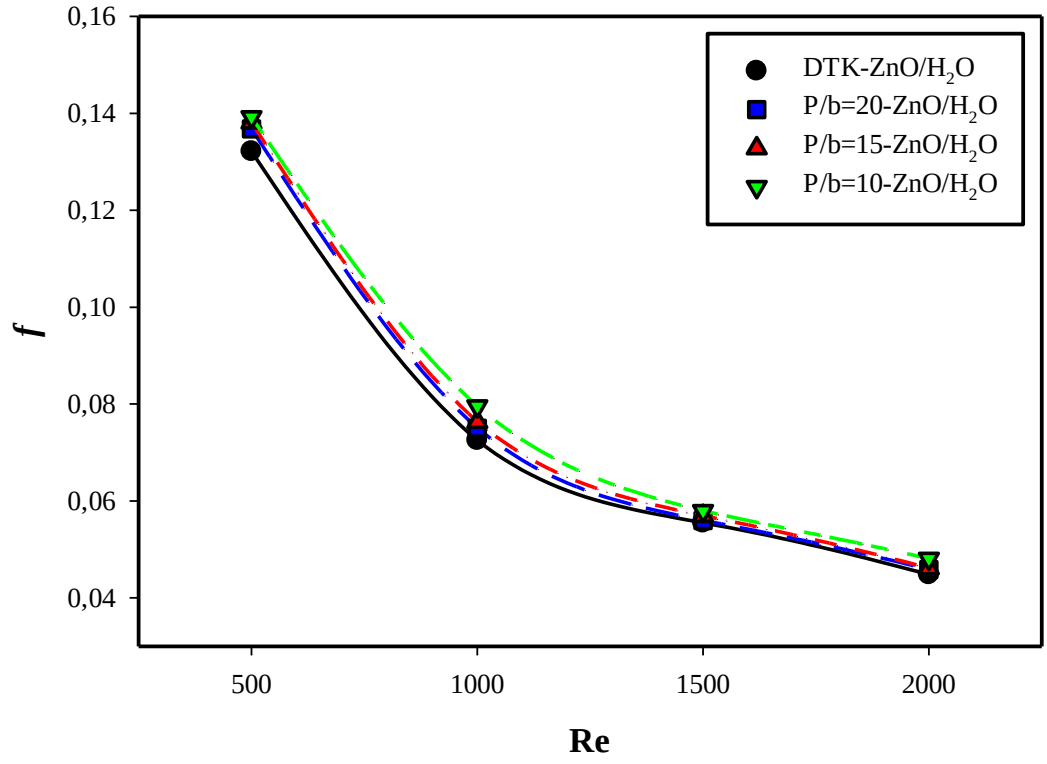


Şekil 5.6 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel Nu değerlerinin kıyaslanması

Farklı adım oranlarına sahip ÇTK'ların ve DTK'nın Darcy sürtünme katsayısı (f) değişimleri, $500 \leq Re \leq 2000$ aralığında deneysel olarak ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 5.7'de sunulmuştur. Tüm geometriler için Reynolds sayısının artışı ile sürtünme katsayısının ters orantılı olarak azaldığı, ancak eğimlerin ve büyüklüklerin yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak farklılaştığı tespit edilmiştir.

Kanatçık adım oranının azalması, birim yüzey alanındaki çukur yoğunluğunu artırmış; bu durum akışın form direncine maruz kalma sıklığını yükselterek basınç düşüşünü artırmıştır. En seyrek kanatçık yapısına sahip P/b=20 geometrisinde, DTK'ya kıyasla sürtünme katsayısında ortalama %2,44 oranında bir artış kaydedilmiştir.

Kanatçıkların sıklaştığı P/b=10 konfigürasyonunda, akışın sınır tabakasının sürekli bozulması ve oluşan yoğun girdaplar nedeniyle hidrolik direnç maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu geometride, DTK'ya göre sürtünme katsayısındaki artış oranı Re=1000 noktasında %8,82 ile en yüksek değerine ulaşmış; tüm Reynolds aralığı boyunca ortalama artış ise %6,22 olarak hesaplanmıştır.

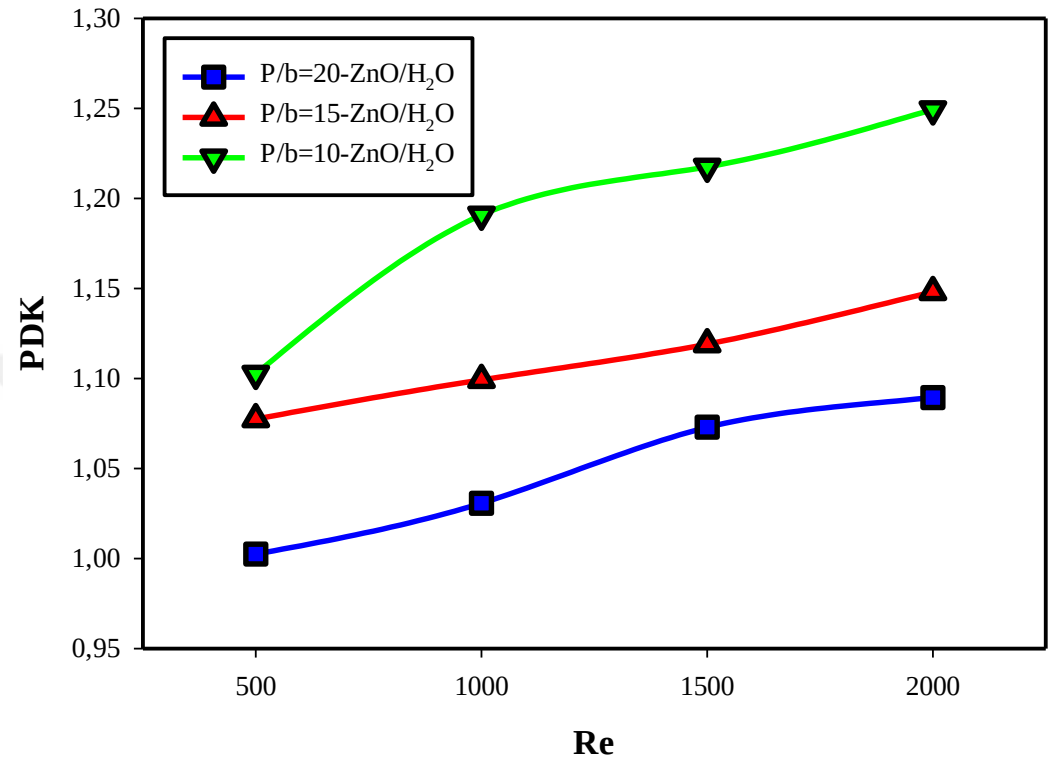


Şekil 5.7 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel *f* değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.8'de, DTK ve farklı adım oranlarına sahip ÇTK içerisinde ZnO/H_2O nanoakışkanının kullanımıyla elde edilen Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) değerlerinin Reynolds sayısı $500 \leq Re \leq 2000$ ile değişimi sunulmuştur. Grafik genelinde, analiz edilen tüm parametre aralığı için PDK değerlerinin 1,0'in üzerinde seyrettiği görülmektedir. Bu durum, nanoakışkan kullanımı ve yüzey modifikasyonunun yarattığı sürtünme artışının, sağlanan yüksek ısıl kazanç tarafından fazlasıyla kompanse edildiğini ve sistemin termodinamik açıdan verimli olduğunu kanıtlamaktadır.

En yüksek termohidrolik performans, kanatçık yoğunluğunun en fazla olduğu P/b=10 geometrisinde ve Re=2000 değerinde elde edilmiştir. Bu noktada, sistemin PDK değeri 1,25 seviyesine ulaşmıştır. Yani, DTK'ya kıyasla harcanan birim pompalama gücü başına elde edilen ısı transferi, yaklaşık %25 oranında artmıştır. Daha seyrek kanatçık yapısına sahip P/b=20 ve P/b=15 konfigürasyonları incelendiğinde, bu geometrilerin ortalama PDK değerlerinin sırasıyla 1,05 ve 1,11 olduğu belirlenmiştir. P/b=10 geometrisinin ortalama PDK değeri ise 1,19 olarak hesaplanmıştır. P/b=10 ile

P/b=20 durumları karşılaştırıldığında, sık kanatçık kullanımının sürtünmeyi artırmasına rağmen sistemin genel verimliliğinde yaklaşık %11,87 oranında ek bir iyileşme sağladığı görülmüştür.



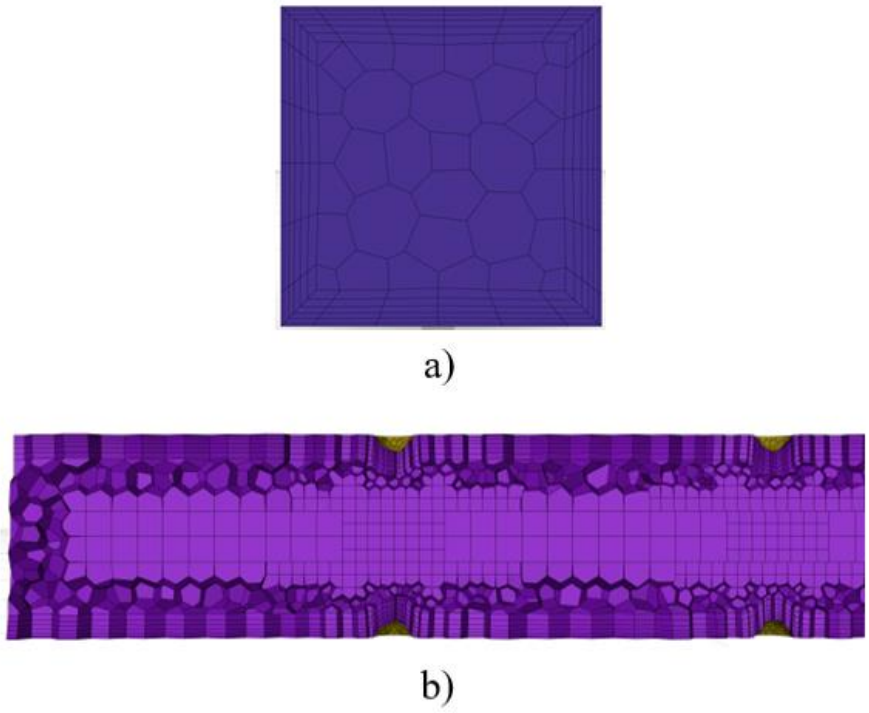
Şekil 5.8 ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel PDK değerlerinin kıyaslanması

5.2 Sayısal Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Gerçekleştirilen sayısal analizlerde çözüm süreci; akışkan hareketini ve ısı transferini yöneten süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemlerinin eş zamanlı olarak çözülmesi esasına dayanmaktadır. Üç boyutlu analizler; sıkıştırılamaz, Newtonyen ve kararlı rejim akış kabulleri altında, Ansys Fluent 2024R2 çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında viskoz yayılım, ışınım ve doğal taşınım etkileri ihmal edilmiştir.

Analizlerin güvenilirliğini sağlamak adına öncelikle ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. En sık çukur kanat geometrisine sahip kanal için en zorlu yakınsama koşullarını temsil eden en yüksek akış hızında (Re=2000) testler yapılarak, Şekil 5.9'da gösterilen optimum ağ yapısı belirlenmiştir. Optimum ağ yapısının elde

edilmesinin ardından; DTK ve farklı adım oranlarına sahip ÇTK içerisinde hem su hem de ZnO/H_2O nanoakışkanının akış ve ısı transferi davranışlarını incelemek üzere parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

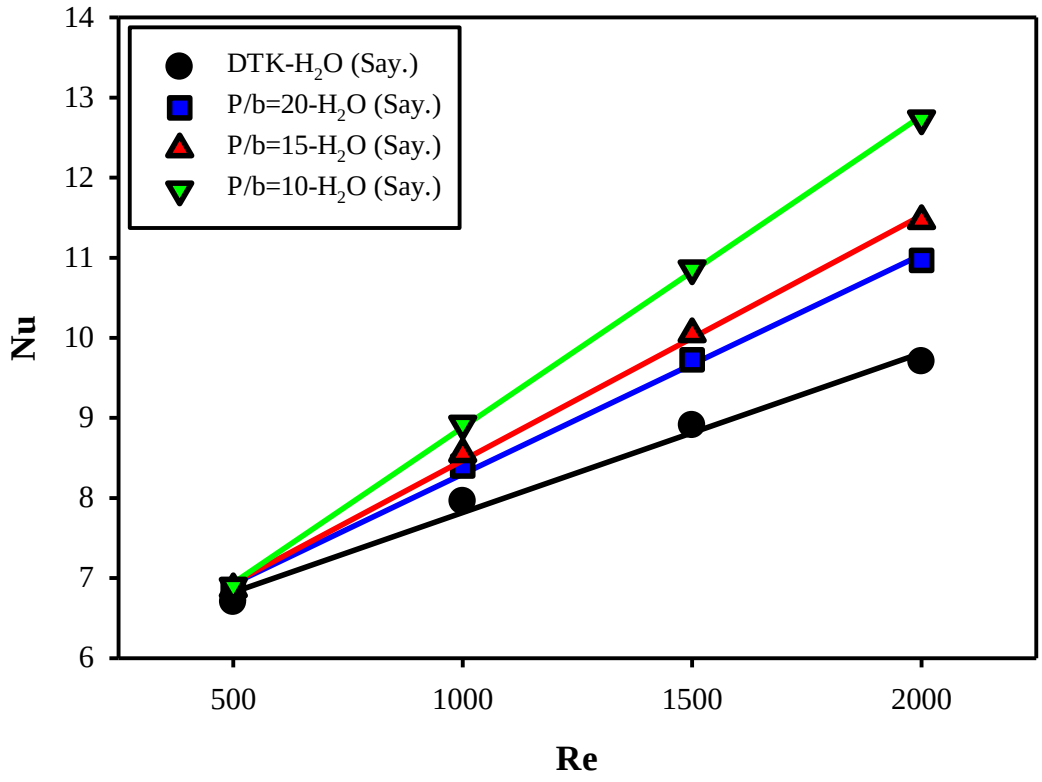


Şekil 5.9 Seçilen ağ yapısının a) ön görünüşü, b) kesit görünüşü

5.2.1 Su Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Sayısal Bulguları

Ansys Fluent 2024R2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen ortalama Nusselt sayısı (Nu) değişimleri, su akışı için Reynolds sayısının (Re) fonksiyonu olarak Şekil 5.10'da sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, DTK ve ÇTK geometrilerinin tamamında, Reynolds sayısının artışıyla birlikte Nusselt sayısının beklendiği üzere artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Grafikte referans olarak alınan DTK, incelenen tüm Reynolds aralığında en düşük ısı transferi performansını sergilemiştir. Buna karşın, test kanalı yüzeyine entegre edilen çukur kanatçıklar, ısı transferi yüzey alanını artırarak ve akış yapısını değiştirerek Nusselt DTK'ya göre belirgin seviyelerde yukarı taşımıştır. Kanatçıklar arası mesafeyi ifade eden adım

