

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI

Cu-SU NANOAKIŞKANLI ÇARPAN JET KULLANILARAK KISMEN
ELASTİK VE ELİPTİK BİR YÜZEYİN MANYETİK ALAN ETKİSİ
ALTINDA SOĞUTULMASI

Mehmet ÇOĞAN

Danışman
Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL



MANİSA-2021

**Mehmet
OĞAN**

**Cu-SU NANOAKIŞKANLI ÇARPAN JET KULLANILARAK KISMEN ELASTİK VE
ELİPTİK BİR YÜZEYİN MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDA SOĞUTULMASI**

2021

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mehmet ÇOĞAN



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Çarpan Jetlerde Eğrilik Etkisi.....	3
2.2. Çarpan Jetlerde Nanoakışkan Kullanımı	4
2.3. Manyetik Alan Etkisi Altında Çarpan Jetler	9
2.4. Çarpan Jetlerde Elastik Yüzey İncelemesi	11
2.5 Tez Amacı	12
3. GENEL BİLGİLER	13
3.1. Çarpan Jetler.....	13
3.1.1 Çarpan jetlerde ısı transferi.....	15
3.1.2 Çarpan jet akış yapısı.....	22
3.2. Isı Transferini İyileştirme Yöntemleri.....	23
3.2.1 Pasif Yöntemler	24
3.2.2 Aktif Yöntemler.....	30
3.2.3 Bileşik Etki	33
3.3. Nanoakışkanlar	34
3.3.1 Nanoakışkanların Hazırlanması.....	40
3.3.2 Nanoakışkanların kararlılığı	44
3.3.3 Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler	46
3.4 Manyetohidrodinamik (MHD) Akış.....	52
4. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	55
4.1. Tasarım Geometrisi	55
4.2. Genel Denklemler ve Sınır Koşulları	56
4.3. Çözüm Yöntemi	58
4.4. Sonlu Elemanlar Analizi	58
4.5. Comsol Multiphysics.....	64
4.6. Ağ Yapısı.....	66
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	68
5.1. Araştırma Bulguları.....	68
5.1.1 Reynolds Sayısının Etkisi.....	68
5.1.2. Hartmann Sayısının Etkisi	71
5.1.3. Eğrilğin Etkileri	78
5.1.4. Elastisite Etkisi	81
5.2. Tartışma.....	85
5.2.1 Nanopartikül Etkisi.....	85
5.2.2. Manyetik Alan Etkisi.....	87
5.2.3. Eğrilğin Etkileri	89
5.2.4. Elastisite Etkisi	90
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	106

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ρ	Yoğunluk
ρ_{bf}	Baz sıvının yoğunluğu
ρ_{nf}	Nanoakışkanın yoğunluğu
ρ_{np}	Partikülün yoğunluğu
ϕ	Hacim fraksiyonu/ hacim konsantrasyonu
ADF	Adi diferansiyel denklemler
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum oksit
Au	Altın
BNNT	Boron nitrit nanotüp
C	Sabit bir sayı
CNT	Karbon nanotüp
C_p	Isı kapasitesi
CTAB	Setiltrimetilamonyumbromid
Cu	Bakır
CuO	Bakır oksit
D	Jet çapı
D_h	Nozulun hidrolik çapını
DI	Deiyonize
DSC	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi
DTAB	Dodesil trimetilamonyum bromür
E	Elastisite modülü
EG	Etilen glikol
EHD	Elektro hidrodinamik
EO	Motor yağı
Fe	Demir
Fe₃O₄	Demir oksit

FEM Sonlu eleman yöntemi

h Isı transfer katsayısı

H Jet çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe

H₂O Su

HCTAB Heksadesiltrimetilamonyumbromid

HTC Isı transfer katsayısı

k Isıl iletkenlik

KDD Kısmi diferansiyel denklemler

KKL Koo- Kleinstreuer- Li

MDSC Modüler Diferansiyel Tarama Kalorimetresi

MgO Magnezyum oksit

MHD Manyetohidrodinamik

MWCNT Çok duvarlı karbon nanotüp

N Stuart sayısı

NaBDS Bis (1-dodesenil süksinamik asit) sodyum tuzu

nm Nanometre

Nu Nusselt sayısı

Nu_{avg} Ortalama Nusselt sayısı

Nu_{st} Durgunluk noktası Nusselt sayısı

Pr Prandtl sayısı

q_w Duvar ısı akısı

Re Reynolds sayısı

SANSS Batık ark nanopartikül sentez sistemi

SDBS Sodyum dodesilbenzen sülfonat yüzey aktif madde

SDS Sodyum dodesilsülfat

Si Silisyum

SiC Silisyum karbür

SiO₂ Silikondioksit

SOCT Sodyum oktanoat

ST Yüzey gerilimi

SWCNT Tek duvarlı karbon nanotüp

SYA Spesifik yüzey alanı

T Sıcaklık

t Zaman

TEM Geçirimli elektron mikroskobu

TiO₂ Titanyumdioksit

T_{ref} Referans sıcaklık

T_w Duvar sıcaklığı

V Hız

VEROS Akan Yağ Alt Tabakasında Vakumla Buharlaştırma

v_s Poisson oranı

W Duvar

ZnO Çinko oksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Çarpan jet tipleri	14
Şekil 3.2. Çarpan jetlerde kullanılan nozul tipleri (a) bir orifis tipi nozul (b) orifis türleri (c) uzun boru veya kanal tipi nozullar	16
Şekil 3.3. Çarpan jetlerde akış bölgeleri	22
Şekil 3.4. Talaşlı imalat ile üretilmiş kaynama yüzeyleri (a) derin tırtıklı yüzey (b) küçük kanat yüzeyler (c) sinterlenmiş partikül kaplanmış yüzey	25
Şekil 3.5. Pürüzlülük geometrileri	26
Şekil 3.6. Pürüzlü yüzeylere örnekler a) iki boyutlu b) üç boyutlu	26
Şekil 3.7. a) Elektronik soğutma için kullanılan tipik kanatlı soğutucular b) Kabuk ve borulu ısı eşanjörleri için dış yüzeylerinde çevresel ve şerit kanatlı borular	27
Şekil 3.8. a) plaka kanatlı ve b) tüp plaka kanatlı kompakt ısı değiştiricide kullanılan bazı genişletilmiş kanat geometrileri	27
Şekil 3.9. Yerinden edilmiş güçlendirme aracı (Tel matris tüp eki)	28
Şekil 3.10. Girdap akış cihazı	29
Şekil 3.11. Sarmal tüp	29
Şekil 3.12. Döner tip ısı değiştirici	31
Şekil 3.13. Akışkan hareketine ve ısı taşınımına manyetik alanın etkisini incelemek için kurulan deney düzeneği	32
Şekil 3.14. Çarpan jet akış bölgeleri	33
Şekil 3.15. Nanoakışkan bir sistemin çok değişkenliğinin şematik gösterimi	36
Şekil 3.16. Nanoakışkan stabilizasyon tekniklerinin sınıflandırılması	44
Şekil 3.17. Yüksek basınçlı homojenizatörün şematik gösterimi	45
Şekil 3.18. Nanopartikül, bulk akışkan ve nanotabakaları içeren nanoakışkan yapısı	46
Şekil 3.19. Nanoakışkanlarda termal iletkenliği etkileyen faktörler.....	47
Şekil 3.20. Manyetik alan etkisi altında kanal içinde hız profili.....	53
Şekil 3.21. Manyetik alan varlığında paralel bir plaka kanalı içinde nanopartikül hareketi.....	53
Şekil 4.1. Sınır koşulları ile birlikte geometrik model	55
Şekil 4.2. Çubuk uzunluğu boyunca(x) sıcaklık değişiminin eşit aralıklarla yaklaşık çözümü ve gerçek çözümü.....	59
Şekil 4.3. Çubuk uzunluğu boyunca(x) sıcaklık değişiminin farklı aralıklarla yaklaşık çözümü ve gerçek çözümü.....	59
Şekil 4.4. Çakışan ve çakışmayan üçgensel bölgeler kullanarak ayırklaştırmak.....	64
Şekil 4.5. Comsol programında özelleştirilmiş ağ yapıları	65
Şekil 4.6. Problem geometrisinin ağ yapısına dair kesit	66
Şekil 4.7. Nusselt ve Reynolds numaralarına göre oluşturulan mesh kalite grafiği	67
Şekil 5.1. $\phi = 0.03$, $Ha=5$ için Reynolds sayısının akış çizgileri üzerindeki etkileri	69
Şekil 5.2. $\phi = 0.03$, $Ha=5$ için Reynolds sayısının izotermilere etkileri.....	70
Şekil 5.3. $\phi = 0.03$, $Ha=5$ için Reynolds sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına etkisi	71
Şekil 5.4. $\phi = 0.03$, $Re=700$ için Hartmann Numarasının akış hatları üzerindeki etkileri.....	72

Şekil 5.5. $\varphi = 0.03$, $Re=300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına etkileri.....	73
Şekil 5.6. $Ha = 0$ ve $Ha = 20$ sabit değerlerinde 100'den 700'e Reynolds sayısı için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları.....	75
Şekil 5.7. $Re=300$ 'de çeşitli Hartmann sayısı için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları.....	76
Şekil 5.8. $Re=300$ 'de $\varphi=0$, $\varphi=0.03$, $\varphi=0.05$ için çeşitli Hartmann sayıları için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları.....	78
Şekil 5.9. $\varphi = 0.05$, $Re=700$, $Ha=2$ için Eğriliğin akış çizgileri üzerindeki etkileri	79
Şekil 5.10. $Ha=2$ 'de Çeşitli eğriler için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları....	80
Şekil 5.11. $Re=700$ 'de Çeşitli eğriler için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları	81
Şekil 5.12. $Re = 700$, $\varphi = 0.03$ ve $Ha=2$ için çeşitli elastisite modül değerleri için duvarlardaki ortalama Nusselt sayıları.....	82
Şekil 5.13. $10^4, 10^5$ ve 10^9 arasındaki esneklik modülüne bağlı olarak yerel Nusselt dağılımı	84

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Farklı çarpan jet türlerinin karşılaştırılması.....	14
Tablo 3.2. Daldırılmış jetlerin arasında karşılaştırma.....	15
Tablo 3.3. Konvansiyonel çarpan jetler ile ilgili deneysel olarak yapılan çalışmalar	21
Tablo 3.4. Isı transferi arttırma tekniklerinin sınıflandırılması.....	24
Tablo 3.5. Nanoakışkanlarda kullanılan bazı katkı maddelerinin ve baz akışkanları termal iletkenlik değerleri.....	35
Tablo 3.6. İki adım metodu ile yapılan çalışmalara	41
Tablo 3.7. Tek adım metodu ile yapılan üretimlere örnekler.....	43
Tablo 3.8. Nanoakışkanlarda ısı iletkenliği hesaplamak için kullanılan modeller.....	48
Tablo 3.9. Nanokışkanların viskozitesi için en uygun modeller	49
Tablo 4.1. Baz akışkanın ve nanopartikülün termofiziksel özellikleri	57
Tablo 4.2. Ağ kalitesinin ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisi	67
Tablo 5.1. Sabit değerler ($\phi = 0.03$, $Ha = 5$) için Reynold sayısının (100'den 700'e) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre katkısı	71
Tablo 5.2. $\phi = 0.03$, $Re=300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına etkileri	74
Tablo 5.3. $Ha = 0$ için Reynold sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal analizi	75
Tablo 5.4. $Ha = 20$ için Reynold sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal analizi	76
Tablo 5.5. $Re = 300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal tablosu	77
Tablo 5.6. 0'dan 20'ye kadar Hartmann sayısı ve nanopartikül hacim konsantrasyonu için sıcak duvarların ortalama Nusselt sayısı değişimi	78
Tablo 5.7. $Ha = 2$, $\phi = 0.05$ için ortalama Nusselt sayıları ve Reynold sayılarına bağlı olarak duvarlardaki eğrilik etkisi.....	80
Tablo 5.8. $Re = 700$, $\phi = 0.05$ için ortalama Nusselt sayıları ve Hartmann sayılarına bağlı olarak duvarlardaki eğrilik etkisi.....	81
Tablo 5.9. Sabit değerler için ($\phi = 0.03$, $Ha = 2$, $Re = 700$) Young modülünün (10^4 'ten 10^9 'a) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre etkisi	83

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında engin bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarımın yönlendirilmesi ve yürütülmesi için gerekli desteği hiçbir zaman esirgemeyen, her aşamada bana güvenen, hayatım boyunca örnek alacağım değerli danışmanım Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL'e,

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, attığım her adımda bana güvenen, sevgili annem Necla ÇOĞAN'a ve babam Rafet ÇOĞAN'a, ablam Şeyma TAŞDEMİR'e, hayatıma neşe katan sevgili yeğenim Arya TAŞDEMİR'e, ve Özgü Beste CANGİR başta olmak üzere yanımda olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mehmet ÇOĞAN

Manisa, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Cu-Su Nanoakışkanlı Çarpan Jet Kullanılarak Kısmen Elastik ve Eliptik Bir Yüzeyin Manyetik Alan Etkisi Altında Soğutulması

Mehmet ÇOĞAN

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Bu tez çalışmasında, Cu-su nanoakışkanlı çarpan jetlerde kısmen elastik ve eğri yüzeyin ısı transferi ve akış yapısı manyetik alan etkisi altında sayısal olarak incelenmiştir. Isı ve kütle transferini artırarak etkin bir şekilde ısıtma, soğutma veya kurutma gibi işlemler yapabilmek için çeşitli ısı transferi artırma yöntemlerinden biri olan çarpan jetler günümüzde giderek önem kazanmaktadır. Çarpan jetlerde ısı transferini iyileştirmek için baz akışkanlara göre daha yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip metal veya metal oksit nanopartiküller içeren nanoakışkanlar birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu çalışmada 0, 0.03 ve 0.05 hacim fraksiyonunda (ϕ) nanopartikül içeren Cu-su nanoakışkanına, manyetik alan şiddetinin bir göstergesi olan Hartmann sayısının (Ha) 0, 2, 5, 10 ve 20 değerlerinde harici manyetik alan etkisinin akış ve ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, gerçek hayat ve mühendislik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan eğriliğin etkisi (eğri yüzeyin yarı eksenlerinin oranı olan $a/b=2/3$ ' ün $1/4$ 'ü, $1/2$ 'si ve $3/4$ 'ü olacak şekilde) incelenmiştir. Malzemelerin farklı elastisite modüllerinin olduğu göz önünde bulundurularak, çalışmada 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^8 , 10^9 elastisite modüllerine sahip değerlerde analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki hesaplamalar COMSOL paket programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonuçları akış, eş sıcaklık eğrileriyle gösterilmiş olup ayrıca ısı transferi değerleri de Nusselt sayıları ile ifade edilmiştir. Sonuçlar nanopartikül hacim fraksiyonunun artmasıyla birlikte ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Eğrilik etkisi dört farklı model için karşılaştırılmıştır. Modeller arasında tam eğriliğin diğer modellerden daha verimli sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu etki yüksek Reynolds sayıları için daha belirgin hale gelmektedir. Manyetik alanın eğri yüzey ve diğer yüzeylerde ısı transferini artırıcı etkisi gözlenmiştir. Bu artış Hartmann sayısının yüksek değerleri için akışı sönmüleme eğilimindedir. Elastisite modülünün artmasıyla birlikte Nusselt sayısında da artış belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, nanoakışkan, MHD akış, elastisite, eğrilik, Cu nanopartikül

2021, 119 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Cooling a partially elastic and elliptical surface under the influence of a magnetic field using a Cu-water nanofluidic impingement jet

Mehmet OĞAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

In this thesis, the heat transfer and flow structure of the partially elastic and curved surface under the influence of magnetic field with Cu-water nanofluid impingement jets were numerically investigated. Impingement jets, which are one of the various methods of increasing heat transfer, are becoming more and more important today in order to perform processes such as heating, cooling or drying by increasing heat and mass transfer. Nanofluids containing metal or metal oxide nanoparticles with higher thermal and electrical conductivity than base fluids to enhance heat transfer in impingement jets have been the subject of many studies. In this study, the effects of external magnetic field effect at 0, 2, 5, 10 and 20 values of Hartmann number (Ha), which is an indicator of magnetic field strength, on flow and heat transfer on Cu-water nanofluid containing nanoparticles at 0, 0.03 and 0.05 volume fraction (ϕ) it has been examined. In the thesis, the effect of the curvature (1/4, 1/2 and 3/4 of $a/b=2/3$, which is the ratio of the half-axes of the curved surface), which is frequently used in real life and engineering applications, was examined. Considering that the materials have different modulus of elasticity, analysis were carried out at values with elasticity modules of 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^8 , 10^9 in the study. The calculations in the study were made using the finite element method in COMSOL package program. The results of the analysis are shown with streamlines and isotherm curves, and heat transfer values are also expressed with Nusselt numbers. The results showed that when the nanoparticle volume fraction goes up it significantly improves the heat transfer. The curvature effect has been compared for four different models. It has been determined that full curvature among models gives more efficient results than other models. This effect becomes more pronounced for high Reynolds numbers. It has been observed that the magnetic field increases heat transfer on curved surfaces and other surfaces. This increase tends to damp the flow for higher values of the Hartmann number. With the increase in the modulus of elasticity, an increase in the Nusselt number was determined.

Keywords: Impingement jet, nanofluid, MHD flow, elasticity, curve, Cu nanoparticle

2021, 119 pages

1. GİRİŞ

Karmaşık hale gelen geometriler, bütünleşik dizayn parametreleri ve termal koşullar beraberinde yeni mühendislik tekniklerinin gelişmesinin önünü açmıştır. Nitekim bu parametreler ve termal koşullar optimum ısı transferinin yapılabilmesi için bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır ve buna en iyi çözüm sunan sistemler arasında çarpan jet uygulamaları gelmektedir. Çarpan jetlerdeki temel amaç yüksek ısı ve kütle transfer katsayısı elde etmek ve hedeflenen ısıtma, soğutma veya kurutma işleminin yerel bir bölgede kontrol edilebilir hale getirmektir. Çarpan jetler sağladıkları bu avantajlar sebebiyle kurutma, gaz türbin kanatlarının soğutulması, elektrikli ekipmanların soğutulması, metallerin ya da camların tavlanması, roketatar soğutulması gibi oldukça geniş bir alanda mühendislik uygulamaları ve teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır.

Akışkan içerisine milimetre ya da mikrometre boyutlarındaki katı partiküllerin süspansiyon edilmesi ile ısı iletkenliğinin artırılması uzun yıllardır bilinen bir yöntemdir. Ancak akışkanın içerisinde bulunduğu ortamda büyük basınç düşüşleri, çökme ve tortulaşma oluşması gibi problemlerden dolayı endüstriyel uygulamalar için cazip bulunmamıştır. Ancak son yıllarda ilerleyen malzeme teknolojisi ile birlikte nanometre boyutunda partiküllerin üretilmesi bu problemleri ortadan kaldırmıştır. Nanopartiküllerin baz sıvıya eklenmesi ile oluşan akışkana nanoakışkan adı verilmektedir. Nanoakışkanlar, ısı iletim katsayısını artırarak ısı transferini geliştirmeleri gibi avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple de elektrik ekipmanlarının efektif soğutulmasında, güneş panellerinde, fotovoltaiik hücrelerin soğutulmasında, havalandırma, iklimlendirme ve soğutma sistemlerinde uygulanarak enerjinin verimli ve daha ucuza kullanılabilmesi için yeni tasarımların önünü açmaktadır.

Araştırmacıların incelediği diğer bir konu olan manyetohidrokinamik (MHD) akış; harici bir manyetik alan etkisi altında gerçekleştirilen akışa verilen addır. MHD akış elektrik iletkenliğine sahip akışkanlarda, mikro elektronik cihazlardan reaktör soğutucularına kadar geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır. Etkili ısı transferi sağlayabilmek için ısı transferini geliştirici yöntemler arasında bulunan MHD

akış; araştırmacılara akışkan hareketini kontrol etmek, ayrılmış alanları azaltmak ve sirkülasyon bölgelerini sönümlemek gibi katkılar sağlamaktadır.

Malzemelerin farklı elastisite modüllerine sahip olmaları sebebiyle araştırmacılar ısı transferi ve akış yapısı üzerine etkilerini anlayabilmek ve geliştirebilme adına birtakım çalışmalar yapmaktadır fakat çarpan jetlerde elastik yüzey üzerine olan çalışmalar kısıtlıdır.