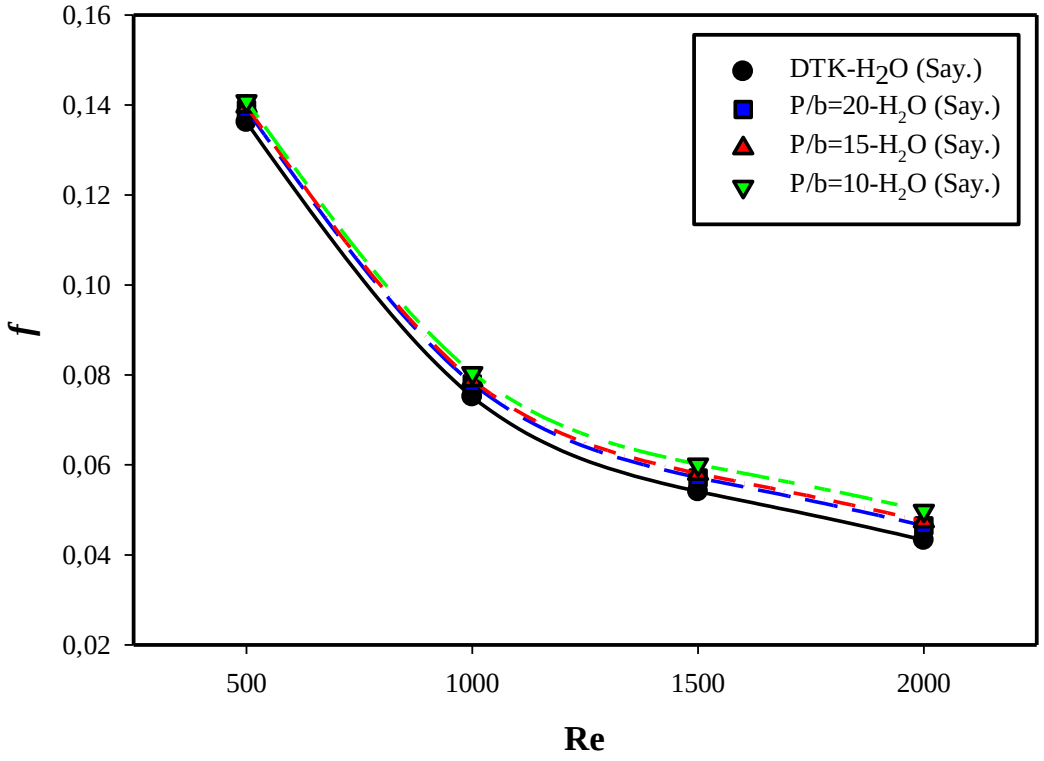
oranının azalması yani birim yüzeydeki çukur yoğunluğunun artması, ısı transferi katsayısını maksimize etmiştir. P/b=10 geometrisi, akışın hidrodinamik ve ısıl sınır tabakasını en sık aralıklarla bozarak ve çukur bölgelerinde yoğun resirkülasyon bölgeleri oluşturarak en yüksek Nusselt değerlerini sağlamıştır. P/b=20, P/b=15 ve P/b=10 adım oranına sahip ÇTK'lardaki Nusselt artışı DTK'ya göre Re=2000 akış hızında kıyaslandığında sırasıyla, %11,49, %15,33 ve %23,78 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.10 DTK ve ÇTK içindeki su akışında sayısal Nu değerlerinin kıyaslanması

Ansys Fluent 2024R2 kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen Darcy sürtünme katsayısı (*f*) değişimleri, Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak Şekil 5.11'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, DTK hem de farklı adım oranlarına sahip ÇTK'lar için, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının beklendiği üzere azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu davranış, laminer akış rejiminde atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere baskın gelmeye başlamasıyla açıklanabilir.

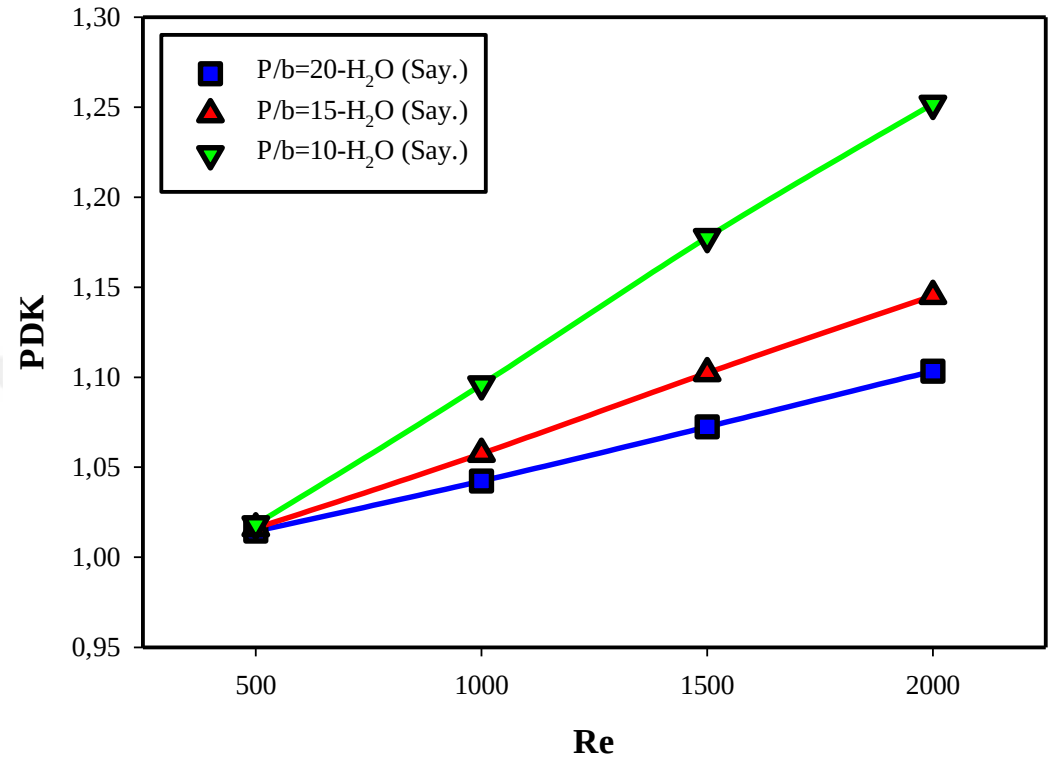
Kanatçıkların en sık yerleştirildiği P/b=10 geometrisi, akışın en fazla bozulmaya uğradığı durum olduğu için en yüksek sürtünme katsayısı değerlerini vermiştir. Sayısal verilere göre, Re=2000 şartlarında P/b=10 geometrisindeki sürtünme faktörü, DTK'ya kıyasla %13,12 oranında daha yüksek bulunmuştur. Sürtünme katsayısı büyüklükleri açısından geometriler; P/b=10> P/b=15> P/b=20> DTK şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 5.11 DTK ve ÇTK içindeki su akışında sayısal *f* değerlerinin kıyaslanması

Ansys Fluent 2024R2 kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, farklı adım oranlarına sahip çukur kanatçıklı boruların su akışı altındaki termohidrolik performansları, Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) üzerinden değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 5.12'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, tüm parametrik çalışma aralığında (500≤Re≤2000) ve tüm çukur kanatçık konfigürasyonlarında PDK değerlerinin 1,0'in üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, çukur kanatçıkların akış direncini artırmasına rağmen, ısı transferi mekanizmasında sağladıkları iyileşmenin çok daha baskın olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla, önerilen pasif ısı transferi teknikleri termodinamik açıdan verimli ve uygulanabilirdir. P/b=10 geometrisi, sürtünme katsayısındaki artışın en yüksek olduğu durum olmasına rağmen, ısı

transferini o denli artırmıştır ki sistemin genel verimliliği en üst düzeye çıkmıştır. Sayısal verilere göre, Re=2000 noktasında P/b=10 için PDK değeri 1,25 seviyesine ulaşmıştır.

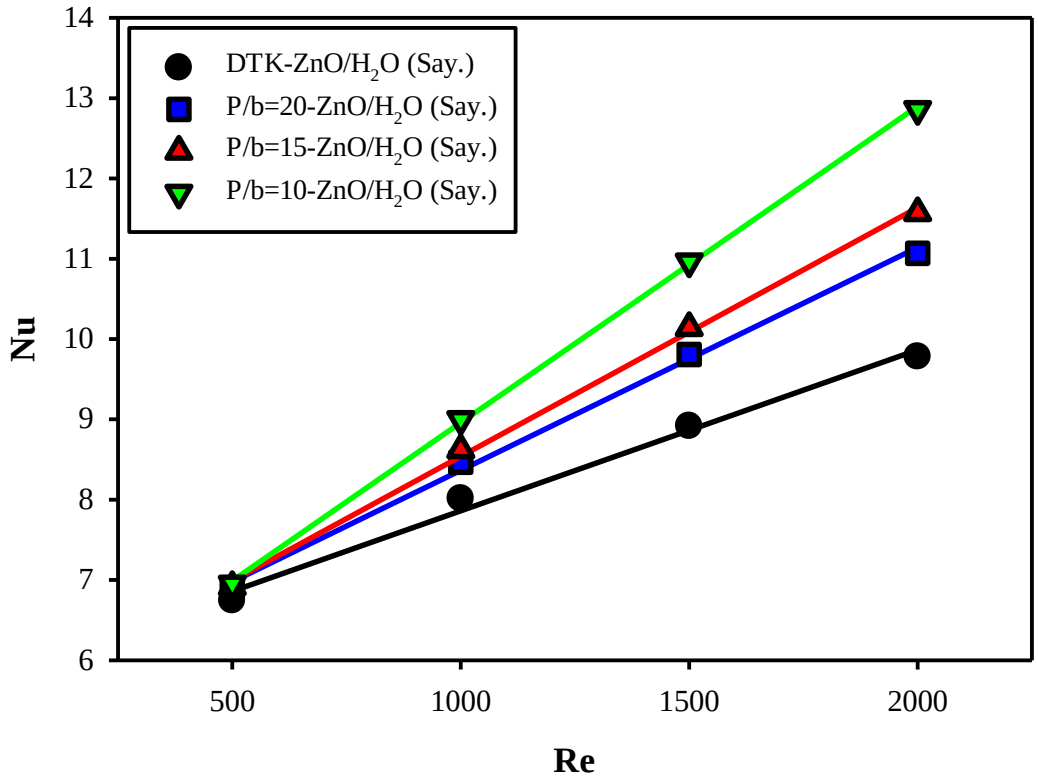


Şekil 5.12 ÇTK içindeki su akışında sayısal PDK değerlerinin kıyaslanması

5.2.2 Nanoakışkan Akışında Çukur Kanat Etkilerinin Sayısal Bulguları

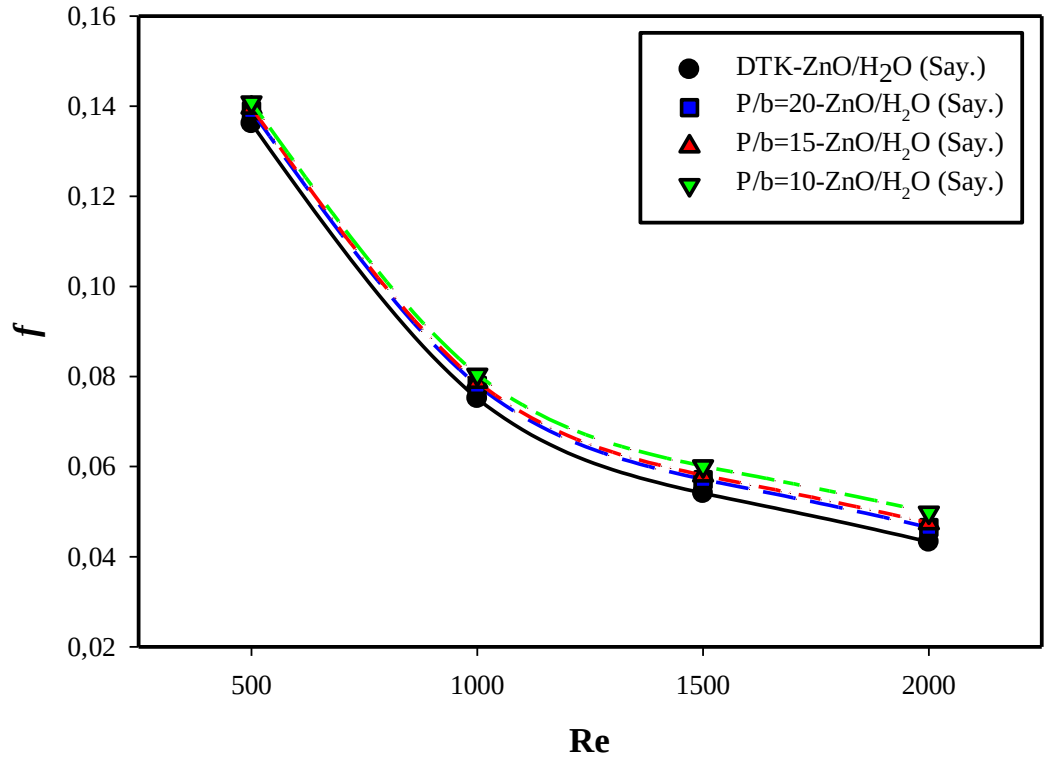
Ansys Fluent 2024R2 yazılımı kullanılarak, DTK ve farklı adım oranlarına sahip ÇTK içerisinde ZnO/H_2O nanoakışkanının dolaşımı sayısal olarak modellenmiştir. Elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 5.13'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, incelenen tüm parametre aralığında ($500 \leq Re \leq 2000$), Reynolds sayısının artışıyla birlikte Nusselt sayısının lineer bir artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Bu durum, akış hızının artmasıyla birlikte nanoakışkan içerisindeki karışım etkisinin ve zorlanmış taşınım mekanizmasının güçlenmesiyle açıklanabilir. Özellikle Re=2000 noktasında veriler incelendiğinde; DTK'da Nusselt sayısı 9,78 seviyesindeyken, P/b=20, P/b=15 ve P/b=10 geometrilerinde bu değer sırasıyla 11,06, 11,57 ve 12,86 seviyelerine yükselmiştir. Bu

durum, P/b=10 geometrisinin ve nanoakışkanın birlikte kullanımının, DTK'ya kıyasla ısı transferini %23,94 artırdığını göstermektedir.