Bu çalışmada akış yapısı ve ısı transfer karakteristikleri farklı parametrelerin etkisi altında incelenerek karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasında ısı iletim katsayısını arttırarak ısı transferinin etkili bir şekilde geliştirilmesini ve baz akışkanlara göre yüksek elektriksel iletkenliğe sahip nanoakışkanlar çarpan jet sistemi ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca sistemde MHD akış uygulanıp akışın etkin kontrolü sağlanarak, hedef bölgede etkin soğutma yapılması hedeflenmiştir. Elastik duvar etkisinin ısı ve akış karakteristiklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Çarpan Jetlerde Eğrilik Etkisi

Düz veya kavisli bir yüzeye jet çarpmasıyla ilişkili ısı transferi kapsamlı bir araştırmanın konusu olmuştur. Düz plakalara üzerine çarpan jetlerin ısı transferini incelemek için birçok çalışmada bulunulmuştur. Düz plakalar için ilk deneysel çalışmalar Gordon, Goldstein, Hrycak ve Beltaos ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda değişen çarpma mesafesi, Reynolds sayısı, nozul tipi, plaka ve jet arasındaki sıcaklık farkı, jet açısı gibi parametreler incelenmiştir. Kavisli yüzeyler üzerine çarpan jetlerin ısı transferi ve akış yapıları araştırmacılar arasında incelenen diğer bir konu olmuştur [1].

Yang ve ark., 1999 [2], yaptığı deneysel çalışmada içbükey bir yüzeyin slot çarpan jetle soğutulmasının nozul konfigürasyonu ve içbükey eğriliğin yüzey etkilerini incelediler. $5920 \leq Re \leq 25550$ ve nozul hedef yüzey arası mesafeyi (z_h), yarık genişliği (B) olacak şekilde $1/2 \leq (z_h/B) \leq 20$ olarak tanımlamışlardır. İçbükey yüzeye çarpan jet için ortalama ısı transfer hızlarının, eğriliğin etkisinden dolayı plaka sonuçlarından daha fazla arttığı bulunmuştur. Reynolds sayısındaki artışla bu etkinin daha belirgin olduğunu gözlemlediler.

Tawfek ve ark., 2002 [3] kavisli bir yüzeye yuvarlak jetin eğik çarpmasını deneysel inceledikleri çalışmada $3800 \leq Re \leq 40000$ ve açı aralığı $20^\circ - 90^\circ$ derece belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda deneysel verilerin silindir yüzeyi boyunca sayısal entegrasyonu hesaplanıp ortalama Nusselt sayıları normal çarpan jetlerle karşılaştırılmıştır. Maksimum farkın %15 olarak gözlemlendiğini raporlamışlardır.

Cornaro ve ark., 1999 [4], silindirik yüzeylere çarpan yuvarlak bir jetin akış görselleştirmesi üzerine çalışmışlardır. Reynolds sayıları 6000, 10000, 15000 ve 20000 olarak dört farklı değer belirlenmiştir. Silindir çapı parametresi d/D olarak verilmiş 0.18 ve 0.38 olarak iki değer belirlenmiştir. İçbükey bir yüzey üzerindeki akışın dışbükey bir yüzey üzerindeki akıştan daha kararsız olduğunu, çünkü içbükey yüzeyin yukarı akışı, yüzeyden devridaime giren akıştan güçlü bir şekilde etkilendiğini gözlemlediler.

Lee ve ark., 1997 [5], dışbükey yüzey eğriliğinin, eksenel simetrik çarpan bir jetten yerel ısı transferi üzerindeki etkileri araştırıldı. Nozul çıkışındaki akış, tam gelişmiş bir hız profiline sahip olduğunu söylemişlerdir. Reynolds sayısı 11000 ile 50000 arasında, nozul yüzey mesafesi arası (L/d) 2 ile 10 arasında, eğrilik oranı (d/D) 0.034 ve 0.089 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar durgunluk noktasındaki Nusselt sayısının d/D değeri arttıkça arttığını göstermektedir.

Sharif ve ark., 2010 [6], içbükey silindirik yüzeylerden türbülanslı slot çarpan jet ile ısı transferinin parametrik çalışmışlardır. Çalışma sonuçları, jet çıkış Reynolds sayısı ve yüzey eğriliğinin ısı transfer işlemi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasına rağmen, jet plaka aralığına göreceli olarak duyarsız olduğunu göstermektedir. Çalışmada ele alınan parametrelerin bir fonksiyonu olarak içbükey yüzeydeki ortalama Nusselt sayısı için bir korelasyon da türetilmiştir.

Öztekin ve ark., 2013 [7], değişen yüzey eğriliğine sahip içbükey plakalarda türbülanslı çarpan slot jet soğutma özelliklerini araştırmak için deneysel ve sayısal bir çalışma yürütülmüştür. Soğutucusu olarak hava kullanılmıştır. Deneyler, $3423 \leq Re \leq 9485$ aralığındaki jet Reynolds sayıları için, boyutsuz nozul yüzeye uzaklık aralığı $1 \leq H/W \leq 14$ için, çarpma yüzeylerinin eğriliğinin R aralığındaki boyutsuz değerleri için gerçekleştirilmiştir. Oranlar $R/L = 0.5, 0.725$ ve 1.3 ve düz bir çarpma yüzeyi için tasarlanmış ve $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanılmıştır. Çalışmalarda genel olarak Reynolds sayısı artarken daha düşük eğrilik yarıçaplı çarpma yüzeylerine ortalama Nusselt sayısında artış gözlenmiş ve yüzey eğriliğinin $R/L \geq 0.725$ için ortalama Nusselt sayısını arttırdığı belirlenmiştir.

2.2 Çarpan Jetlerde Nanoakışkan Kullanımı

Isı iletkenlik sayıları kısmen daha düşük olan temel (baz) akışkanların, ısı iletkenliği daha yüksek olan nano boyuttaki materyaller (nanopartikül, nanolifler, nanotüpler, nanoteller, nanorodlar, nanotabaka veya damlacıklar) ile birlikte bulunduğu homojen yeni sıvıya “nanoakışkan” adı verilmektedir. Nanoakışkanlar, termal sistemlerde ısı tranfer özelliklerini arttırmak amacıyla kullanılan iyileştirme tekniklerinden bir tanesidir. Geniş bir uygulama alanı bulunması sebebi ile

nanoakışkanlar oldukça fazla ilgi görmektedir. Özellikle nanoakışkanların çarpan jetlerle birlikte kullanımı literatürde gerek deneysel gerek sayısal pek çok çalışmaya konu olmuştur.

Modak ve ark., 2017 [8], çalışmalarında, sıcak bir yüzey üzerinde CuO-su nanoakışkanı jetinin ısı transfer özelliklerini analiz etmek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Test yüzeyi olarak kullanılan dikdörtgen paslanmaz çelik folyo (AISI 304, 0.15 mm kalınlığında) gerekli başlangıç sıcaklığını (500°C) elde etmek için elektrikle ısıtılmıştır. Hedef yüzeydeki yüzey ısı akısının dağılımı, geçici soğutma sırasında kaydedilen termal görüntülerden değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, nanopartikül konsantrasyonunun ve nanoakışkanın Reynolds sayısının ısı transfer özelliklerine etkisi incelemişlerdir. 5000-12.000 aralığında çeşitli Reynolds sayısı, iki farklı CuO-su nanoakışkan konsantrasyonu (%0.15 ve %0.6) ve iki farklı nozul-plaka mesafesi (6 ve 12) için testler yapılmıştır. CuO-su nanoakışkanı için Nusselt sayısındaki artış, saf suya kıyasla %0.15 ve %0.60 nanoakışkan konsantrasyonu için sırasıyla %14 ve %90 olarak bulunmuştur. Nanoakışkanların jet çarpmasından sonra test yüzey özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. İncelemeye dayanarak, Reynolds sayısı (Re), Prandtl sayısı (Pr), nozul-plaka mesafesi (l/d) ve Nusselt sayısı (Nu) gibi çeşitli parametreler arasındaki korelasyon sunulmuştur. Reynolds sayısının ve partikül hacim konsantrasyonunun artması ile Nusselt sayısının arttığı görülmüştür. Ancak nozul-plaka mesafesindeki değişimin ısı transferine etkisi durumunda böyle bir eğilim gözlenmemiştir. l/d=6 ve Re=5000' de %0.15 ve %0.60 nanoakışkanlarının Nusselt sayılarındaki artış saf su ile kıyaslandığında sırasıyla %14 ve %62; l/d=12 için ise sırasıyla %13.6 ve %90 olarak bulunmuştur.

Kareem ve ark., 2019 [9], 1000–8000 aralığında Reynolds sayısı, 3 mm çapında tek bir dairesel jet, 40-70 mm arasında değişen nozul-jet mesafesi (Z) kullanarak yaptıkları çalışmada, öncelikle deneysel testlere başlamadan doğrulama yapıp, kabul edilen sapmaları tespit etmişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki CuO-su nanoakışkanın ısı transferini önemli ölçüde iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır. Hem Reynolds sayısı hem de nanopartikül hacim fraksiyonu arttıkça ısı transferi artmaktadır. Ayrıca, nozul-hedef plaka mesafesi, hacim fraksiyonu etkisi üzerinde baskın etkiye sahip olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, hacim fraksiyonu artmasına

rağmen nozul-hedef plaka arası mesafe arttıkça ısı transferinin azaldığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, Nusselt sayısındaki maksimum artış %2.9 ve minimum artış yaklaşık % 0.87 olarak bulunmuştur.

Buonomo ve ark., 2019 [10], izotermal hareketli bir yüzey üzerinde sınırlı yarık çarpan jet ile ilişkili türbülanslı konvektif ısı transferinin iki boyutlu sayısal bir incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, sınırlandırılmış geometri, ısıtılmış hareketli plakaya paralel bir üst adyabatik yüzeye sahiptir ve yarık jet, sınırlayıcı adyabatik duvarın ortasındadır. Çalışma sıvıları olarak saf su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Korunum denklemleri, gelişmiş duvar işlemeli k- ϵ türbülans modelini ve nanokışkanlar için tek fazlı model yaklaşımını benimseyerek yazılmıştır. Sayısal model, Ansys Fluent programı ile sonlu hacim yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Simülasyonlarda, hedef yüzeyden jet mesafesinin iki değerine ilişkin iki geometrik konfigürasyon dikkate alınmıştır. Çalışmada 30nm çapında nanopartiküller %0-%6 konsantrasyonunda kullanılmıştır. Reynolds sayısı ise, 5000-20000 arasında değişmektedir. Ayrıca hareketli yüzey-jet hızı oranı 0-2 arasında incelenmiştir. Sonuçlar, nanopartiküllerin varlığının boyutsuz ısı transferinde bir artışa sebep olduğunu, ancak beklendiği gibi sürtünme faktörünü etkilemediğini göstermiştir. Nusselt sayılarındaki yerel ve ortalama artış, hareketli plaka ve nanobileşik etkisinden de kaynaklanmaktadır.

Barewar ve Chougule, 2020 [11], yatay ısıtmalı test yüzeyine hibrit bir nanoakışkan jetin çarpmasıyla oluşan ısı transfer özelliklerini analiz etmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Ag/ZnO nanopartikülleri sentezlendikten sonra hacimce %0.02 ile %0.1 oranında distile su içinde dağıtılmıştır. 1769 ile 8273 arasında değişen Reynolds sayılarında ve farklı H/D oranlarında ısı transfer katsayısını ve kaynama performansını hesaplamak için bir dizi deney yapılmıştır. Deneysel analiz, H/D=3.5'teki su ile karşılaştırıldığında Ag/ZnO hibrit nanokışkan için ısı transfer katsayısında ve kaynama performansında %88.53 ve %87.17 iyileşme olduğunu ortaya koymuştur.

Çarpan jetlerde nanoakışkanlarla ilgili çalışmalar sistem tasarımları, üretim gereklilikleri gibi zorunluluklar sebebiyle bir başka araştırma konusu olan eğimli

yüzeylerde nanoakışkanların çarpan jetlerle kullanımı üzerine araştırmacılar çalışmalarda bulunmuştur.

Ahmadi ve ark., 2016 [12], yarı dairesel konkav (içbükey) bir yüzeye çarpan türbülanslı bir $Al_2O_3-H_2O$ nanoakışkan yarı sınırlı yarık jet kullanarak yaptıkları çalışmada, aerodinamik yapılar, yerel ve ortalama Nusselt sayıları, durgunluk Nusselt sayısı, kesme gerilimi dağılımı ve pompalama gücü açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Araştırmacılar, maksimum ortalama ısı aktarım hızını $H/D=5$ 'de gerçekleştirdiğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, sistemde nanopartiküllerin bulunmasına bağlı olarak taşıyıcı sıvının daha yüksek viskozitesinin, gerekli pompalama gücünün artmasına yol açtığını bulmuşlardır. Ayrıca sonuçlar, sudaki nanopartiküllerin varlığından dolayı ısı transfer hızında önemli bir gelişme olduğunu göstermiştir. Jet Reynolds sayısındaki ve nanopartikül konsantrasyonundaki bir artışın, içbükey yüzey üzerindeki jet çarpmasının gelişmiş bir soğutma performansına yol açtığı belirlenmiştir.

Selimefendigil ve Öztıp, 2017 [13], oluklu bir yüzeyin farklı nanoparçacık şekillerine sahip su- SiO_2 nanoakışkan çarpan jet ile soğutulmasının sayısal çalışmasını yapmışlardır. Alt duvar olukludur ve sabit yüzey sıcaklığında tutulurken, jet soğuk ve homojen sıcaklığa sahip dikdörtgen bir yarıktan çıkar. Reynolds sayısının (100 ile 500 arasında), ondülasyon genliğinin (0 ile 0.3 arasında), ondülasyon frekansının (0 ile 20 arasında), nanopartikül hacim fraksiyonunun (0 ile 0.04 arasında) ve nanopartikül şekillerinin (küresel, bıçaklı, tuğla, silindirik) değişkenlerinin sıvı akışı ve ısı transfer özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Durgunluk noktası ve ortalama Nusselt sayısı hem düz hem de oluklu yüzey konfigürasyonları için Reynolds sayısı ve katı partikül hacim oranı ile artar. Oluklu genlik ve frekans için optimal bir değerin Reynolds sayısının en yüksek değerinde ortalama ısı transferini maksimize ettiği bulunmuştur. Çeşitli nanopartikül şekilleri arasında silindirik olanlar, durgunluk ve ortalama Nusselt sayısı değerleri açısından en iyi ısı transfer özelliklerini gösterir. Nanopartiküllerin en yüksek katı hacim konsantrasyonunda, ısı transfer değerleri düz yüzeylere kıyasla oluklu yüzeyler için daha yüksek olduğunu belirttiler.

Selimefendigil ve Öztıp, 2017 [14], CuO -su nanoakışkan ile kısmen eğimli bir yüzeyin çarpan jet soğutmasının sayısal ve optimizasyon çalışması, Galerkin ağırlıklı

artıklar sonlu eleman yöntemi ve COBYLA (doğrusal yaklaşımla kısıtlı optimizasyon) optimizasyon algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Hedef yüzey kısmen eğimli olup, yarı-kesitli bir şekle sahiptir ve sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Reynolds sayısı ve katı parçacık hacim fraksiyonunun çeşitli değerleri için simülasyonlar yapılmıştır. Eğri duvarın akışkan akış dağılımı ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkilerinin düz duvar konfigürasyonuna göre daha yüksek Reynolds sayısı değerlerinde daha belirgin olduğu görülmüştür. En yüksek ısı transferi kavisli duvar ile elde edilmekte ve düz bir duvar ile kavisli duvar arasında Nusselt sayısının tepe değerleri arasında önemli farklılıklar görülmektedir. Ortalama Nusselt sayısı, nanopartikül hacim fraksiyonunun doğrusal artan bir fonksiyonudur ve yerel ve ortalama ısı transferindeki eğilimler, nanopartiküller eklendiğinde kavisli duvar ve düz duvar konfigürasyonları için benzerdir. Ortalama Nusselt sayısı, suya kıyasla en yüksek partikül hacmi oranında yaklaşık %20 artar. Ortalama Nusselt sayısı için her iki konfigürasyon için Reynolds sayısına ve katı partikül hacim fraksiyonuna bağlı olan bir polinom tipi korelasyonla türetilmiştir.

Datta ve ark., 2018 [15], konveks (dış bükümlü) bir yüzeye çarpan nanoakışkanlı bir yarı jetinin davranışı araştırdıkları sayısal simülasyon çalışmalarında, ortalama 40nm partikül çapına sahip alüminyum oksit nanopartiküllerinden oluşan Al_2O_3 -su nanoakışkanını kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçları, ortalama Nusselt sayısının ve ısı transfer katsayısının jet giriş Reynolds sayısındaki artışla önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca nanopartiküllerin baz bir sıvıya eklenmesiyle ısı transferinin arttığını da kanıtlamışlardır.

Chen ve Cheng, 2020 [16], yaptıkları çalışmada, konkav (içbükey) ısıtma yüzeyinde iki katmanlı gözenekli bakır metal bloğu ve SiO_2 -su nanoakışkanın çarpan jet ile akış kanalında birleştirilerek kullanmışlardır. Brinkman Forchheimer ile genişletilmiş Darcy denklemleri $k-\epsilon$ türbülans modeli ile birleştirilerek kullanılmıştır. Çalışma sıvısı olarak saf suyun kullanıldığı durumla karşılaştırıldığında, %3 oranında SiO_2 -su nanoakışkanın kullanılması durumunda ısı transfer katsayısının (HTC) %5.85 arttığı görülmüştür. Tek tabakalı gözenekli tabakadaki gözenekliliğin ve içbükey yüzeyin eğriliğinin ısı transferi üzerindeki birleşik etkileri, ısıtma yüzey alanı ve jet nanoakışkan ile ısıtma yüzeyi arasındaki konveksiyon ile ilgili olduğu tespit edilmiştir. Konveksiyonun baskın etkileri nedeniyle, üst tabakada daha büyük gözenekli ve alt

tabakada daha düşük gözenekli iki tabakalı metal blokta daha fazla ısı transferi meydana gelmiştir. İki tabakalı gözenekli metal bloktaki üst ve alt tabaka arasındaki kalınlık oranının ısı transferi üzerindeki etkileri, yüzey alanı ile konveksiyon arasındaki etkileyen kısım ile ilgili bulunmuştur. İçbükey yüzeyin eğriliğinde R/L (içbükey yarıçapın kordal uzunluğa oranı) $=0.5$ 'ten $R/L=1.1$ 'e bir artışla, ortalama Nusselt sayıları yükselir ve yükselme oranları Reynolds sayısı kadar azalmaktadır. Ancak yüzey alanı azalır, bu da bakır bloğun ortalama sıcaklık artışına neden olmaktadır.

2.3 Manyetik Alan Etkisi Altında Çarpan Jetler

Sistemlerde yapısı gereği manyetik alan varlığından söz edilebilir ya da ısı transferini geliştirici yöntemler arasında bulunan manyetik alan sistemlere uygulanabilir. Manyetik alan etkisinin ısı transferi ve akış özelliklerinde arttırmak için baz akışkanlara göre daha yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip olan nanoakışkanlarla birlikte kullanımı oldukça yaygındır. Literatürde çarpan jetlerde manyetik alan etkisinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır.

Lee ve ark., 2005 [17], yaptığı çalışmada, uygulanan manyetik alan varlığında sınırlı jet akışındaki iki boyutlu sıvı akışını ve ısı transferini sayısal olarak araştırmışlardır. Girdap salınımını ve ısı transferini kontrol etmek amacıyla, kapalı jetteki sıvı akışını ve ısı transferini hesaplamak için sayısal simülasyonlar, manyetik alanların yokluğunda ve varlığında farklı Reynolds sayıları ve farklı Prandtl sayıları için 0,02'lik (sıvı metal), 0,7 (hava) ve 7 (su) için $0 \leq N \leq 0.05$ arasında gerçekleştirilmiştir. Burada N, elektromanyetik kuvvetin atalet kuvvetine oranı olan Stuart sayısıdır. Uygulanan manyetik alanların yoğunluğu arttıkça, kanalda oluşan girdap salınımı zayıflar ve çarpan jetin salınım genliği azaldığını gözlemlediler. Stuart sayısı kritik değerden büyükse, akış ve termal alanlar sabit durum haline geldiğini belirttiler.