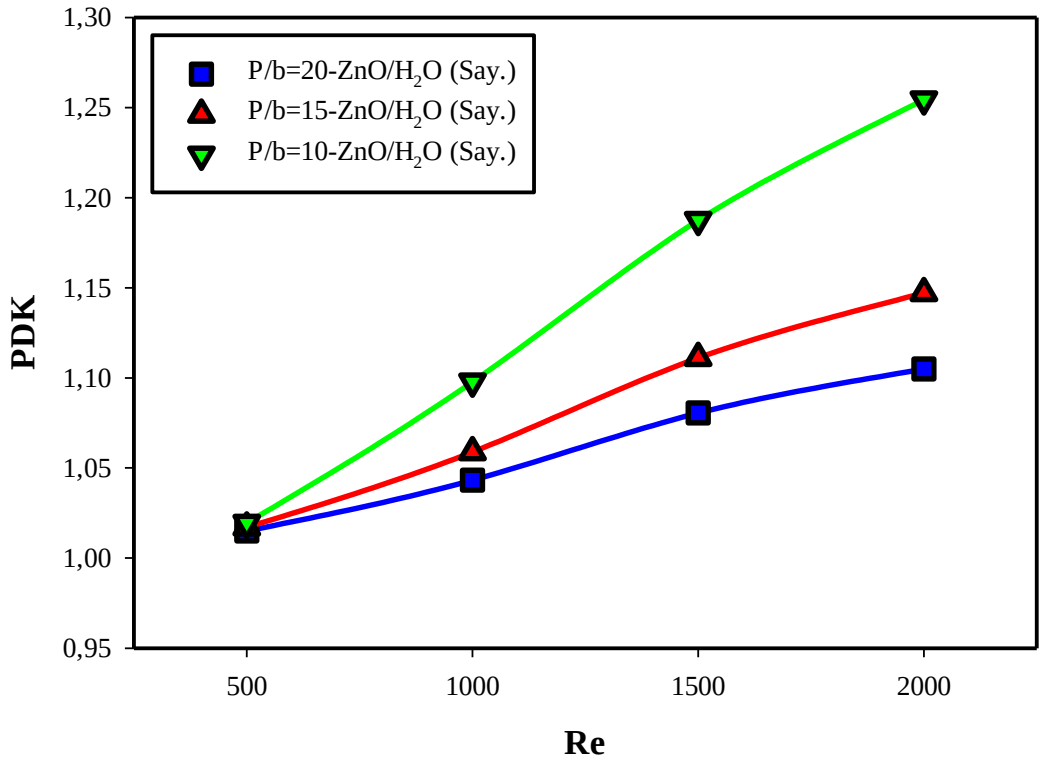
Şekil 5.13 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında sayısal Nu değerlerinin kıyaslanması

Ansys Fluent 2024R2 kullanılarak gerçekleştirilen sayısal simülasyonlardan elde edilen Darcy sürtünme katsayısı (f) değişimleri, ZnO/H_2O nanoakışkanı için Reynolds sayısının ve geometrik parametrelerin bir fonksiyonu olarak Şekil 14'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, incelenen Reynolds aralığında ($500 \leq Re \leq 2000$) tüm kanal konfigürasyonları için sürtünme katsayısının, Reynolds sayısının artışıyla ters orantılı olarak azaldığı belirlenmiştir. Bu eğilim, laminer ve geçiş bölgesi akışlarında viskoz kuvvetlerin etkisinin azalarak atalet kuvvetlerinin baskın hale gelmesiyle açıklanan klasik hidrodinamik teoriyle tam uyum içerisindedir. Re=2000 noktasında veriler incelendiğinde; DTK'da sürtünme katsayısı 0,043 seviyesindeyken, P/b=10 geometrisinde bu değer 0,049 seviyesine yükselmiştir. Bu durum, en yoğun yüzey modifikasyonunun nanoakışkan akışında %13,12'lik bir sürtünme artışına neden olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.14 DTK ve ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında sayısal f değerlerinin kıyaslanması

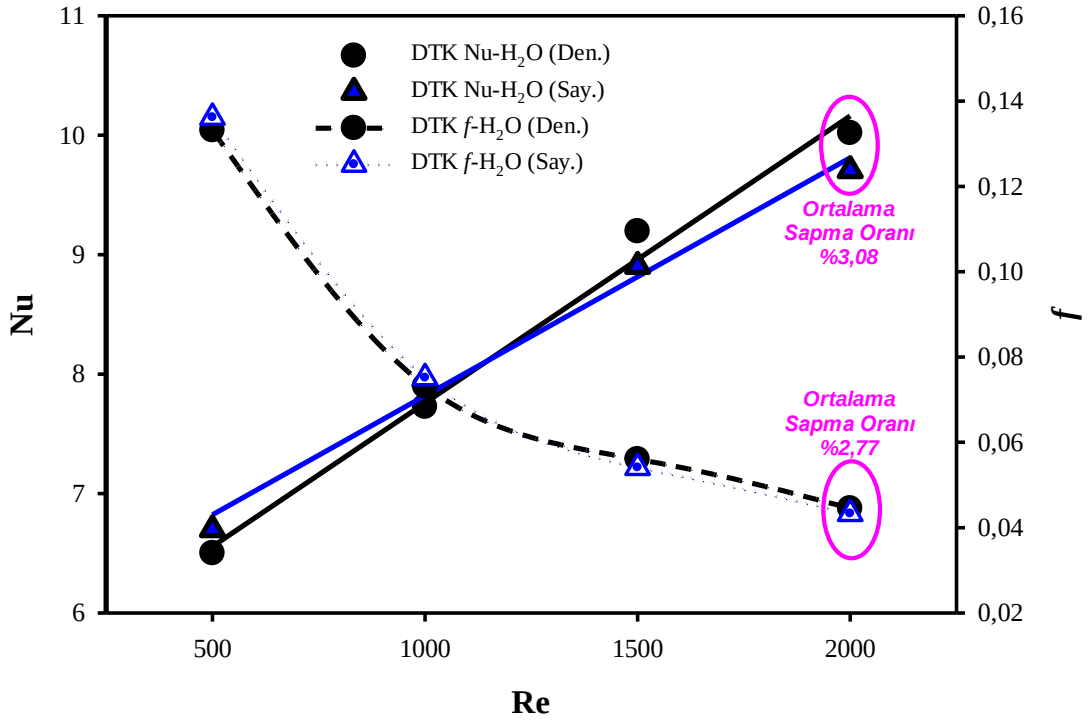
Ansys Fluent 2024R2 aracılığıyla gerçekleştirilen sayısal analizlerin son aşamasında, ZnO/H_2O nanoakışkanının farklı adım oranlarına ÇTK içerisindeki akışı, enerji verimliliği perspektifinden değerlendirilmiştir. Isı transferindeki iyileşme oranı ile sürtünme katsayısındaki artış oranı arasındaki dengeyi ifade eden Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) sonuçları, Reynolds sayısına bağlı olarak Şekil 5.15'te sunulmuştur. Düşük Reynolds sayılarında (Re=500), akış hızının düşük olması nedeniyle türbülans benzeri karışım etkileri henüz tam gelişmemiş olup, tüm geometriler için PDK değerleri birbirine yakın ve 1,01 – 1,02 bandında seyretmiştir. Ancak Reynolds sayısının artmasıyla birlikte, nanoakışkan içerisindeki partikül hareketliliği ve çukur bölgelerindeki girdap şiddeti artmış, bu da PDK eğrilerinin yukarı yönlü ivmelenmesini ve geometrilerin birbirinden belirgin şekilde ayrışmasını sağlamıştır. Re=2000 noktasında veriler kıyaslandığında; P/b=20 geometrisinin PDK değeri 1,11 iken, kanatçıkların sıklaştırıldığı P/b=10 geometrisinde bu değer 1,25 seviyesine ulaşmıştır. Bu %12,61'lik verimlilik artışı, sık kanatçık yapısının yarattığı ekstra türbülansın ve nanoakışkanın iletkenlik avantajının, artan sürtünme maliyetinden çok daha değerli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.15 ÇTK içindeki ZnO/H_2O akışında sayısal PDK değerlerinin kıyaslanması

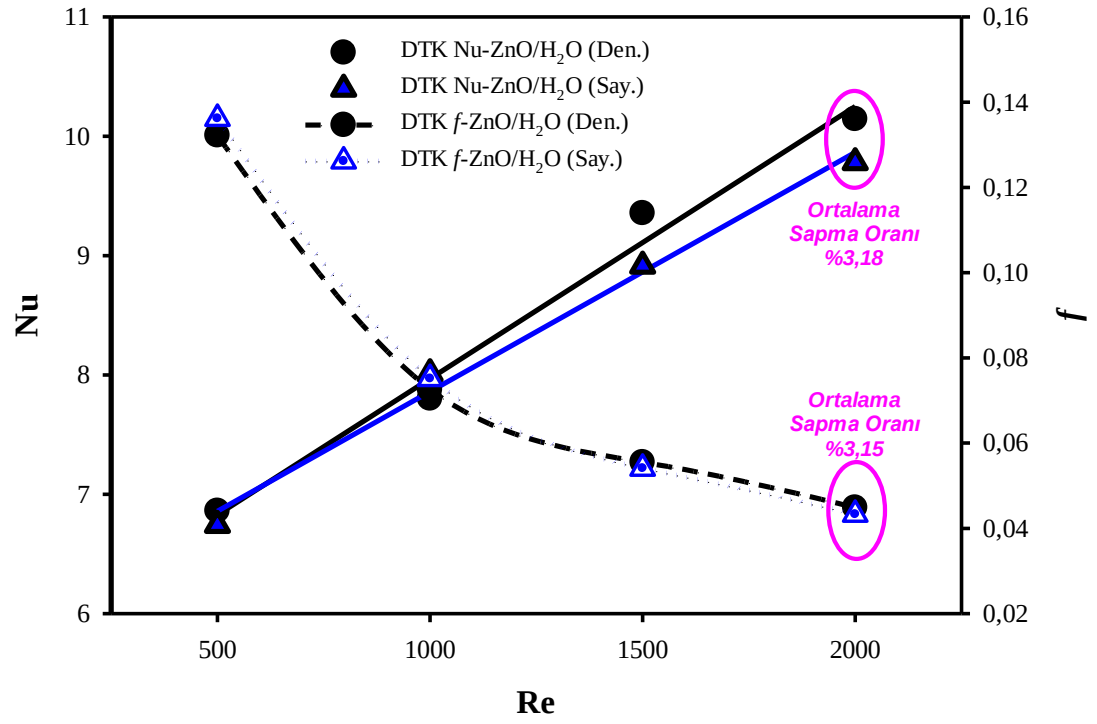
5.3 Deneysel ve Sayısal Bulguların Karşılaştırılması

Sayısal analizin güvenilirliğini test etmek amacıyla, ilk aşamada belirlenen sınır şartları altında deneysel ve sayısal veriler karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında hidrodinamik ve ısıl olarak gelişmekte olan laminer akış koşulları, $500 \leq Re \leq 2000$ aralığı için incelenmiştir. Şekil 5.16'da su için elde edilen ortalama Nu ve Darcy sürtünme katsayısı değişimleri hem deneysel hem de sayısal sonuçlar ile aynı grafik üzerinde sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, Reynolds sayısı arttıkça Nu sayısının beklendiği üzere artış gösterdiği, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmektedir. Sayısal modelin doğruluğunu belirleyen en önemli parametre olan sapma oranlarına bakıldığında; Nu değerleri için ortalama sapma oranı %3,08, sürtünme katsayısı için ise ortalama %2,77 olarak hesaplanmıştır. Her iki parametre için de sapma oranlarının %10'un altında kalması, kurulan sayısal modelin deneysel sonuçlarla mükemmel bir uyum içinde olduğunu ve tez kapsamındaki analizler için güvenilir bir zemin oluşturduğunu kanıtlamaktadır.



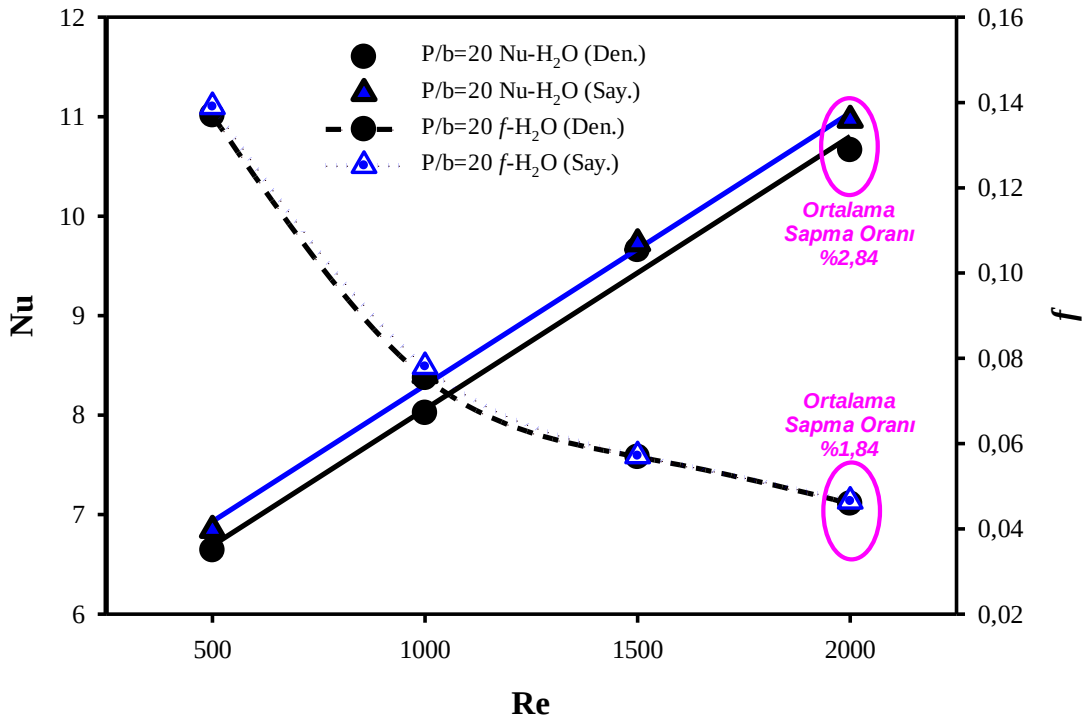
Şekil 5.16 DTK içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

Çalışmanın validasyon aşamasında suyun ardından, DTK geometrisi içerisinde ZnO/H_2O nanoakışkanı kullanımı durumu da incelenmiştir. DTK içi su akışı yerine nanoakışkan akışı koşulları ele alındığında; deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 5.17 üzerinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 500≤Re≤2000 aralığını kapsayan grafik incelendiğinde; beklendiği üzere Reynolds sayısı arttıkça Nu sayısının artış gösterdiği, Darcy sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmektedir. Sayısal modelin doğruluğunu teyit etmek adına yapılan istatistiksel analiz sonucunda; deneysel ve sayısal veriler arasındaki ortalama sapma oranı Nu değerleri için %3,18, Darcy sürtünme katsayısı değerleri için ise %3,15 olarak hesaplanmıştır. Her iki parametre için de sapmaların birbirine oldukça yakın ve düşük seviyede olması, sayısal modelin nanoakışkan içeren karmaşık akış koşullarını da başarıyla modellediğini göstermektedir.