Nakharintr ve ark., 2017 [18], manyetik alan etkisinin ısı transfer özellikleri üzerindeki sonuçları ve mini-dikdörtgen bir ısı alıcının (test bölümü) sınırlı tek bir jet çarpmasındaki basınç düşüşü üzerinde çalışmışlardır. Isı alıcı, 50*50 mm (uzunluk*genişlik) ve 2 mm kanat yüksekliğinde, pirinç bloktan üretilmiştir. Çalışma

sıvısı olarak, deiyonize su ve nano ölçekli TiO_2 partiküllerinin hacimce %0.005, %0.010, %0.015 gibi çeşitli konsantrasyonlar içeren nanoakışkanlar kullanılmıştır. Neodimyum kalıcı manyetik çubuklar tarafından 0.084 ve 0.28mT'lik iki farklı manyetik alan kuvveti üretilmiştir. Manyetik alan etkisi ile Nusselt sayısının manyetik alan etkisi olmayanlara göre artma eğiliminde olduğu ve manyetik alan kuvvetinin artmasıyla Nusselt sayısının da arttığı bulunmuştur. Bununla birlikte, bu çalışmadaki nanoakışkan konsantrasyonunun az olması nedeniyle, test bölümü boyunca basınç düşüşü üzerinde herhangi bir önemli etki görülmemiştir.

Selimefendigil ve Öztop, 2018 [19], manyetik alan etkisi altında Al_2O_3 -su nanoakışkan ile izotermal bir yüzeyin çift jet darbeleri soğutmasının sayısal çalışmasını yapmışlardır. Korunum denklemlerinin çözümünde Galerkin ağırlıklı sonlu eleman yöntemi kullanmışlardır. 100-400 arasında çeşitli Reynolds sayıları, %0- %4 arasında katı partikül hacim fraksiyonu, 0-2.5 arasında Hartmann sayısı için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yarık-plaka mesafesinin oranı 4 ile 16 arasında değişirken, yarıklar arasındaki mesafenin yarık genişliğine oranı 5 ile 22.5 arasında değişmiştir. Manyetik alanın sıvı akışını geciktirdiği, lokal ve ortalama ısı transferini azalttığı görülmüştür. Hartmann sayısının en yüksek değerinde akışkan durgunluk noktasına ulaşamamıştır. Slotlar ve slot-tabaka arasındaki mesafeye bağlı olarak, ortalama ısı transferi yaklaşık %46 artar ve değeri nanopartikül hacim fraksiyonu ile doğrusal olarak artar. Bu çalışma, özellikle manyetik alanın mevcut olduğu ve çarpan jetle soğutmada konvektif ısı transfer özelliklerini zayıflattığını, bununla birlikte nanopartiküllerin kullanımıyla termal performansını artırmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

Nimmagadda ve ark., 2019 [20], tarafından uniform ve uniform olmayan manyetik alan ve çarpan jet etkisinin nanoakışkanların hidrodinamik ve ısı transfer performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Doğrudan ve enine jet (çapraz akış) çarpma koşulları altında, akış alanına, harici olarak $\text{Ha}=0-40$ arasında değişen farklı güçlere sahip beş tür manyetik alan uygulanmıştır. Reynolds sayısının ($\text{Re}=200-600$), nanopartikül tipinin (Cu, Al, TiO_2 ve hibrit ($\text{Cu}+\text{TiO}_2$)), nanopartikül çapının ($\text{dp}=20\text{nm} - 80\text{nm}$) ve hacimce konsantrasyonunun ($\phi =\%1$ ve $\%3$) uniform ve uniform olmayan manyetik alan altında, hidrodinamik ve ısı transferi davranışı üzerindeki etkileri tahmin edilmiştir. Manyetik alanın varlığı, özellikle duvarların

yakınında daha yüksek akış hızı değerlerinden sorumlu bir Lorentz kuvveti ortaya çıkarmıştır ve bu da ortalama Nusselt sayısının artmasına neden olmuştur. Ayrıca, uygulanan uniform/uniform olmayan manyetik alana karşı doğrudan ve enine jet aynı zamanda çarpma bölgesi yakınındaki yerel akış hızını artırarak yerel Nusselt sayısında artışa yol açmıştır. Enine jet, direkt jet ile karşılaştırıldığında daha yüksek ortalama Nusselt sayısı sergilemiştir. Manyetik alan altında hacimce %3 Cu nanoakışkan için maksimum %173 ısı transfer artışı elde edilmiştir. Ayrıca, yüksek güçlü elektronik cihazların ve nükleer reaktörlerin termal yönetiminde daha iyi bir anahtarlama seçeneği sağlayacak iki eşdeğer nanoakışkan çifti de tanımlanmıştır.

Nimmagada ve ark., 2019 [21], manyetik alan ve nanopartikül şeklinin sabit ve titreşimli plakalar üzerindeki jet çarpmasına etkisini, $Re = 500$ ile 900 , $St = 0.0694$ ile 0.2083 ve $Ha = 0$ ile 80 parametreleri aralığında incelemişlerdir. Manyetik alanın etkisinin, $Ha = 80$ ve $Re = 900$ 'de sabit bir plaka üzerinde jet çarpma performansını yüzde 36.18 artırdığını gözlemlediler.

Selimefendigil ve Öztö, 2019 [22], eğimli bir manyetik alanın etkisi altında kısmen gözenekli bir ortamda izotermal bir yüzeyin nanojet çarpma soğutmasını incelemişlerdir. Reynolds sayısı (100 ile 500 arasında), Hartmann sayısı (0 ile 6 arasında), manyetik eğim açısı (0 ile 90 arasında), Darcy sayısı (10^{-4} ile 10^{-2} arasında) ve gözenekli tabaka yüksekliği ($0.25 H$ ile $4 H$ arasında) sıvı akışı ve ısı transferi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik alanın yokluğu ve varlığı (Hartmann sayısı 6 'da) karşılaştırıldığında, ortalama ısı transferinde %28 azalma olduğunu görmüşlerdir.

2.4 Çarpan Jetlerde Elastik Yüzey İncelemesi

Bazı ısı transferi uygulamalarında deforme olabilen duvarlar kavitelemin içindeki konveksiyonu kontrol etmek için kullanılmıştır. Deforme olabilen bir duvarın çarpan jetlerle soğutulması üzerine literatürde bulunan çalışmalar kısıtlıdır.

Selimefendigil ve Öztö, 2018 [23], kısmen elastik izotermal sıcak yüzeyin nanoakışkanlı çarpan jet ile soğutulmasının sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sayısal çalışmasını yaptılar. Çarpma yüzeyi kısmen elastik ve Reynolds sayısı (25 ile

200 arası), katı partikül hacmi fraksiyonu (0.01 ile 0.04 arası), izotermal sıcak yüzeyin elastik modülü (10^4 ile 10^6 arası), elastik kısmın boyutu (arası 7.5w ve 25w) ve nanopartikül tipi (küresel, silindirik, kanatlı) üzerinde sıvı akışı ve ısı transferi özellikleri incelemişlerdir. Ortalama Nusselt sayısının, daha yüksek Reynolds sayısı, daha yüksek esnek duvar elastik modülü değerleri, daha küçük boyuttaki elastik kısım ve daha yüksek nanopartikül katı hacim fraksiyonu ve silindirik şekilli partiküller için arttığı gözlemlenildi. Sıcak yüzeyin elastisite modülünü ve elastik kısmın boyutunu değiştirerek maksimum Nusselt sayısını %50.58 ve %33 değiştirmek mümkünken, ortalama Nusselt sayısı sadece %9.33 ve %6.21 oranında değişmekte olduğu çıkarımını yapmışlardır. Daha yüksek partikül hacmi için çeşitli partikül şekilleri arasındaki tutarsızlık daha yüksek olduğunu belirttiler.

2.5 Tez Amacı

Mevcut çalışmada kısmen eliptik ve elastik bir yüzeyin Cu-su nanoakışkanı ile manyetik alan etkisi altında çarpan jet ile soğutulması incelenmiştir. Bu çalışmada 0, 0.03 ve 0.05 hacim fraksiyonunda (ϕ) nanopartikül içeren Cu-su nanoakışkanına, Hartmann sayısının (Ha) 0, 2, 5, 10 ve 20 değerlerinde, eğriliğin etkisi (eğri yüzeyin yarı eksenlerinin oranı olan $a/b=2/3$ ' ün $1/4$ 'ü, $1/2$ 'si ve $3/4$ 'ü olacak şekilde), elastisite modülleri 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^8 , 10^9 değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrelerin etkisi altında ısı transferine ve akış yapısına olan etkileri incelenmiştir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1 Çarpan Jetler

Çarpan jet, dairesel, dörtgen vb. gibi çeşitli geometrilere sahip yarıktan geçerek bir yüzeye yüksek hızlarda çarpan ve yüksek ısı transferi sağlayan bir ısı transferi arttırma tekniğidir. Akışkanın yüzeye çarptığı bölgede bir durma noktası meydana gelmektedir ve bu bölgedeki sınır tabaka kalınlığının azalmasına bağlı olarak ısı transferi artmaktadır [24, 25, 26].

Çarpan jetler, noktasal ısı ve kütle transferini kontrol etmeye izin vermektedir ve yüksek ısı/ kütle transferi sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı çarpan jetler, ısıtma ve soğutma alanında birçok uygulamaya sahiptir [27]. Bunlar arasında elektronik bileşenlerin soğutulması, metallerin ısı işleme, camın temperlenmesi, gaz türbinlerinin soğutulması, kâğıt ve tekstil ürünlerinin kurutulması, kriyocerrahide dokuların dondurulması ve gıda işleme yer almaktadır. Elektronik komponentlerin soğutulması çok önemli ve temel bir performans kriteri olduğu için bu konuda çalışmaların kapsamı artmaktadır [28, 29, 30, 31, 32].

Çarpan jetleri üzerine birçok çalışma ve literatür taraması yapılmıştır. Aşağıda bunlara ait bazı örnekler verilmiştir.

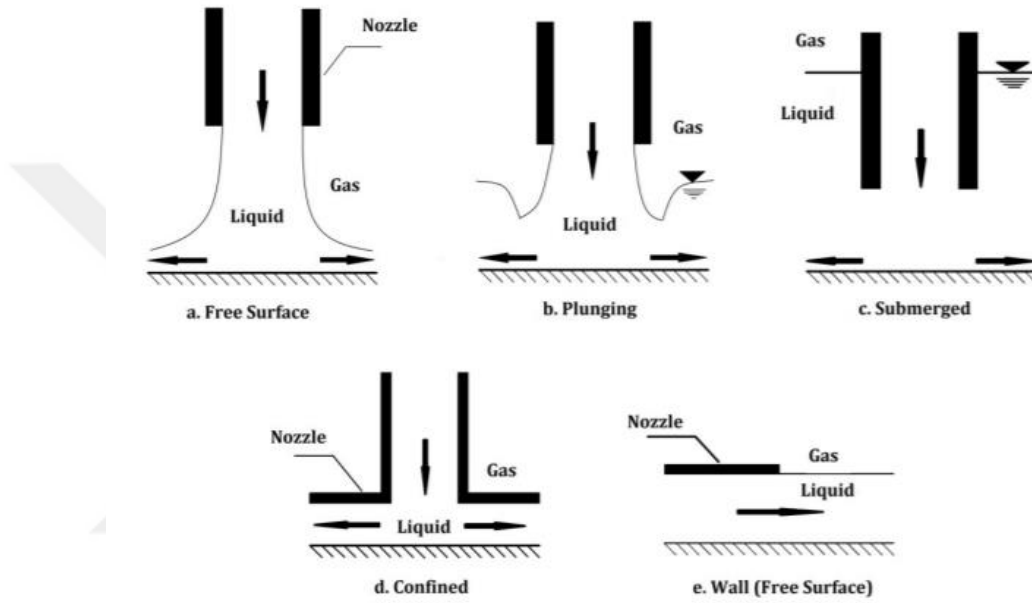
Martin ve ark., 1977 [33] değişkenlerin ve sınır koşullarının jet akışının hidrodinamiği üzerindeki etkilerini, tek nozul ve nozul dizileri için transfer katsayılarındaki yerel değişiklikleri, ortalama transfer katsayılarını ve çıkış akış koşullarını araştırmıştır.

Incropera ve ekibi, 2001 [34], jet akışı ön değerlendirmesinde, yerel Nusselt sayısının hangi parametrelere bağlı olduğunu araştırmış ve yuvarlak jet nozulu için ampirik ifadeler ortaya çıkarmıştır.

Lou ve ark., 2005 [35] sayısal çalışmalarında geometrik parametrelerin jet akışının ısı transferine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, Reynolds sayısı ve jet plakaları arasındaki mesafe değişken parametreler olarak ele alınmıştır.

Glynn ve Murray, 2005 [36] püskürtme çapının ve jet plakaları arasındaki aralık parametrelerinin jet akışı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Çarpan jetler, serbest yüzey veya daldırılmış olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.1.). Sıvı ortama bir sıvı jet boşaltıldığında daldırılmış bir jet oluşur. Bir sıvı jet bir gaz ortamına boşaltıldığında serbest bir yüzey jeti oluşur [37].



Şekil 3.1. Çarpan jet tipleri [38]

Serbest yüzey ve daldırılmış çarpan jetler arasındaki karşılaştırma Tablo 3.1’ da göstermektedir. Etkileşim modlarında ve sürüklenmenin etkisinde belirgin farklılıklar varken, potansiyel çekirdek yalnızca batık jette mevcuttur.

Tablo 3.1. Farklı çarpan jet türlerinin karşılaştırılması [38]

	Serbest yüzey jet	Daldırılmış jet
Sıvı etkileşimi	Ortam gazına boşaltma	Benzer sıvıyla bir boşluğa boşaltma
Sürüklenme	İhmal edilebilir	Kesme bölgesinde
Potansiyel çekirdek	Yok	Merkez çizgisine yakın

Daldırılmış jetler sınırlı ve sınırlandırılmış modlara ayrılmaktadır. Tablo 3.2.'de, daldırılmış jetlerin bu iki konfigürasyonu arasındaki ısı transferi, yeniden sirkülasyon bölgesi ve sürüklenme yönündeki farklar gösterilmiştir [38].

Tablo 3.2. Daldırılmış jetlerin arasında karşılaştırma [38]

	Daldırılmış jet	
	Sınırlı	Sınırlandırılmamış
Isı transferi	Sınırlandırılmamış jetten daha düşük	Yükek ısı transfer katsayısı
Yeniden sirkülasyon bölgesi	Çıkış sınırları içinde	Yok
Sürüklenme yönü	Bazen çarpan jetin içine doğru	Yok

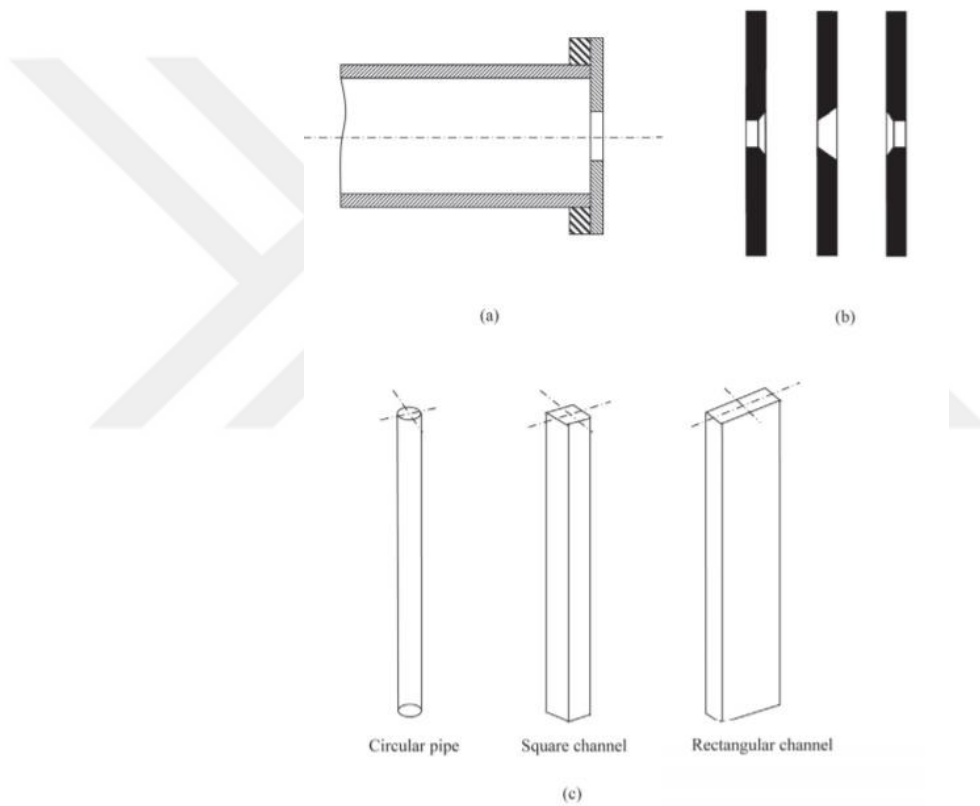
Jet çarpması veya serbest yüzey akışı, jet oryantasyonuna, yüzey tipine veya akış tipine göre sırasıyla dikey veya yatay, düz veya eğimli ve tek veya iki fazlı akış olarak sınıflandırılmaktadır [37].

3.1.1 Çarpan jetlerde ısı transferi

Çarpan jetlerde daha etkili ısı transferi sağlamak için tekli veya çoklu jetler, jet çıkışı hız profili, nozul şekilleri, jet-plaka aralığı, jet açıları, Reynolds sayıları, sabit veya titreşimli çarpma akışları, hedef yüzey özellikleri (şekilleri, pürüzlülüğü, hareketi vb.), jet çıkışındaki türbülans özellikleri, plaka ve jet arasındaki sıcaklık farkı vb. gibi farklı parametreler söz konusudur [39, 40]. Bu parametrelerin, jet çarpışmasının akış alanı ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisi, literatürde hem deneysel hem de hesaplamalı olarak özel ilgi görmektedir.

Tekli ve çoklu jetler: Jetler tekli veya çoklu olarak bulunabilmektedir. Tekli bulunan jetler genellikle noktasal olarak yüksek ısıtmanın ya da soğutmanın olduğu yerlerde kullanılırken, çoklu jet yapısı bölgesel veya yüzeysel olarak ısıtmayı ya da soğutmayı kontrol etmek için kullanılmaktadır. Çoklu jet dizilerinin birincil avantajı, son derece yüksek yerel ısı transfer katsayılarına sahip çoklu durgunluk bölgelerinin oluşturulmasıdır. Interjet aralığı ve çapraz akış koşulları gibi hususlara bağlı olarak, yüksek yerel yüzey ısı transfer katsayıları tüm yüzey boyunca korunabilmektedir [41].

Nozul tipleri: Birçok araştırmacı, nozul şeklinin düz bir hedef yüzeyden ısı transfer hızı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Nozullar, farklı enine kesit şekillerine sahip bir açıklık (Şekil 3.2. (a) ve (b)) veya uzun boru veya kanal tipi nozullar (Şekil 3.2. (c)) şeklinde olabilmektedir. Literatürdeki çeşitli nozul şekilleri üzerindeki deneysel araştırmalar, 5000'den 60.000'e kadar geniş bir Reynolds sayısı aralığını (hidrolik çapa dayalı olarak) kapsamaktadır; boşluğun hidrolik çapa (h/d) oranı 2 ila 12 arasında değişmektedir. Orifis tipi nozullar için, Şekil 3.2. (b) 'de gösterildiği gibi deliğin farklı konturlarının etkisine veya dairesel, dikdörtgen veya eliptik gibi deliğin şekline göre çeşitlendirilmektedir [42]



Şekil 3.2. Çarpan jetlerde kullanılan nozul tipleri (a) bir orifis tipi nozul (b) orifis türleri (c) uzun boru veya kanal tipi nozullar [42]

Gulati ve ark., 2009 [43] dairesel, kare ve dikdörtgen kesitli uzun borulu nozullar kullanarak düz bir yüzeyden jet darbeleri ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, $H/d_{hyd} = 0.5$ 'de $Re_{hyd} = 5000-15000$ için kare ve dairesel nozullara kıyasla durgunluk noktasındaki yerel Nusselt sayısının dikdörtgen nozul için %10 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, 60mm*60mm alan

üzerinden hesaplanan ortalama Nusselt sayısı, test edilen tüm nozul konfigürasyonları için hemen hemen aynı bulunmuştur.

Lee ve Lee, 2000 [44], kare kenarlı, standart kenarlı ve keskin kenarlı orifislerin, düz bir yüzeyden jet çarpma ısı transferi üzerindeki etkisini araştırmışlardır ve keskin kenarlı orifisin en yüksek değerle sonuçlandığını, keskin kenarlı ağız tipi nozulun durgunluk Nusselt sayısında en yüksek değerle sonuçlandığını buldu.