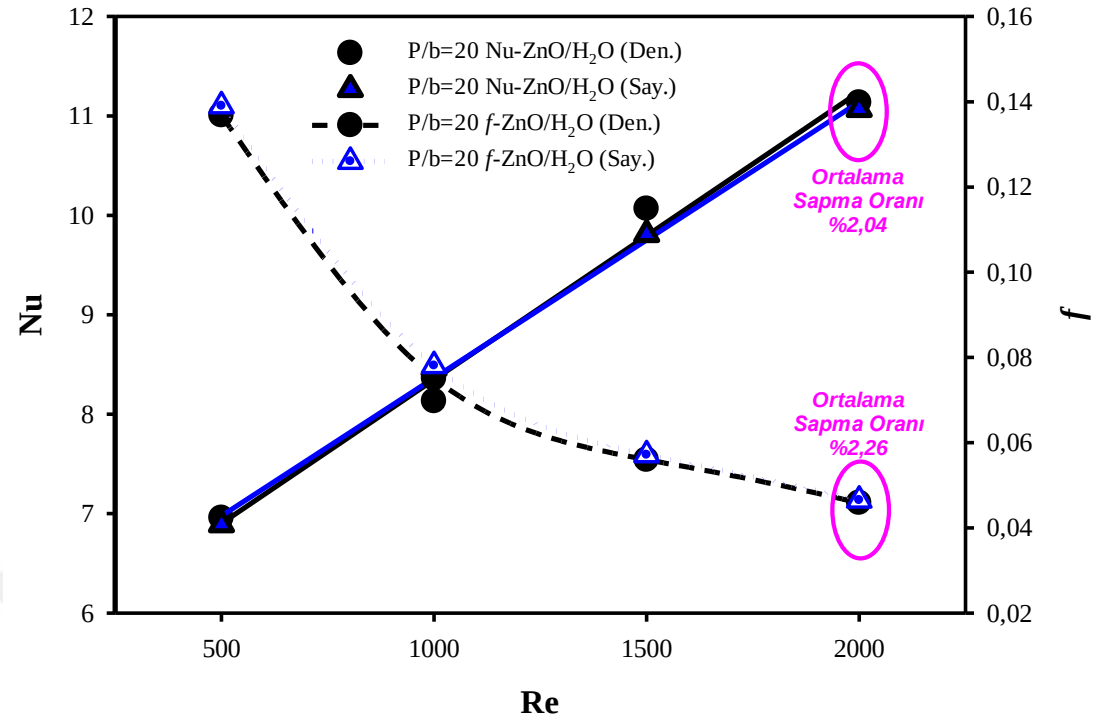
Şekil 5.17 DTK içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

Çalışmanın bu aşamasında, geometrik parametrelerin akış üzerindeki etkisini doğrulamak amacıyla P/b=20 oranına sahip ÇTK içerisindeki su akışı analiz edilmiştir. İlgili geometri için 500≤Re≤2000 aralığında elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırması Şekil 5.18'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde; Reynolds sayısındaki artışın beklendiği üzere türbülansı ve karışımı artırarak Nusselt sayısını yükselttiği, buna karşılık Darcy sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmektedir. Sayısal model oluşturularak yapılan analizler ve deneysel bulgular karşılaştırıldığında; Nu sayısı için ortalama sapma oranı %2,84, sürtünme katsayısı için ise %1,84 olarak hesaplanmıştır. Sapma oranlarının her iki parametre için de %10 seviyesinin altında kalması, sayısal modelin söz konusu geometri ve akış şartları için yüksek hassasiyetle çalıştığını kanıtlamaktadır.



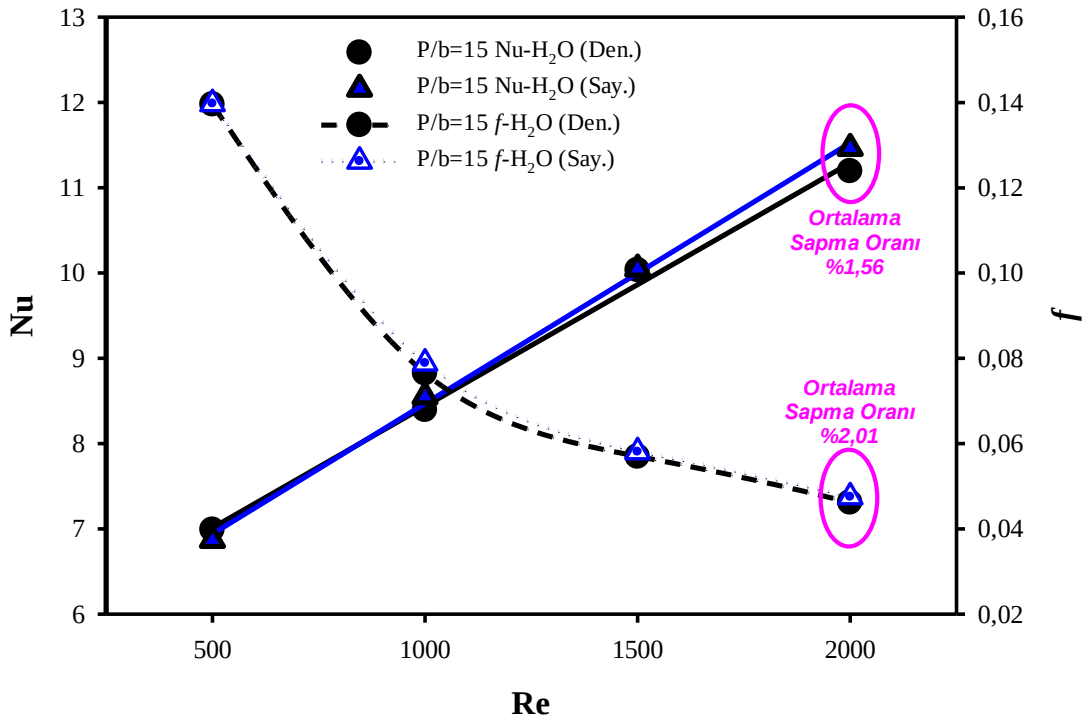
Şekil 5.18 P/b=20 içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

Geometrik parametrelerin etkisinin incelendiği çalışmada, suyun ardından P/b=20 adım oranına sahip ÇTK içerisindeki ZnO/H_2O nanoakışkan akışı da sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. İlgili geometri ve nanoakışkan için elde edilen Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı bulguları Şekil 5.19 üzerinde sunulmuştur. Grafik incelendiğinde; Re sayısı artışıyla birlikte ısı transferinin iyileştiği, buna karşılık basınç kaybı parametresi olan sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. P/b=20 adım oranına sahip ÇTK için sayısal model oluşturularak yapılan analizler ve deneysel bulgular karşılaştırıldığında; Nu değerlerinde ortalama sapmanın %2,04, sürtünme katsayısında ise %2,26 olduğu tespit edilmiştir.



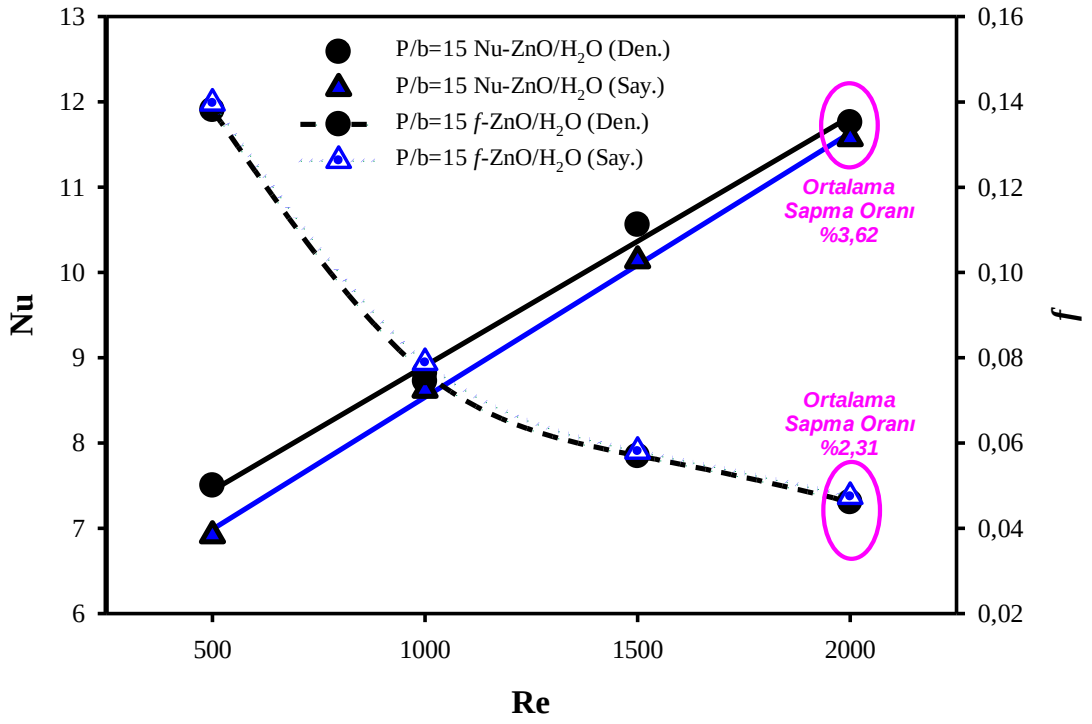
Şekil 5.19 P/b=20 içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

Geometrik parametrelerin akış karakteristiği üzerindeki etkisini doğrulamak amacıyla P/b=15 oranına sahip ÇTK geometrisi ele alınarak su akışı için deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. 500≤Re≤2000 aralığında elde edilen deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırmalı sonuçları Şekil 5.20'de sunulmaktadır. Grafikteki eğilimler incelendiğinde; Reynolds sayısındaki artışın akış karışımını iyileştirerek ısı transferini artırdığı, buna karşılık basınç kaybı parametresi olan Darcy sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmektedir. P/b=15 adım oranına sahip ÇTK için sayısal model oluşturularak yapılan analizler ve deneysel bulgular karşılaştırıldığında; Nu sayısı için ortalama sapma oranının %1,56, sürtünme katsayısı için ise %2,01 olduğu hesaplanmıştır. Özellikle ısı transferinde elde edilen %10'un altındaki bu düşük sapma oranı, sayısal modelin P/b=15 geometrisi ve laminar akış koşulları için fiziksel gerçekliği çok yüksek bir hassasiyetle simüle kanıtlamaktadır.



Şekil 5.20 P/b=15 içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

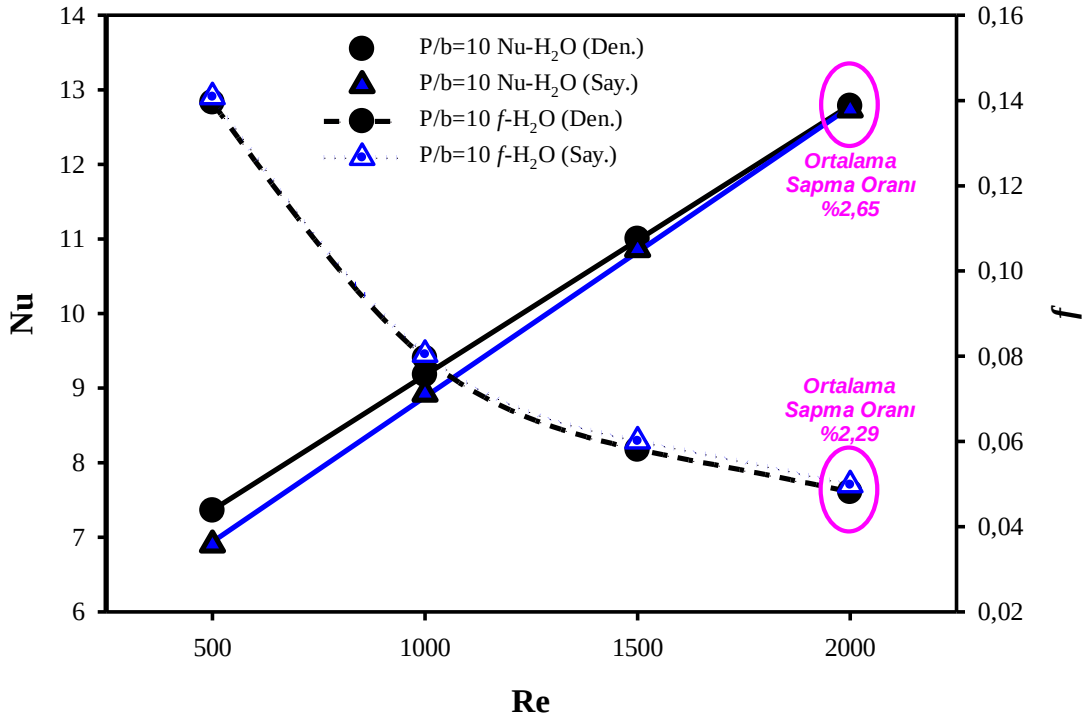
Geometrik parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, su deneylerinin ardından P/b=15 adım oranına sahip ÇTK geometrisi içerisinde ZnO/H_2O nanoakışkanının davranışı analiz edilmiştir. İlgili geometri ve nanoakışkan için $500 \leq Re \leq 2000$ aralığında elde edilen sayısal ve deneysel karşılaştırma sonuçları Şekil 5.21 üzerinde sunulmuştur. Grafikteki eğilimler incelendiğinde; Reynolds sayısındaki artışın ısı transferi mekanizmasını iyileştirerek Nusselt sayısını artırdığı, buna karşılık akış direncini ifade eden sürtünme katsayısını azalttığı görülmektedir. Sayısal modelin nanoakışkanlı sistemlerdeki başarısını test etmek amacıyla yapılan hata analizinde; Nu değerlerinde ortalama sapmanın %3,62, sürtünme katsayısında ise %2,31 olduğu tespit edilmiştir. Her iki parametre için de sapma oranlarının kabul edilebilir sınırların oldukça altında kalması, kurulan modelin farklı geometrilerde ve nanoakışkanlı ortamlarda da yüksek doğrulukla çalıştığını kanıtlamaktadır.