Hedef yüzey özellikleri: Çarpan jetlerde kullanılan hedef yüzeyler düz, içbükey, dışbükey veya basamak gibi farklı şekillerde olabilmektedir. Hedef yüzeydeki bu şekil farklılıklarının yanı sıra yüzeyin pürüzlülüğünde meydana gelen değişiklikler de çarpan jetlerdeki ısı transferi özelliklerini değiştirmektedir.

Lee 2011 [45], eşit dağılımlı ısı akışında ısıtılmış bir plaka üzerinde küçük ölçekli laminar sınırlı çarpan jetteki ısı transfer özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bunun için, sıvı kristal tekniği kullanarak düz bir plakaya çarpan laminar sınırlı çarpan jet ile yerel Nusselt sayılarını ölçmüşlerdir. Araştırmacılar, çırpma (flapping) hareketi gösteren bir jet gözlemlemişlerdir ve bu hareketin akışta ileri momentum kaybına yol açabileceğini ve durgunluk noktasına yakın ısı transfer hızında önemli bir düşüşe neden olabileceğini bulmuşlardır.

Ayrıca yapılan araştırmalarda, hedef olarak kavisli yüzeyler kullanılmıştır ve bu yüzeylerde çarpan jetlerin ısı transferi ve akış özellikleri incelenmiştir. Gau ve Chung, 1991 [46], içbükey ve dışbükey yüzeylerin çarpan jet soğutma akışı üzerindeki etkilerini göstermişlerdir. Dışbükey bir yüzeyde, ısı transfer sürecini artıran bir dizi üç boyutlu ters dönen girdabın durma noktasında duvarın yakınında başlatıldığını bildirmişlerdir.

Buzzard ve ark., 2016 [47]'nin yaptıkları araştırma, çarpma soğutma artırımını için yüzey pürüzlülüğünün çeşitli boyutlarını, dağılımlarını, şekillerini ve modellerini kullanmıştır. Burada ele alınan yüzey pürüzlülüğü şekilleri, daha büyük dikdörtgen pimlerle birlikte dikdörtgen ve üçgendir. Dikkate alınan yapılandırmalar şunları içermektedir: (i) küçük dikdörtgen pürüzlülük dizileri, (ii) küçük üçgen pürüzlülük dizileri, (iii) küçük dikdörtgen pürüzlülüğü ve büyük pimlerin bir arada

kombinasyonları ve (iv) küçük üçgen pürüzlülük ve büyük pimlerin bir arada kombinasyonları. Testler 900, 1500, 5000 ve 11000 çarpan jet Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Lokal ve genel çarpma soğutma performansı, pürüzlülük elemanlarının şekline ve ayrıca jet Reynolds sayısına bağlıdır. Jet Reynolds sayısının büyüklüğüne bağlı olarak, küçük üçgen pürüzlülüğü dizileri ile karşılaştırıldığında, küçük dikdörtgen pürüzlülüğü dizileri için farklı davranış ve eğilimler gözlenmiştir. Genel olarak, sonuçlar, hedef yüzey pürüzlülüğünün, pürüzsüz olan hedef yüzeylere göre, yüzey ısı transferi artırma konusunda oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Jet plaka aralığı: Jet çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe, h ile ifade edilip, D , jet çapı ile boyutsuzlaştırılarak kullanılmaktadır. Bu mesafe çarpan jetlerde ısı transferini etkileyen parametrelerden biridir.

Metzger ve Korstad, 1972 [48], çapraz akışın, bir kanalın bir duvarına yerleştirilmiş dairesel deliklerden çıkan tek bir jet hattı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarında, plaka aralığını değerlendirmişlerdir. Plaka aralığının, jet Reynolds sayısı ve jet akışının göreceli kuvvetlerinin ve çapraz akışın hedef duvardaki ısı transferini etkilediğini göstermişlerdir.

San ve Shiao, 2006 [49], yaptıkları çalışmada, düz bir plakaya dikey olarak çarpan sınırlı dairesel bir hava jeti için jet plakası boyutunun ve plaka aralığının (jet yüksekliği) ısı transfer özellikleri üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Çarpışmadan sonra jet, iki zıt yönde akacak şekilde sınırlandırılmıştır. 1000 W/m^2 'lik sabit bir yüzey ısı akışı düzenlenmiştir. Toplam 88 deney gerçekleştirilmiştir. 1.5, 3, 6 ve 9 mm çapında jet delikleri ayrı ayrı kabul edilmiştir. Jet Reynolds sayısı (Re) 10.000–30.000 aralığında ve plak aralığı-jet çap oranı (H/D) 1-6 aralığındadır. Onbir jet plakası genişliği-jet çapı oranı ($W/D = 4.17-41.7$) ve yedi jet plakası uzunluğu-jet çapı oranı ($L/D = 5.5-166.7$) ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Durgunluk Nusselt sayısının Re 'nin 0.638 gücü ile orantılı olduğu ve H/d 'nin 0.3 gücü ile ters orantılı olduğu bulunmuştur. Durgunluk Nusselt sayısının da $\exp [-0.044 (W/D) - 0.011 (L/D)]$ fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Elde edilen mevcut veriler ve sonuçlar arasındaki karşılaştırmalarla, bir jet çarpması için, çarpma plakası ısıtma durumu ve çarpmadan sonra jetin akış düzenlemesinin durgunluk Nusselt sayısının H/d 'e bağımlılığını etkileyen iki önemli faktör olduğu sonucuna varılmıştır.

Isı transferi genellikle h , D_h ve k , yüzeydeki ısı transfer katsayısını, nozulun hidrolik çapını (yarık genişliği, D_h) ve plaka malzemesinin termal iletkenliğini temsil eden hD_h/k olarak tanımlanan Nusselt sayısı (Nu) ile ifade edilmektedir. Durgunluk noktası Nusselt sayısı (Nu_{st}) ve Nu_{avg} ' nun yüzey dağılımı literatürde en çok bildirilenler olduğu görülmüştür [39].

Yerel ısı transfer katsayısı, h , şu şekilde ifade edilmektedir [50]:

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_{ref}} \quad (3.1)$$

q_w duvar ısı akısı, T_w duvar sıcaklığı, T_{ref} referans sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Yerel ısı transfer katsayısı olan h , Nusselt sayısına çevrilerek boyutsuzlaştırılmaktadır. Nusselt sayısı ise şu şekilde ifade edilmektedir [50]:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.2)$$

Bu denklemde D_h , nozul çapı, k ise akışkanın termal iletkenliğini göstermektedir. Bir güç yasası ilişkisi olduğu varsayıldıktan sonra yerel, durgunluk noktası ve ortalama nusselt sayısı için makul bir ampirik korelasyon bulunmuştur [50]:

$$Nu = C Re_D^m Pr^n \quad (3.3)$$

Bu ampirik korelasyonda, C sabit bir sayı, Re_D jet hızına ve nozul çapına bağlı olan Reynolds sayısı, Pr akışkanın Prandtl sayısı olarak ifade edilmektedir.

Çarpan jetlerde ısı transferi, yüksek basınç gradyanı, akış devirdaimi ve yerel ince termal katman nedeniyle çok karmaşıktır. Bu soğutma tekniği nanoakışkanlarla birleştirildiğinde ise, oldukça karmaşık hale gelmektedir. Aşağıda hem deneysel hem de sayısal olarak çarpan jetlerde ısı transferini geliştirmede nanokışkanların kullanımını içeren çalışmalara örnekler verilmiştir. Bu çalışmaları konvansiyonel

çarpan jetler ve dönmeli çarpan jetler olarak iki başlık altında toplamak mümkündür [41].

Hosseinalipour ve ark., 2010 [51] yaptıkları çalışmada, nanoakışkanların laminer çarpma jet akışları problemi sayısal olarak araştırılmıştır. Su- Al_2O_3 karışımı için elde edilen sonuçlar, baz akışkanda nanopartiküllerin varlığına bağlı olarak ısı transfer hızında bir artış olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, akışa partiküllerin dahil edilmesi kayma gerilimini ve basınç düşüşünü arttırmıştır.

Sun ve ark., 2016 [52], bir ısı değiştiricideki Cu-su nanoakışkan çarpma jetinin davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, nanopartiküllerin ısı transfer performansını önemli ölçüde artırabildiğini ve basınç düşüşü üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Nanoakışkanlar kullanıldığında, ısı transfer hızının diğer jet açılarındaki kare nozul şekline kıyasla 90° 'lik jet açısında dairesel jetler için daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Dahası, püskürtme açısı ne kadar büyükse, ısı transfer etkisi o kadar güçlüdür; ideal jet çarpma soğutma etkisi, jet açısı 90° 'ye ulaştığında elde edilir. Ek olarak, belirli bir nozul boyutu, aynı jet koşullarında ısı transfer etkisini en üst düzeye çıkarır.

Nayak ve ark., 2016 [53], su- Al_2O_3 ve su- TiO_2 olmak üzere iki farklı nanoakışkan, yüksek ısı akısını gidermek için sıcak çelik yüzeyine jet şeklinde çarptırılarak performansları karşılaştırılmıştır. Ağırlık konsantrasyonları %0.01, %0.03, %0.05 ve %0.07 Al_2O_3 ve TiO_2 nanopartiküllerine sahip nanokışkanlara çarpmanın sıcak yüzeyden ısı transferi üzerindeki etkisi test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, nanopartiküllerin baz akışkana eklenmesinin ısı transfer hızını ve beklendiği gibi ısı transfer katsayısını arttırdığını ortaya koymuştur. Isı transfer hızı, nanopartikül konsantrasyonlarının belirli bir sınırına kadar artış gösterdikten sonra düştüğü görülmüştür. Çelik şerit soğutma için nanokışkanların uygulanması, geleneksel akışkan soğutma yöntemlerine kıyasla ısı transferi fenomeni açısından çok etkili olduğu bulunmuştur.