Şekil 5.21 P/b=15 içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

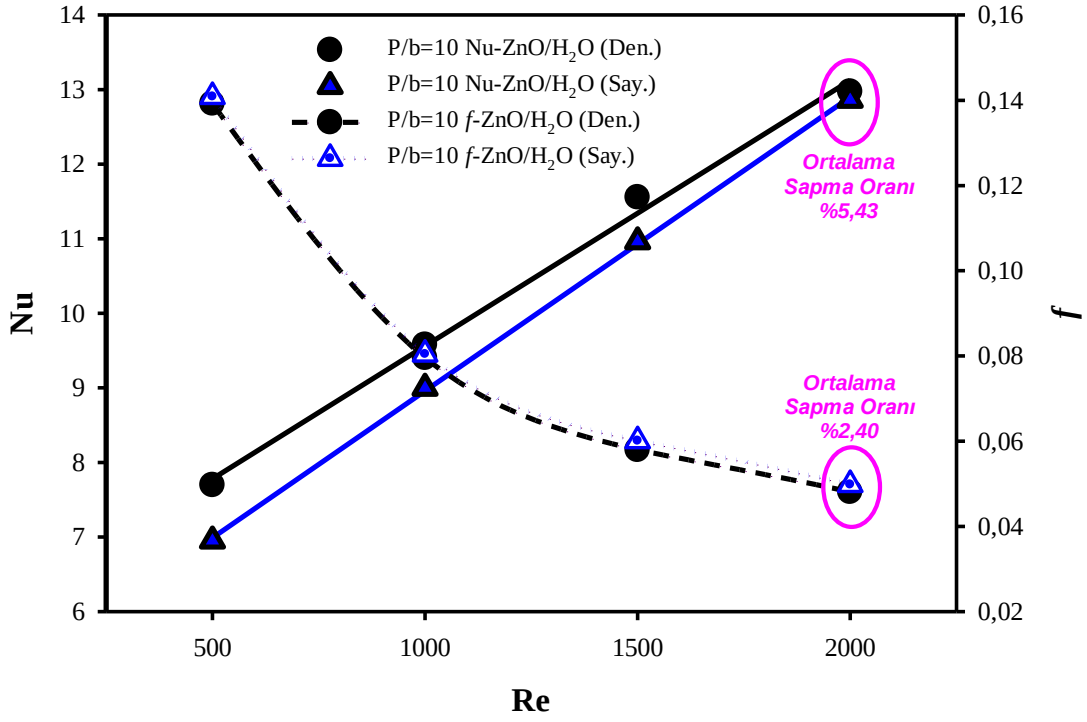
Geometrik parametrelerin etkisinin incelendiği bu kısımda, kanatçık yoğunluğunun daha yüksek olduğu P/b=10 adım oranına sahip ÇTK geometrisi ele alınmış ve su akışı için analizler gerçekleştirilmiştir. 500≤Re≤2000 aralığında elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırması Şekil 5.22'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, Reynolds sayısındaki artışla birlikte Nusselt sayısının yükseldiği, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmektedir. Isı transferindeki bu artış; artan akış hızı ve yüzey geometrisinin etkisiyle, ısı transferine direnç gösteren ısıl sınır tabakanın parçalanması ve akışın yeniden gelişerek yüzeyle temasının artması ile açıklanabilir. Sınır tabakadaki bu bozulma mekanizması, akışkan karışımını teşvik ederek taşınım ile ısı transferini iyileştirmektedir.

P/b=10 adım oranına sahip ÇTK için sayısal model oluşturularak yapılan analizler ve deneysel bulgular karşılaştırıldığında; Nu değerlerinde ortalama sapmanın %2,65, sürtünme katsayısında ise %2,29 olduğu belirlenmiştir. Sapma oranlarının %10'un altında kalması, sayısal modelin hem sınır tabaka etkileşimlerini hem de basınç düşüşlerini yüksek hassasiyetle modellediğini kanıtlamaktadır.



Şekil 5.22 P/b=10 içindeki su akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

P/b=10 geometrisine sahip ÇTK içerisindeki ZnO/H_2O nanoakışkan akışı için elde edilen deneysel ve sayısal veriler Şekil 5.23'te karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde, Nu sayısının Re sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı görülmektedir. Bu geometride, sık yerleştirilen kanatçıkların yarattığı bozucu etki, yüzey boyunca sınır tabakanın yeniden gelişmesini engelleyip parçalanmasını sağlayarak ısı transferini tetiklemektedir. Ayrıca nanoakışkanın süspansiyon yapısı, parçacıkların kaotik hareketi ve artan ısıl iletkenlik sayesinde bu artışa pozitif yönde katkı sunmaktadır. Deneysel ölçümler ile sayısal analiz sonuçları arasındaki uyum değerlendirildiğinde; Nusselt sayısı için ortalama sapma oranı %5,43, sürtünme katsayısı için ise %2,40 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sayısal yöntemin hem yoğun geometrik yapılarda hem de nanoakışkanlı çalışma koşullarında yüksek güvenilirlikle kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.23 P/b=10 içindeki ZnO/H_2O akışında deneysel ve sayısal bulguların kıyaslanması

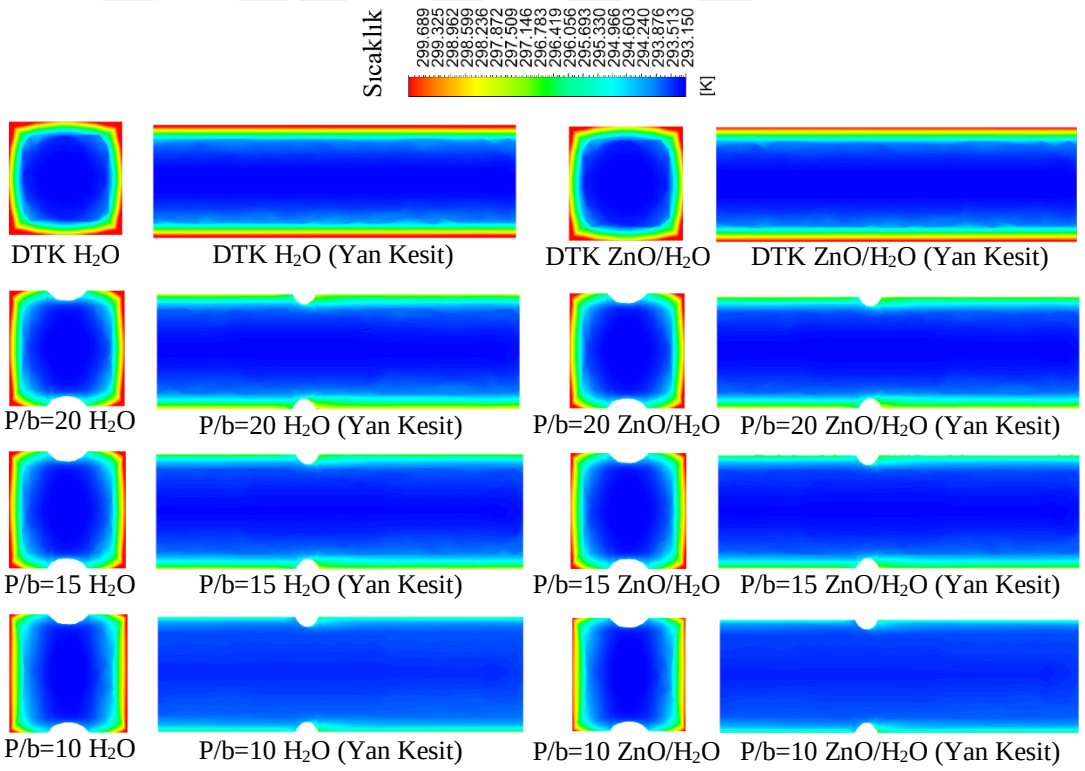
5.4 Sıcaklık, Hız ve Nusselt Sayısı Dağılımları

Şekil 5.24'te, DTK ve farklı adım oranlarına (P/b=20, 15, 10) sahip ÇTK içerisinde, su ve ZnO/H_2O nanoakışkanının akışı sırasında oluşan sıcaklık dağılımı konturları Re=2000 için sunulmuştur. Görselde mavi bölgeler akışkanın daha düşük sıcaklıktaki çekirdek bölgesini, kırmızı ve sarı bölgeler ise ısıtılan duvar yüzeyine yakın yüksek sıcaklık bölgelerini temsil etmektedir. DTK incelendiğinde; duvar yüzeyi boyunca düzenli ve sürekli bir ısıl sınır tabakanın oluştuğu görülmektedir. Akışkanın merkez hattındaki soğuk bölge ile duvar yakınındaki sıcak bölge arasındaki karışımın sınırlı olduğu, ısıl direncin bu kalınlaşan sınır tabaka nedeniyle yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

ÇTK'lara geçildiğinde ise; kanatçıkların varlığı bu düzenli sınır tabaka yapısını fiziksel olarak bozmaktadır. Kesit görüntüleri incelendiğinde, çukur bölgelerinde akışın yüzeyden ayrılıp tekrar tutunmasıyla sınır tabakanın parçalandığı ve inceldiği görülmektedir. Özellikle P/b=10 geometrisinde, çukur kanatçık yoğunluğunun

artmasıyla birlikte duvar yakınındaki sıcak akışkanın, merkezdeki soğuk akışkanla daha etkin bir şekilde karıştığı gözlemlenmektedir. Bu durum, duvardan akışkana olan ısı geçişini artırarak Nusselt sayısının yükselmesine neden olan temel mekanizmadır.

Su ve ZnO/H_2O nanoakışkanı karşılaştırıldığında; sağ sütundaki nanoakışkan konturlarında, sıcaklık geçişlerinin suya kıyasla daha yumuşak olduğu ve ısıl yayılımın daha etkin gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, nanoakışkanın baz akışkana göre daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması ve nanopartiküllerin taşıdığı enerjiyi akışkan içerisine daha hızlı iletmesiyle açıklanabilir. Sonuç olarak, sayısal analizden elde edilen bu sıcaklık konturları, en yüksek ısı transferi performansının P/b=10 geometrisi ve ZnO/H_2O nanoakışkanı kombinasyonunda elde edildiği yönündeki grafiksel bulguları görsel olarak da doğrulamaktadır.

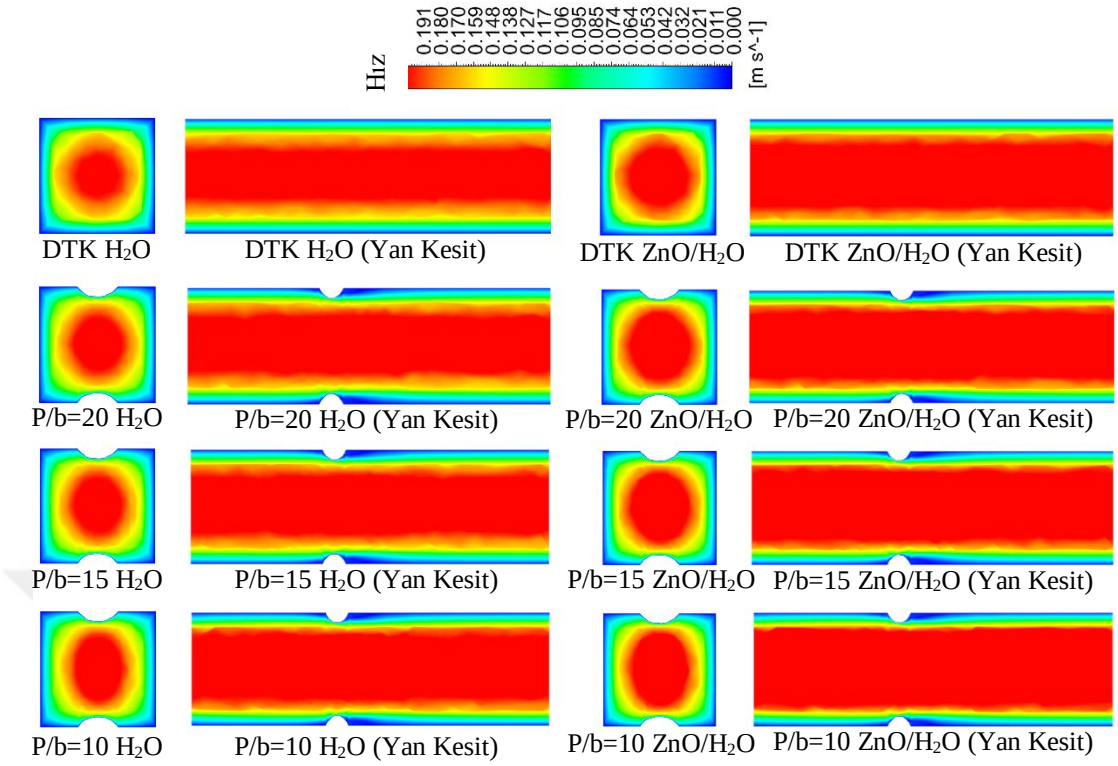


Şekil 5.24 Sayısal analizler sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları

Şekil 5.25'te, DTK ve farklı adım oranlarına (P/b=20, 15, 10) sahip ÇTK içerisinde, su ve ZnO/H_2O nanoakışkanının Re=2000 çalışma koşulundaki hız dağılımı konturları sunulmuştur. Görsellerde kırmızı bölgeler akış hızının maksimum olduğu kanal merkezini, mavi bölgeler ise hızın sıfıra yaklaştığı duvar yüzeylerini temsil etmektedir. DTK incelendiğinde; kanal kesiti boyunca klasik laminer akış karakteristiği olan parabolik hız profilinin oluştuğu görülmektedir. Kaymama sınır şartı gereği duvar yüzeylerinde hız sıfırdır ve merkeze doğru düzenli bir şekilde artarak maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu durum, akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş olduğunu doğrulamaktadır.

ÇTK'lar (P/b=20, 15, 10) incelendiğinde; yan kesit görüntülerinden açıkça görüldüğü üzere, kanal duvarlarına açılan eliptik çukurlar, duvar yakınındaki akış yapısını değiştirmektedir. Akışkan, çukur bölgelerinin üzerinden geçerken akış kesit alanındaki lokal genişleme nedeniyle hız profilinde bölgesel değişimler meydana gelmektedir. Mavi renkli bölgelerin çukur içlerine doğru nüfuz etmesi, bu oyuklarda hızın düştüğünü ve muhtemel resirkülasyon bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Özellikle P/b=10 geometrisinde, çukur sıklığının artmasıyla birlikte hidrodinamik sınır tabakanın yüzey boyunca daha sık bozulmaya uğradığı ve bu durumun akışkan karışımını teşvik ettiği anlaşılmaktadır.

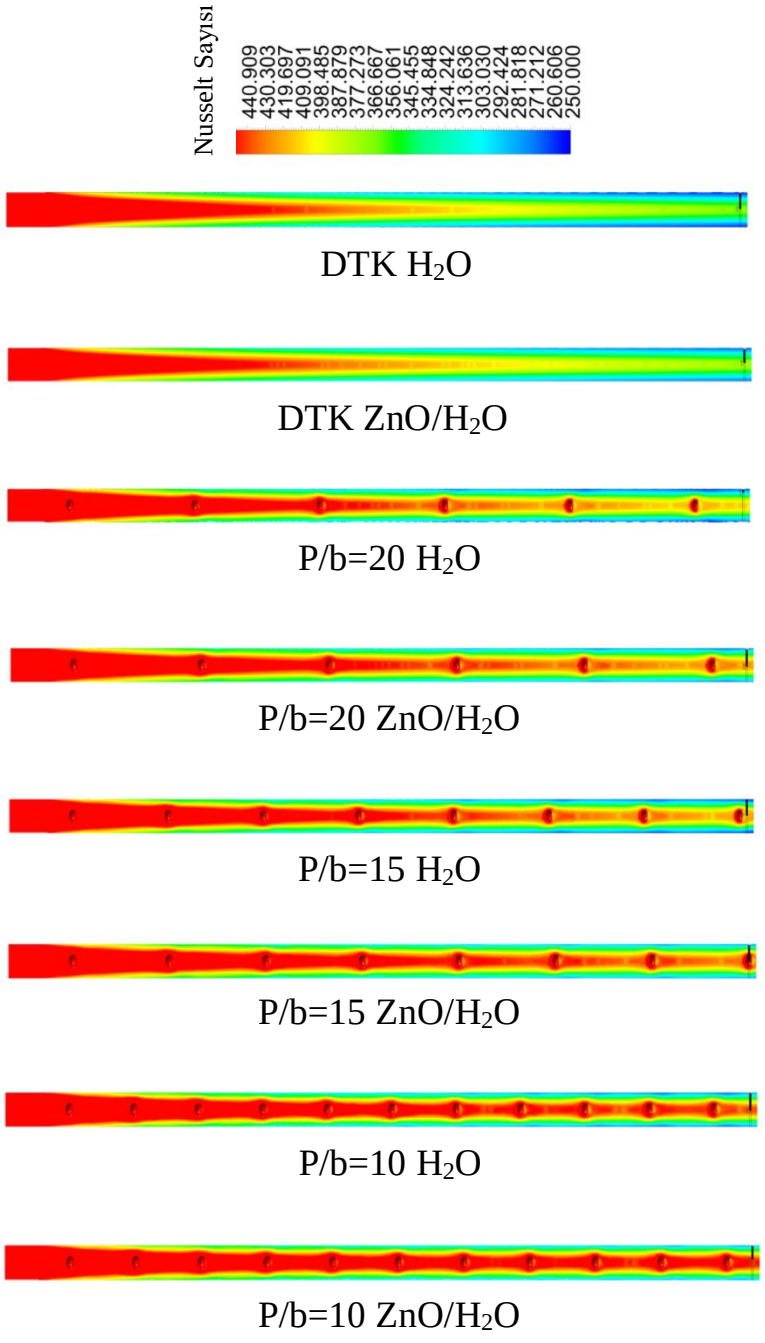
Su ve ZnO/H_2O nanoakışkanı karşılaştırıldığında; sol ve sağ sütundaki hız konturları arasında morfolojik açıdan büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Bunun temel nedeni, analizlerin aynı Reynolds sayısında Re=2000 gerçekleştirilmiş olmasıdır. Nanoakışkanın viskozitesi suya göre daha yüksek olsa da Reynolds sayısının sabit tutulması nedeniyle boyutsuz hız profilleri benzer bir dağılım sergilemektedir. Ancak çukur kanatçıklı yapılarda nanoakışkanın varlığı, çukur bölgelerindeki momentum transferini etkileyerek sınır tabaka etkileşimini güçlendirmekte ve ısı transferi artışına hidrodinamik bir zemin hazırlamaktadır.



Şekil 5.25 Sayısal analizler sonucu elde edilen hız dağılımları

Şekil 5.26'da ZnO/H_2O, DTK ve farklı adım oranlarına (P/b=20, 15, 10) sahip ÇTK'lar boyunca, su ve ZnO/Su nanoakışkanının yerel Nusselt sayısı dağılımları Re=2000 için sunulmuştur. Görselde kırmızı bölgeler ısı transferi katsayısının en yüksek olduğu alanları, mavi bölgeler ise ısıl direncin artmasıyla ısı transferinin azaldığı alanları temsil etmektedir. Tüm kanal geometrileri için, akışın başladığı giriş bölgesinde Nusselt sayısının maksimum değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum, ısıl sınır tabakanın henüz gelişmeye başladığı ve çok ince olduğu ısıl giriş bölgesi karakteristiğidir. Akış kanal boyunca ilerledikçe sınır tabaka kalınlaşmakta ve DTK geometrisinde görüldüğü üzere Nusselt sayısı düzenli bir şekilde düşmektedir. DTK'daki bu düşüşe kıyasla, çukur kanatçıklı kanallarda her bir çukur yapısının hemen ardından yerel Nusselt sayısında ani artışlar gözlemlenmektedir. Bu durum, çukur kanatçıkların kalınlaşan ısıl sınır tabakayı parçalayarak akışın yüzeyle temasını yenilediğini ve çukur bölgelerinde oluşan türbülansın ısı transferini tetiklediğini kanıtlamaktadır. Geometriler kıyaslandığında, P/b=10 konfigürasyonunun kanal boyunca yüksek Nusselt bölgelerini en sık tekrarlayan yapı olduğu ve ortalama ısı

transferini en üst düzeyde tuttuğu açıkça görülmektedir. Ayrıca su ve ZnO/H_2O nanoakışkanı konturları karşılaştırıldığında; nanoakışkan kullanılan kanallarda renk yoğunluğunun daha yüksek olduğu, özellikle çukur bölgelerindeki iyileşmenin nanoakışkanın yüksek ısıl iletkenliği ile birleşerek sinerjik bir artış sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.26 Sayısal analizler sonucu elde edilen Nu dağılımları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinden biri olan yüzey modifikasyonu ile yeni nesil ısı transferi akışkanlarından olan nanoakışkanların (ZnO/H_2O) birleşik etkisinin, kare kesitli bir kanal içerisindeki termohidrolik performansa etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalar, elektronik soğutma ve kompakt ısı değiştiricileri gibi alanlarda sıkça karşılaşılan laminer akış rejiminde ($500 \leq Re \leq 2000$) ve sabit ısı akısı ($q"=2000\ W/m^2$) sınır şartları altında gerçekleştirilmiştir. Farklı adım oranlarına (P/b=20, 15 ve 10) sahip ÇTK'ların, DTK ve su verileri referans alınarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular ve bu bulgulara dayanan sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- İncelenen tüm kanal geometrileri ve akışkan tipleri için Reynolds sayısının artışı, beklendiği üzere Nusselt sayısında (ısı transferinde) artışa, Darcy sürtünme katsayısında ise düşüşe neden olmuştur. Laminer akış rejiminde atalet kuvvetlerinin artması, akışkan karışımını teşvik ederek ısı taşınım mekanizmasını güçlendirmiştir.

- Kare kanal yüzeyine işlenen eliptik çukur kanatçıklar, düz kanala kıyasla ısı transferini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Kanatçıklar arası mesafenin azalması, birim yüzeydeki bozucu eleman sayısını artırmıştır. Bu durum, ısıl sınır tabakanın kanal boyunca daha sık parçalanmasına, akışın yüzeyden ayrılıp tekrar yapışmasına ve çukur bölgelerinde yoğun ikincil akışların oluşmasına yol açmıştır. En yüksek ısı transferi artışı, en sık kanatçık yapısına sahip P/b=10 geometrisinde elde edilmiştir. Bu geometri, akışkanın duvarla temasını maksimize ederek ısı geçiş direncini minimize etmiştir.

- Baz akışkan olan suya %1,0 hacimsel oranda ZnO nanopartiküllerinin eklenmesi, ısı transferi performansını tüm geometrilerde artırmıştır. Bu artışın temel nedeni, ZnO partiküllerinin suyun termal iletkenliğini artırması ve nano boyuttaki parçacıkların gerçekleştirdiği Brownian hareketinin akış içerisinde mikro ölçekli bir çalkalanma yaratarak sınır tabakayı zayıflatmasıdır.

Nanoakışkan kullanımı, sürtünme katsayısında viskozite artışına bağlı olarak cüzi bir artışa neden olsa da sağladığı ısıl kazanç bu dezavantajı tolere etmiştir.

- Çukur kanatçıklı yüzeylerin ve nanoakışkanın birlikte kullanılması, her iki yöntemin tekil kullanımına kıyasla çok daha yüksek bir performans artışı sağlamıştır. Çukur kanatçıkların yarattığı makro ölçekli girdaplar ile nanopartiküllerin yarattığı mikro ölçekli karışım mekanizmaları birbirini destekleyerek, P/b=10 geometrisinde ve Re=2000 şartlarında ısı transferinde maksimum iyileşmeye ulaşılmıştır.

- Yüzey pürüzlülüğünün artması basınç düşüşünü artırmış olsa da sistemin genel verimliliğini gösteren Performans Değerlendirme Kriteri (PDK) tüm deney setlerinde 1,0'in üzerinde bulunmuştur. Bu durum, önerilen pasif yöntemlerin enerji verimliliği açısından uygulanabilir olduğunu kanıtlamaktadır. En yüksek PDK değeri, 1,25 olarak P/b=10 geometrisinde ve nanoakışkan akışında Re=2000'de elde edilmiştir. Yani, aynı pompalama gücü harcanarak %25 daha fazla ısı transferi sağlanmıştır.

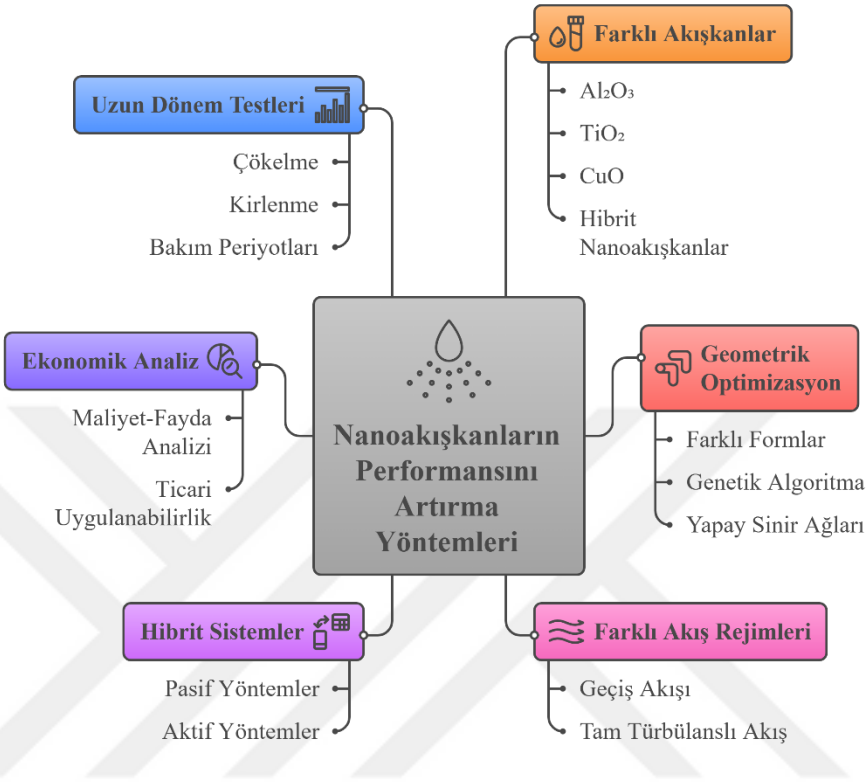
- Gerçekleştirilen sayısal analizler ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, ortalama sapma oranlarının Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Bu uyum, oluşturulan sayısal modelin güvenilirliğini ve karmaşık akış fiziğini doğru bir şekilde modellediğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve literatürdeki boşluklar dikkate alındığında, gelecekte yapılacak çalışmalar için Şekil 6.1 ve aşağıda verilen öneriler sunulabilir:

- Bu çalışmada sadece ZnO ve %1,0 hacimsel derişim kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda Al_2O_3, TiO_2, CuO gibi farklı metal oksitler veya hibrit nanoakışkanlar farklı hacimsel konsantrasyonlarda denenerek optimum akışkan türü araştırılabilir.

- Eliptik çukur formu yerine; damla, üçgen veya asimetrik çukur geometrileri incelenebilir. Ayrıca çukur derinliği ve çukur çapı gibi parametrelerin etkisi

değişken tutularak, genetik algoritmalar veya yapay sinir ağları gibi optimizasyon yöntemleriyle en ideal yüzey topolojisi belirlenebilir.



Şekil 6.1 Gelecek çalışmalar için öneriler

- Bu çalışma laminer akış rejimi ile sınırlandırılmıştır. Çukur kanatçıkların türbülans üretme potansiyeli göz önüne alındığında, geçiş ve tam türbülanslı akış rejimlerinde (Re>2300) yapılacak çalışmalar, yöntemin endüstriyel uygulanabilirliği (örneğin ısı değiştiricilerde) açısından değerli veriler sunacaktır.

- Çukur kanatçıkların, bükülmüş şeritler veya tel bobinler gibi diğer pasif elemanlarla veya manyetik alan, titreşim gibi aktif yöntemlerle birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin performansı araştırılabilir.

- Yöntemin ticarileşme potansiyelini görmek adına, nanoakışkan maliyeti, üretim zorlukları, basınç düşüşünden kaynaklı pompa maliyetleri ve ısı transferi kazancının ekonomik boyutunu içeren bir maliyet-fayda analizi yapılabilir.

- ❖ Nanoakışkanların uzun süreli kullanımlarda çukur kanatçıklar üzerinde çökelme veya kirlenme yaratıp yaratmadığı, sistemin bakım periyotlarını belirlemek adına deneysel olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abadeh, A., Mohammadi, M., Passandideh-Fard, M. (2018). Experimental investigation on heat transfer enhancement for a ferrofluid in a helically coiled pipe under constant magnetic field. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2018 135:2*, 135(2), 1069-1079. doi:10.1007/S10973-018-7478-2

Abdollahi, S. A., Basem, A., Alizadeh, A., Jasim, D. J., Ahmed, M., Sultan, A. J., … Maleki, H. (2024). Combining artificial intelligence and computational fluid dynamics for optimal design of laterally perforated finned heat sinks. *Results in Engineering*, 21, 102002. doi:10.1016/J.RINENG.2024.102002

Aghakhani, S., Hajatzadeh Pordanjani, A., Afrand, M., Farsani, A. K., Karimi, N., Sharifpur, M. (2023). Entropy generation and exergy analysis of Ag–MgO/water hybrid nanofluid within a circular heatsink with different number of outputs. *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 107891. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2022.107891

Ajarostaghi, S. S. M., Zaboli, M., Javadi, H., Badenes, B., Urchueguia, J. F. (2022). A Review of Recent Passive Heat Transfer Enhancement Methods. *Energies 2022, Vol. 15, Page 986*, 15(3), 986. doi:10.3390/EN15030986

Alahmer, A., Al-Manea, A., Al-Rbaihat, R., Ajib, S., Saleh, K., Dendy, A. (2025). Editorial: Advances in heat transfer science: Enhanced techniques for modern industrial applications. *International Journal of Thermofluids*, 26, 101145. doi:10.1016/J.IJFT.2025.101145

Al-Haidari, S. R., Al-Obaidi, A. R., Saleh, Z. M., Mohammed, A., Ismail, H. B. (2025). Enhancement of thermohydraulic performance in 3D pipe based on different concavity dimpled surfaces: Numerical and experimental investigation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 75, 107153. doi:10.1016/J.CSITE.2025.107153

Al-Obaidi, A. R. (2025). Effect of varying passive interrupted geometrical techniques to implement novel parametric assessment of improving thermal-hydraulic performance in 3D pipe. *Applied Thermal Engineering*, 273, 126471. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2025.126471

Alqaed, S., Mustafa, J., Sharifpur, M. (2024). Numerical and optimization study of turbulent water-copper nanofluid flow in a heat exchanger in power plant with conical rings: Investigating conical ring hole diameter's influence. *Annals of Nuclear Energy*, 203, 110494. doi:10.1016/J.ANUCENE.2024.110494

Amniyeh Vatanparast, M., Hossainpour, S., Keyhani-Asl, A., Forouzi, S. (2020). Numerical investigation of total entropy generation in a rectangular channel with

staggered semi-porous fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 111, 104446. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2019.104446

Aslan, O. (2021). Farklı En/Boy Oranlarına Sahip Dörtgen Kanallarda Nanoakışkan Akışının ve Isı Transferinin Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. http://acikerisim.karabuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/1423.

Avila, M., Barkley, D., Hof, B. (2023). Transition to Turbulence in Pipe Flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 55(Volume 55, 2023), 575-602. doi:10.1146/ANNUREV-FLUID-120720-025957/CITE/REFWORKS

Banihashemi, S., Assari, M., Javadi, S., Vahidifar, S. (2024). Study the effect of innovative active and passive methods on thermal characteristics and turbulent flow behaviour in a heat exchanger pipe. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2024 149:2*, 149(2), 777-797. doi:10.1007/S10973-023-12728-7

Bashir, M. A., Ali, H. M. (2025). Numerical investigation of passive cooling of the PV module using extended fin heat sinks: A parametric analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 195, 106749. doi:10.1016/J.PSEP.2025.01.003

Ben Said, L., Ali, A. B. M., Alizadeh, A., Mausam, K., Dixit, S., Ali, R., … Kolsi, L. (2025). Development of improved heat transfer of double helical pipe heat exchangers using nano-fluids and perforated curved tabulators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70, 106106. doi:10.1016/J.CSITE.2025.106106

Bhadouriya, R., Agrawal, A., Prabhu, S. V. (2015). Experimental and numerical study of fluid flow and heat transfer in a twisted square duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 143-158. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2014.11.054

Bhattacharyya, S., Vishwakarma, D. K., Srinivasan, A., Soni, M. K., Goel, V., Sharifpur, M., … Meyer, J. (2022). Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2022 147:17*, 147(17), 9229-9281. doi:10.1007/S10973-021-11168-5

Bizuneh, Y. E., Kassie, T. D., Gebresilassie, E. B., Bizuneh, A. E. (2025). Numerical investigation on heat transfer of CuO-water nano-fluid in a circular pipe with twisted tape inserts. *International Journal of Thermofluids*, 27, 101260. doi:10.1016/J.IJFT.2025.101260

Błasiak, P., Pietrowicz, S. (2019). A numerical study on heat transfer enhancement via mechanical aids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 203-215. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.05.116

C., R. B., Kumar, P., Roy, S., Ganesan, R. (2022). A comprehensive review on compound heat transfer enhancement using passive techniques in a heat

exchanger. *Materials Today: Proceedings*, 54, 428-436. doi:10.1016/J.MATPR.2021.09.541

Chandratilleke, T. T., Jagannatha, D., Narayanaswamy, R. (2010). Heat transfer enhancement in microchannels with cross-flow synthetic jets. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(3), 504-513. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2009.09.004

Chaurasiya, P. K., Heeraman, J., Singh, S. K., Verma, T. N., Dwivedi, G., Shukla, A. K. (2024). Exploring the combined influence of primary and secondary vortex flows on heat transfer enhancement and friction factor in a dimpled configuration twisted tape with double pipe heat exchanger using SiO2 nano fluid. *International Journal of Thermofluids*, 22, 100684. doi:10.1016/J.IJFT.2024.100684

Chen, C. W., Yang, C. Y., Hu, Y. T. (2013). Heat transfer enhancement of spray cooling on flat aluminum tube heat exchanger. *Heat Transfer Engineering*, 34(1), 29-36. doi:10.1080/01457632.2013.694742;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:UHTE20;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Cheng, L., Luan, T., Du, W., Xu, M. (2009). Heat transfer enhancement by flow-induced vibration in heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(3-4), 1053-1057. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2008.05.037

Cheng, Y., Yu, H., Zhang, Y., Zhang, S., Shi, Z., Xie, J., … Liu, C. (2024). Heat Transfer Mechanism Study of an Embedded Heat Pipe for New Energy Consumption System Enhancement. *Energies 2024, Vol. 17, Page 6162*, 17(23), 6162. doi:10.3390/EN17236162

Cheraghi, M. H., Ameri, M., Shahabadi, M. (2020). Numerical study on the heat transfer enhancement and pressure drop inside deep dimpled tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147, 118845. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.118845

Choudhary, S., Mehta, A., Mehta, R. (2025). Computational analysis of thermophoresis and brownian motion effects in bioconvective MHD casson hybrid nanofluid (Ag-Al2O3/H2O) flow past a moving slender needle. *Results in Engineering*, 27, 106947. doi:10.1016/J.RINENG.2025.106947

Çengel, Cimbala. (2020). *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları*. Palme Yayınevi.

Dabestani, A., Kahani, M. (2024). CFD analysis of rotation effect on flow patterns and heat transfer enhancement in a horizontal spiral tube heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105494. doi:10.1016/J.CSITE.2024.105494

D’Addio, L., Carotenuto, C., Di Natale, F., Nigro, R. (2013). Heating and cooling of hazelnut paste in alternate blades scraped surface heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 115(2), 182-189. doi:10.1016/J.JFOODENG.2012.10.011

Dağdeviren, A., Gürsoy, E., Gedik, E., Arslan, K. (2025). Heat transfer and entropy analysis of Fe3O4/H2O ferrofluid in teardrop-dimpled circular tubes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2025 150:23*, 150(23), 19657-19676. doi:10.1007/S10973-025-14972-5

Deeb, R. (2025). Impact of dimple geometry modifications on flow separation, reattachment, and heat transfer over a dimpled plate. *Applied Thermal Engineering*, 280, 128081. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2025.128081

Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175. doi:10.1016/S1364-0321(99)00011-8

Dizaji, H. S., Pourhedayat, S., Aldawi, F., Moria, H., Anqi, A. E., Jarad, F. (2022). Proposing an innovative and explicit economic criterion for all passive heat transfer enhancement techniques of heat exchangers. *Energy*, 239, 122271. doi:10.1016/J.ENERGY.2021.122271

Duan, D., Cheng, Y., Ge, M., Bi, W., Ge, P., Yang, X. (2022). Experimental and numerical study on heat transfer enhancement by Flow-induced vibration in pulsating flow. *Applied Thermal Engineering*, 207, 118171. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118171

Duan, D., Ge, P., Bi, W. (2018). Numerical study on the heat transfer enhancement and fatigue life by flow-induced vibration. *Chemical Engineering Research and Design*, 132, 652-663. doi:10.1016/J.CHERD.2018.02.010

Egner, M. W., Burmeister, L. C. (2005). Heat Transfer for Laminar Flow in Spiral Ducts of Rectangular Cross Section. *Journal of Heat Transfer*, 127(3), 352-356. doi:10.1115/1.1857950

Elshafei, E. A. M., Awad, M. M., El-Negiry, E., Ali, A. G. (2010). Heat transfer and pressure drop in corrugated channels. *Energy*, 35(1), 101-110. doi:10.1016/J.ENERGY.2009.08.031

Falih, A. H., Khalaf, B. S., Freegah, B. (2024). Investigate the Impact of Dimple Size and Distribution on the Hydrothermal Performance of Dimpled Heat Exchanger Tubes. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 22(2), 597-613. doi:10.32604/FHMT.2024.049812

Fares, M. N., AL-Saad, M., Almutter, H. H. J., Jasim, D. J., Fazilati, M. A., Salahshour, S., Baghaei, S. (2024). Two-phase analysis of heat transfer of nanofluid flow in a

wavy channel heat exchanger: A numerical approach. *International Journal of Thermofluids*, 23, 100786. doi:10.1016/J.IJFT.2024.100786

Farnam, M., Khoshvaght-Aliabadi, M., Asadollahzadeh, M. J. (2018). Heat transfer intensification of agitated U-tube heat exchanger using twisted-tube and twisted-tape as passive techniques. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 133, 137-147. doi:10.1016/J.CEP.2018.10.002

Firoozi, A. O., Majidi, S., Ameri, M. (2020). A numerical assessment on heat transfer and flow characteristics of nanofluid in tubes enhanced with a variety of dimple configurations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100578. doi:10.1016/J.TSEP.2020.100578

Gan, T., Ming, T., Fang, W., Liu, Y., Miao, L., Ren, K., Ahmadi, M. H. (2019). Heat transfer enhancement of a microchannel heat sink with the combination of impinging jets, dimples, and side outlets. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2019 141:1*, 141(1), 45-56. doi:10.1007/S10973-019-08754-Z

Ghajar, A. J., Tam, L. M. (1994). Heat transfer measurements and correlations in the transition region for a circular tube with three different inlet configurations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 8(1), 79-90. doi:10.1016/0894-1777(94)90075-2

Gravndyan, Q., Akbari, O. A., Toghraie, D., Marzban, A., Mashayekhi, R., Karimi, R., Pourfattah, F. (2017). The effect of aspect ratios of rib on the heat transfer and laminar water/TiO2 nanofluid flow in a two-dimensional rectangular microchannel. *Journal of Molecular Liquids*, 236, 254-265. doi:10.1016/J.MOLLIQ.2017.04.030

Gürdal, M. (2023). Artificial intelligence approach for energy and entropy analyses of NiFe2O4/H2O nanofluid flow in a tube with vortex generator. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 152, 277-292. doi:10.1016/J.ENGANABOUND.2023.04.016

Gürdal, M., Arslan, K., Gedik, E., Minea, A. A. (2022). Effects of using nanofluid, applying a magnetic field, and placing turbulators in channels on the convective heat transfer: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112453. doi:10.1016/J.RSER.2022.112453

Gürdal, M., Gürsoy, E., Pazarlıoğlu, H. K., Arslan, K., Gedik, E. (2023). An innovative approach of alternating magnetic field diversified with different wave types and magnet positions for ferrofluid flow in dimpled tube. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 581, 170975. doi:10.1016/J.JMMM.2023.170975

Gürdal, M., Pazarlıoğlu, H. K., Tekir, M., Altunay, F. M., Arslan, K., Gedik, E. (2022). Implementation of hybrid nanofluid flowing in dimpled tube subjected to

magnetic field. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 134, 106032. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2022.106032

Gürsoy, E., Ergün, A., Gedik, E. (2024). Effect of Different Dimpled Fin Configurations and Angles on Entropy Generation, Flow Behavior, and Thermal Performance. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 12(4), 1895-1912. doi:10.29130/DUBITED.1473175

Gürsoy, E., Gürdal, M., Kadir Pazarlıoğlu, H., Dağdeviren, A., Tekir, M., Arslan, K., … Kurt, H. (2023). Effect of magnetic field locations on thermo-magnetic convection performance of Fe3O4/H2O ferrofluid flowing in a novel dimpled tube: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120305. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120305

Gürsoy, E., Pazarlıoğlu, H. K., Gürdal, M., Gedik, E., Arslan, K. (2024). Parametric analysis of different Al2O3 nanoparticle shapes and expansion angles for sudden expanded tube regarding the first law of thermodynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 197, 108759. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2023.108759

Habibishandiz, M., Saghir, M. Z. (2022). A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms. *Thermal Science and Engineering Progress*, 30, 101267. doi:10.1016/J.TSEP.2022.101267

Heaton, H. S., Reynolds, W. C., Kays, W. M. (1964). Heat transfer in annular passages. Simultaneous development of velocity and temperature fields in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 7(7), 763-781. doi:10.1016/0017-9310(64)90006-7

Hosseinian, A., Meghdadi Isfahani, A. H. (2017). Experimental study of heat transfer enhancement due to the surface vibrations in a flexible double pipe heat exchanger. *Heat and Mass Transfer 2017 54:4*, 54(4), 1113-1120. doi:10.1007/S00231-017-2213-2

Hosseinian, A., Meghdadi Isfahani, A. H., Shirani, E. (2018). Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coeffcient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90, 275-285. doi:10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2017.09.018

Islam, M., Nurizki, A., Ayish, N., Alam, M. M., Eveloy, V., Alvarado, J. (2025). Experimental investigation of heat transfer enhancement with radially arrayed delta winglets in a heat exchanger tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 167, 109357. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2025.109357

Jia, Y., Nadeem, M., Hameed, I., Waris, I., Akram, U. (2024). Towards sustainable consumption: Factors influencing energy-efficient appliance adoption in haze-affected environments. *Energy Strategy Reviews*, 53, 101416. doi:10.1016/J.ESR.2024.101416

Johari, M., Hoshyar, H. A., Dabirian, E., Ganji, D. D. (2025). Advanced thermal management in X-ray systems using magnetohydrodynamic nanofluids and Cattaneo-Christov heat flux model. *Scientific Reports 2025 15:1*, 15(1), 22820-. doi:10.1038/s41598-025-04011-6

Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268-289. doi:10.1016/J.TSEP.2018.04.017

Kanoğlu, M. (2010). ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÖRNEK PROJELERİ. *Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*. doi:https://www.pw.com.tr/ss/upload/upload2263.pdf

Kararoodi, M. N., Dolati, F., Taromsari, M. M. (2025). Electrohydrodynamic enhanced heat transfer in a channel with rectangular heated body. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 169, 109552. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2025.109552

Kareem, A. K., Turki, A. H., Mohsen, A. M. (2025). Optimization of turbulent flow heat transfer in a 3D cubic shell heat exchanger using non-mixture multiphase nanofluids. *Journal of Engineering Research*, 13(4), 3687-3702. doi:10.1016/J.JER.2024.10.013

Khan, M. A., Ilyas, M., Waheed, K., Haq, I., Aydogan, F. (2025). Advances in passive heat transfer enhancement for heat exchangers: a comprehensive review. *Journal of Thermal Engineering*, 11(4), 1148-1159. doi:10.14744/THERMAL.0000972

Kim, B. (2016). An experimental study on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62, 224-232. doi:10.1016/J.IJHEATFLUIDFLOW.2016.10.007

Kumar Ahirwar, B., Kumar, A. (2025). A comprehensive review on heat transfer enhancement in tubular heat exchangers using twisted tapes, wire coil inserts, and their combined effect with nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 224, 116035. doi:10.1016/J.RSER.2025.116035

Kumar, M. S., Abraham, S. (2025). Experimental and numerical studies of detailed heat transfer and flow characteristics in the rib turbulated annulus of a double pipe heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 207, 109382. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2024.109382

Kumar, R., Premachandran, B. (2024). Enhancement of pool boiling performance through an asymmetric dual V-groove microchannel structured surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 221, 125096. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2023.125096

Kumar, S., Amano, R. S. (2014). Experimental investigation of heat transfer and flow using V and broken V ribs within gas turbine blade cooling passage. *Heat and Mass Transfer 2014 51:5*, 51(5), 631-647. doi:10.1007/S00231-014-1436-8

Laohalertdecha, S., Naphon, P., Wongwises, S. (2007). A review of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 858-876. doi:10.1016/J.RSER.2005.07.002

Léal, L., Miscevic, M., Lavieille, P., Amokrane, M., Pigache, F., Topin, F., … Tadrist, L. (2013). An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61(1), 505-524. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2013.01.083

Legay, M., Le Person, S., Gondrexon, N., Boldo, P., Bontemps, A. (2012). Performances of two heat exchangers assisted by ultrasound. *Applied Thermal Engineering*, 37, 60-66. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.12.051

Levy, E., Neti, S., Brown, G., Bayat, F., Kadambi, V. (1986). Laminar Heat Transfer and Pressure Drop in a Rectangular Duct Rotating About a Parallel Axis. *Journal of Heat Transfer*, 108(2), 350-356. doi:10.1115/1.3246928

Luo, L., Wang, C., Wang, L., Sundén, B., Wang, S. (2016). Heat transfer and friction factor performance in a pin fin wedge duct with different dimple arrangements. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 69(2), 209-226. doi:10.1080/10407782.2015.1052301;ISSUE:ISSUE:DOI

Luo, Y., Li, G., Bennett, N. S., Luo, Z., Munir, A., Islam, M. S. (2025). Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers by Longitudinal Vortex Generators: A Review of Numerical and Experimental Approaches. *Energies 2025, Vol. 18, Page 2896*, 18(11), 2896. doi:10.3390/EN18112896

Mahdavi, A., Farhadi, M., Gorji-Bandpy, M., Mahmoudi, A. (2024). A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123519. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.123519

Manglik, R. M., Patel, P., Jog, M. A. (2013). Enhanced Laminar Flow Convection Heat Transfer in Longitudinally Twisted Rectangular Ducts. *ASME 2012 Heat Transfer Summer Conf. Collocated with the ASME 2012 Fluids Engineering Div. Summer Meeting and the ASME 2012 10th Int. Conf. on Nanochannels,*

Microchannels and Minichannels, HT 2012, 2, 95-101. doi:10.1115/HT2012-58304

Marusic, I., Mathis, R., Hutchins, N. (2010). High Reynolds number effects in wall turbulence. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(3), 418-428. doi:10.1016/J.IJHEATFLUIDFLOW.2010.01.005

Marzouk, S. A., Abou Al-Sood, M. M., El-Said, E. M. S., Younes, M. M., El-Fakharany, M. K. (2023). A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2023 148:15*, 148(15), 7539-7578. doi:10.1007/S10973-023-12265-3

Mashayekh, K., Etminan, A., Pope, K., Muzychka, Y. S. (2026). Turbulent flow and heat transfer enhancement for straight circular and twisted oval tubes with different dimple shapes. *International Journal of Thermal Sciences*, 220, 110411. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2025.110411

Mitsudharmadi, H., Tay, C. M. J., Tsai, H. M. (2009). Effect of rounded edged dimple arrays on the boundary layer development. *Journal of Visualization 2009 12:1*, 12(1), 17-25. doi:10.1007/BF03181939

Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3-17. doi:10.1016/0894-1777(88)90043-X

Mohit, M. K., Gupta, R. (2022). Numerical investigation of the performance of rectangular micro-channel equipped with micro-pin-fin. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101884. doi:10.1016/J.CSITE.2022.101884

Morini, G. L. (2004). Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(7), 631-651. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2004.01.003

Nandakumar, K., Masliyah, J. H. (1983). Steady laminar flow through twisted pipes: Fluid flow and heat transfer in rectangular tubes. *Chemical Engineering Communications*, 21(1-3), 151-173. doi:10.1080/00986448308940283;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:GCEC20;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Nawaz, R., Kazi, S. N., Chew, B. T., Mohd Zubir, M. N., Shaikh, K., Hasnain, S. U., Khan, W. A. (2025). Critical Review of Corrugation in Tubular Heat Exchangers: Focus on Thermal and Economical Aspects. *ChemBioEng Reviews*, 12(1), e202400023. doi:10.1002/CBEN.202400023;CTYPE:STRING:JOURNAL

Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300. doi:10.1016/J.RSER.2007.05.001

Osman, S., Sharifpur, M., Meyer, J. P. (2019). Experimental investigation of convection heat transfer in the transition flow regime of aluminium oxide-water nanofluids in a rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 895-902. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.12.169

Parsaiemehr, M., Pourfattah, F., Akbari, O. A., Toghraie, D., Sheikhzadeh, G. (2018). Turbulent flow and heat transfer of Water/Al2O3 nanofluid inside a rectangular ribbed channel. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 96, 73-84. doi:10.1016/J.PHYSE.2017.10.012

Pazarlıoğlu, H. K., Gürdal, M., Tekir, M., Arslan, K., Gedik, E. (2022). IMPACT OF TWISTED DUCTS WITH DIFFERENT TWIST RATIOS ON HEAT TRANSFER AND FLUID CHARACTERISTICS OF NiO/WATER NANOFLUID FLOW UNDER MAGNETIC FIELD EFFECT. *Heat Transfer Research*, 53(4), 55-71. doi:10.1615/HEATTRANSRES.2022041263

Pourahmad, S., Pesteei, S. M., Ravaeei, H., Khorasani, S. (2021). Experimental study of heat transfer and pressure drop analysis of the air/water two-phase flow in a double tube heat exchanger equipped with dual twisted tape turbulator: Simultaneous usage of active and passive methods. *Journal of Energy Storage*, 44, 103408. doi:10.1016/J.EST.2021.103408

Pukhovoy, M. V., Kunts, K. A., Spesivtsev, S. E., Kabov, O. A. (2021). Maximum heat fluxes and features of heat transfer mechanisms with boiling during jet impingement cooling of electronics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1867(1), 012036. doi:10.1088/1742-6596/1867/1/012036

Raad Al-Haidari, S., Mohammed, A., Ramadhan Al-Obaidi, A. (2024). Analysis of thermal hydraulic flow and heat transfer augmentation in dimpled tubes based on experimental and CFD investigations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 110, 109604. doi:10.1016/J.IJHEATFLUIDFLOW.2024.109604

Rahmati, A. R., Akbari, O. A., Marzban, A., Toghraie, D., Karimi, R., Pourfattah, F. (2018). Simultaneous investigations the effects of non-Newtonian nanofluid flow in different volume fractions of solid nanoparticles with slip and no-slip boundary conditions. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 263-277. doi:10.1016/J.TSEP.2017.12.006

Saenpong, A., Promthaisong, P., Watcharasresomroeng, B., Bubphachot, B. (2025). Thermal performance enhancement in a circular tube with louvered V-winglet inserts: effect of louver angle and opening area. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76, 107358. doi:10.1016/J.CSITE.2025.107358

Saha, S., Biswas, P., Raut, S., Das, A. N. (2022). Convective heat transfer of laminar nano-fluids flow through a rectangular micro-channel with different types of baffle-corrugation. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 23(1), 1-11. doi:10.1080/15502287.2021.1894509;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Saha, S. K., Dutta, A., Dhal, S. K. (2001). Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(22), 4211-4223. doi:10.1016/S0017-9310(01)00077-1

Sayed Ahmed, S. A. E., Mesalhy, O. M., Abdelatief, M. A. (2015). Flow and heat transfer enhancement in tube heat exchangers. *Heat and Mass Transfer 2015 51:11*, 51(11), 1607-1630. doi:10.1007/S00231-015-1669-1

Setareh, M., Saffar-Avval, M., Abdullah, A. (2019). Experimental and numerical study on heat transfer enhancement using ultrasonic vibration in a double-pipe heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113867. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.113867

Shafiei, S., Salim, R. A. (2014). Non-renewable and renewable energy consumption and CO2 emissions in OECD countries: A comparative analysis. *Energy Policy*, 66, 547-556. doi:10.1016/J.ENPOL.2013.10.064

Shah, R., London, A. (2014). Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data. https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=D-JbAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=yqYX7vwNaI&sig=C3E2py0iv0SotIroz0JePPH-vN4.

Shank, K. ;, Tiari, S. A., Sousa, C. M., Shank, K., Tiari, S. (2023). A Review on Active Heat Transfer Enhancement Techniques within Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *Energies 2023, Vol. 16, Page 4165*, 16(10), 4165. doi:10.3390/EN16104165

Sharma, P., Singh, P. K., Santosh, ·, Sahu, K., Yadav, H., In, K. A. (2021). A Critical Review on Flow and Heat Transfer Characteristics of Synthetic Jet. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering 2021 7:1*, 7(1), 61-92. doi:10.1007/S41403-021-00264-5

Sheikhi Azizi, A., Jahanian, O., Mousavi Ajarostaghi, S. S., Arıcı, M. (2024). Employing uniform and non-uniform inner twisted elliptical tubes in a double-pipe heat exchanger. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 107, 109384. doi:10.1016/J.IJHEATFLUIDFLOW.2024.109384

Shelare, S. D., Aglawe, K. R., Belkhode, P. N. (2022). A review on twisted tape inserts for enhancing the heat transfer. *Materials Today: Proceedings*, 54, 560-565. doi:10.1016/J.MATPR.2021.09.012

Silva-Llanca, L., Ortega, A. (2017). Vortex dynamics and mechanisms of heat transfer enhancement in synthetic jet impingement. *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 153-164. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2016.09.021

Sohrabi, N., Hammoodi, K. A., Hammoud, A., Jasim, D. J., Hashemi Karouei, S. H., Kheyri, J., Nabi, H. (2024). Using different geometries on the amount of heat transfer in a shell and tube heat exchanger using the finite volume method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104037. doi:10.1016/J.CSITE.2024.104037

Sparrow, E. M., Hixon, C. W., Shavit, G. (1967). Experiments on Laminar Flow Development in Rectangular Ducts. *Journal of Basic Engineering*, 89(1), 116-123. doi:10.1115/1.3609536

Suri, A. R. S., Kumar, A., Maithani, R. (2018). Convective heat transfer enhancement techniques of heat exchanger tubes: a review. *International Journal of Ambient Energy*, 39(7), 649-670. doi:10.1080/01430750.2017.1324816;SUBPAGE:STRING:ACCESS

Taskesen, E., Tekir, M., Gedik, E., Arslan, K. (2021). Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation of Fe3O4/water nanofluids in different cross-sectioned channel geometries. *Journal of Thermal Engineering*, 7(7), 1752-1767. doi:10.18186/THERMAL.1025984

Tawfik, M. M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253. doi:10.1016/J.RSER.2016.11.111

Tepe, A. Ü. (2021). Kanatlı-Borulu Isı Değiştiricilerinde Çukurlu/Çıkıntılı Kanat ile Isı Transfer Performansının Arttırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 401-414. doi:10.31590/EJOSAT.874885

Thabet, E. N., Khan, Z., Abd-Alla, A. M., Bayones, F. S. (2025). Thermal enhancement, thermophoretic diffusion, and Brownian motion impacts on MHD micropolar nanofluid over an inclined surface: Numerical simulation. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 86(4), 871-890. doi:10.1080/10407782.2023.2276319;ISSUE:ISSUE:DOI

Thapa, S., Samir, S., Kumar, K., Singh, S. (2021). A review study on the active methods of heat transfer enhancement in heat exchangers using electroactive and magnetic materials. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4942-4947. doi:10.1016/J.MATPR.2021.01.382

Topuz, A., Engin, T., Alper Özalp, A., Erdoğan, B., Mert, S., Yeter, A. (2017). Experimental investigation of optimum thermal performance and pressure drop of water-based Al2O3, TiO2 and ZnO nanofluids flowing inside a circular microchannel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2017 131:3*, 131(3), 2843-2863. doi:10.1007/S10973-017-6790-6

Topuz, A., Engin, T., Ozalp, A. A., Erdogan, B., Mert, S., Yeter, A. (2017). Preparation and Stability Analysis of Water Based Al2O3, TiO2 and ZnO Nanofluids. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(1), 70-78. https://dergipark.org.tr/en/pub/ejens/article/293097.

Uysal, C., Arslan, K., Kurt, H. (2016). A numerical analysis of fluid flow and heat transfer characteristics of ZnO-Ethylene glycol nanofluid in rectangular microchannels. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 62(10), 603-613. doi:10.5545/SV-JME.2015.3170

URL-1.https://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf ANSYS Fluent Tutorial Guide. (2017). Erişim tarihi: 21/12/2025.

Wang, Q., Su, M., Li, R. (2018). Toward to economic growth without emission growth: The role of urbanization and industrialization in China and India. *Journal of Cleaner Production*, 205, 499-511. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.034

Wang, T. H., Peng, M., Wang, X. D., Yan, W. M. (2017). Investigation of heat transfer enhancement by electrohydrodynamics in a double-wall-heated channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 373-383. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.05.079

Wang, X. Q., Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1-19. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2006.06.010

Xie, G., Liu, J., Ligrani, P. M., Zhang, W. (2013). Numerical analysis of flow structure and heat transfer characteristics in square channels with different internal-protruded dimple geometrics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 81-97. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2013.07.094

Xie, J. L., Tan, Y. B., Duan, F., Ranjith, K., Wong, T. N., Toh, K. C., … Chan, P. K. (2013). Study of heat transfer enhancement for structured surfaces in spray cooling. *Applied Thermal Engineering*, 59(1-2), 464-472. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.05.047

Xie, S., Liang, Z., Zhang, J., Zhang, L., Wang, Y., Ding, H. (2019). Numerical investigation on flow and heat transfer in dimpled tube with teardrop dimples. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 713-723. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.11.112

Xing, D., Yan, C., Wang, C., Sun, L. (2013). A theoretical analysis about the effect of aspect ratio on single-phase laminar flow in rectangular ducts. *Progress in Nuclear Energy*, 65, 1-7. doi:10.1016/J.PNUCENE.2013.01.003

Xu, C., Rao, Y., Zhang, P. (2025). Experimental and numerical studies of turbulent flow and heat transfer enhancement over oblong-dimple patterned surfaces. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 115, 109863. doi:10.1016/J.IJHEATFLUIDFLOW.2025.109863

Yakut, K., Sahin, B. (2004). Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers. *Applied Energy*, 78(3), 273-288. doi:10.1016/J.APENERGY.2003.09.001

Yang, T., Zhang, W., Wang, J., Liu, C., Yuan, M. (2022). Numerical investigation on heat transfer enhancement and surface temperature non-uniformity improvement of spray cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 173, 107374. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2021.107374

Yildiz Töre, G., Elitaş, G., Mühendisliği Bölümü, Ç., Mühendislik Fakültesi, Ç., Namık Kemal Üniversitesi, T., Bilimleri Enstitüsü, F. (2022). Industrial Energy Efficiency Technologies and Management Applications in Turkey. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 55-72. doi:10.55581/EJEAS.1217357

Yousuf, M. U., Irshad, M. A., Umair, M. (2024). Identifying barriers and drivers for energy efficiency in steel and iron industries of Karachi, Pakistan: Insights from executives and professionals. *Energy Nexus*, 14, 100284. doi:10.1016/J.NEXUS.2024.100284

Zhang, D., Jiang, E., Zhou, J., Shen, C., He, Z., Xiao, C. (2020). Investigation on enhanced mechanism of heat transfer assisted by ultrasonic vibration. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 115, 104523. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2020.104523

Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E., Haglind, F. (2019). A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 305-328. doi:10.1016/J.RSER.2018.11.017

Zhang, L., Guo, H., Wu, J., Du, W. (2012). Compound heat transfer enhancement for shell side of double-pipe heat exchanger by helical fins and vortex generators. *Heat and Mass Transfer 2012 48:7*, 48(7), 1113-1124. doi:10.1007/S00231-011-0959-5

Zontul, H., Hamzah, H., Kurtulmuş, N., Şahin, B. (2021). Investigation of convective heat transfer and flow hydrodynamics in rectangular grooved channels.

International Communications in Heat and Mass Transfer, 126, 105366. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2021.105366