Tablo 3.3. Konvansiyonel çarpan jetler ile ilgili deneysel olarak yapılan çalışmalar

Jet tipi, sayısı ve geometrisi	Akış hızı	H/D	Partikül tipi, çapı (nm) ve miktarı (%)	Isı transfer artışı	Araştırmacılar
Serbest / Tek / Dairesel	1700<Re<20,000	0.6–4	Al ₂ O ₃ /36/5	%72	[54]
Serbest/ Tek/ Dairesel	3800≤Re≤ 88,000	0.6–4	Al ₂ O ₃ /36/≤6	Maksimum φ =2.8% ve H=5mm	[55]
Daldırılmış/ Tek/ Dairesel	2000<Re<16,000	1–3	Cu/26/1.5–3	Maximum H = 4 mm ve φ = 3%	[56]
Daldırılmış/ Tek/ Dairesel	2000<Re<16,000	1–3	Cu/25&100/1.5–3	52%	[57]
Serbest/ Çoklu/ Dairesel	2000< Re≤10,000	2–17	Al ₂ O ₃ /31/2–6	φ= 2%' de Maximum	[58]
Serbest/ Çoklu/ Dairesel	2.7 ≤ V ≤ 7.6 m/s	1.1-4.05	Cu/-/0.5–3	φ= 2%' de Maximum	[59]
Serbest/ Çoklu/ Dairesel	0.05 ≤ m• ≤ 0.167 kg/s	-	SiC, TiO ₂ , SiO ₂ /-/1	SiC partikülleri için daha yüksek artış	[60]
Sınırlı/ Tek/ Dairesel	3000< Re≤ 8000	1.5	TiO ₂ /21/0.2	%10.5	[61]
Sınırlı/ Tek/ Dairesel	8<m• <12 g/s	H=1.0- 2.0 mm D=0.5– 1.5 mm	TiO ₂ /21/0.001– 0.015	%18.56	[62]
Serbest/ Tek/ Slot	1700< Re<2800	H=10mm W=1.5m m	Al ₂ O ₃ /15/0.02–0.15	%21.7 yerel ve %13.91 ortalama artış	[63]

bölgede ve tam gelişmiş bölgede merkez hattı hızında kademeli olarak azalmalar meydana gelmektedir [68].

Durma bölgesi; jet akışının çarpma bölgesinden etkilendiği kısımdır. Akış fiziksel sınırın varlığından dolayı eğilmeye ve strese maruz kalmaktadır. Durma bölgesinde hız vektörleri yön değiştirirler. Bir noktadan sonra yüzeye paralel halde yatay konuma gelirler. Durma bölgesi, yüzey üzerindeki basınç gradyanının sıfır olduğu noktaya kadar uzanmaktadır. Bu bölgede sınır tabaka kalınlığı sabit kalma eğilimindedir [69].

Jet akışı durma bölgesinden geçtikten sonra momentumu sıfır olan serbest ortam akışı ile karşılaşır. Belirli bir süre sonra ivmesini kaybeder ve yavaşlamaya başlar. Bu yavaşlamanın gözlemlendiği jet bölgesi duvar bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Duvar jeti bölgesinde sınır tabaka kalınlığı artmaktadır. Özellikle duvar jeti başlangıcında sirkülasyon bölgeleri gözlemlenmektedir.

3.2 Isı Transferini İyileştirme Yöntemleri

Isı transferini geliştirme yöntemleri Bergles ve ekibi tarafından aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki ana yöntem altında toplanmıştır. Bu yöntemlerin bir arada kullanıldığı tekniğe bileşik yöntem adı verilmiştir [70].

Tablo 3.4. Isı transferi arttırma tekniklerinin sınıflandırılması [70]

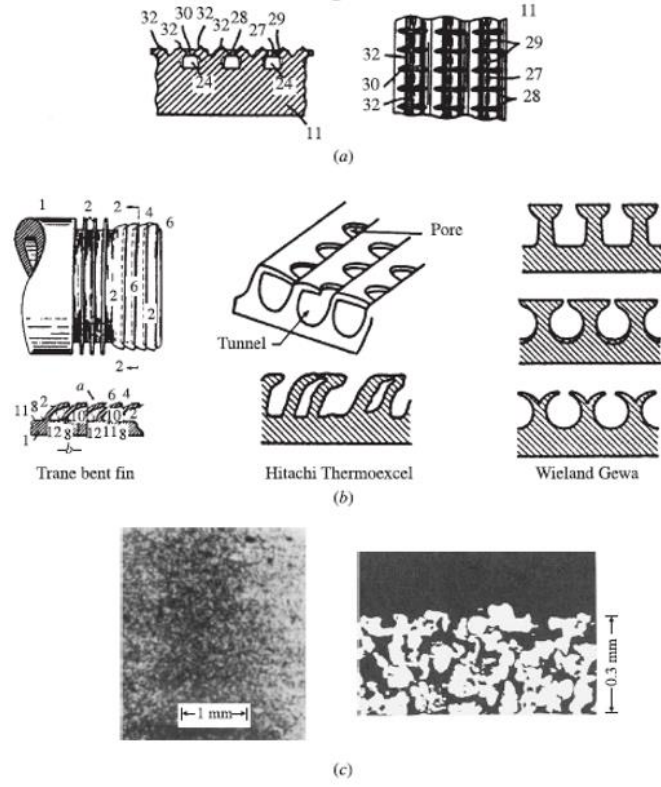
Pasif Yöntemler	Aktif Yöntemler
İşlem görmüş yüzeyler	Mekanik karıştırıcılar
Pürüzlü yüzeyler	Yüzey titreşimi
Genişletilmiş yüzeyler	Akışkan titreşimi
Yerinden edilmiş güçlendirme araçları	Elektrik veya manyetik alan
Girdap akış cihazları	Enjeksiyon
Sarmal tüpler	Emme
Yüzey gerilim cihazları	Çarpan jetler
Sıvılar için katkı maddeleri	
Gazlar için katkı maddeleri	
Bileşik Etki	
İki veya daha fazla aktif ve/veya pasif yöntemin bir arada kullanılmasını içermektedir.	

3.2.1 Pasif Yöntemler

Dışarıdan bir güce gereksinim duymadan ısı transferini geliştirme teknikleridir. Akış hattında ya da yüzey alanında yapılan geometrik düzenlemeler, akışkana ilave maddeler, pürüzlü yüzeyler, genişletilmiş yüzeyler kullanılarak mevcut akışın değişime uğraması sonucu daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmesini sağlamaktadır [70].

İşlem görmüş yüzeyler

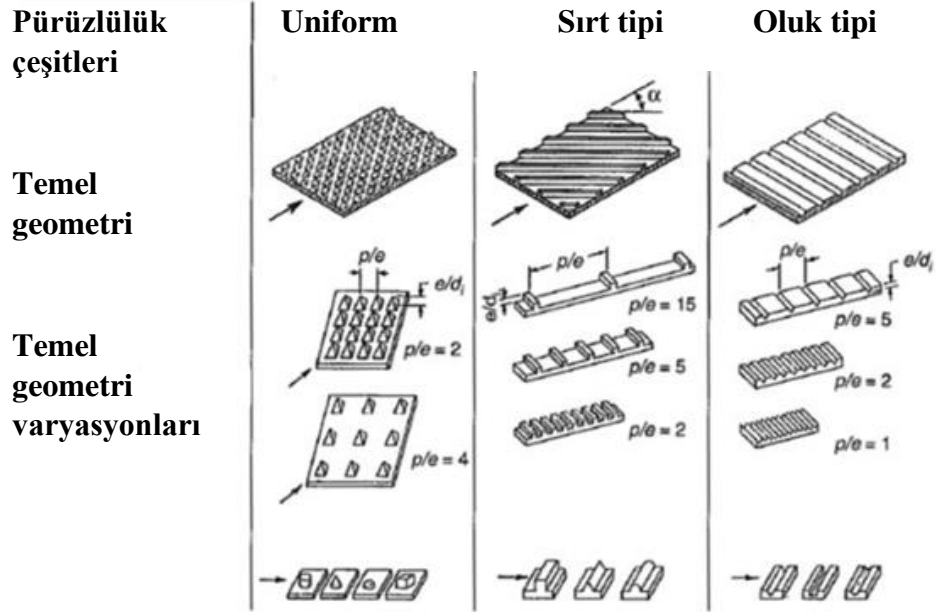
Uygulama yapılan yüzeylerde veya kaplamalarda sürekli ya da süreksiz olarak hassas bir değişiklik gösteren ısı transfer yüzeyleridir (Şekil 3.4.). Bu yöntem kaynama ve yoğuşma için kullanılmaktadır. Bu yüzey pürüzlülüğü tek fazlı ısı transferini etkileyecek kadar büyük değildir. Bu sebeple işleminden geçirilmiş yüzeyler öncelikle iki fazlı ısı transferinde uygulanmaktadır [70].



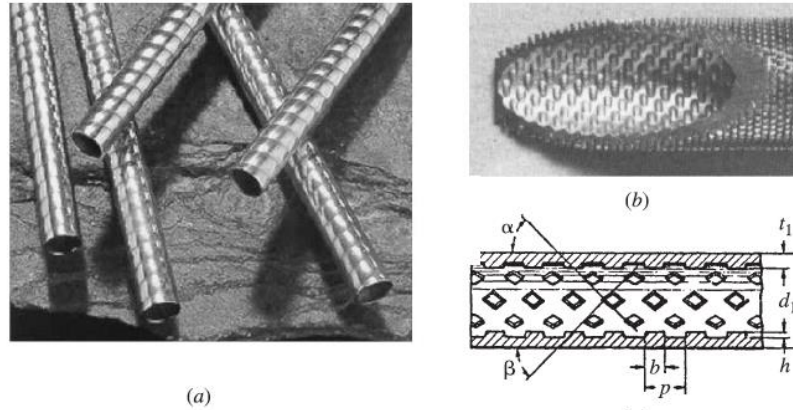
Şekil 3.4 Talaşlı imalat ile üretilmiş kaynama yüzeyleri (a) derin tırtıklı yüzey (b) küçük kanat yüzeyler (c) sinterlenmiş partikül kaplanmış yüzey [70]

Pürüzlü yüzeyler

En eski, en basit ve oldukça etkili tekniklerden biri, türbülanslı tek fazlı akışlarda pürüzlü yüzeylerin kullanılmasıdır. Pürüzlü yüzeyler çok değişken yapılarda iki ya da üç boyutlu olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 3.5. ve 3.6.). Pürüzlü yüzeyler ısı transfer alanını arttırmaktan ziyade türbülansı desteklemek için kullanılan bir tekniktir ve uygulanması tek fazlı akışa yöneliktir. Laminer akışlarda, küçük ölçekli yüzey pürüzlülüğünün çok az etkisi olmaktadır. Bu konudaki ilk çalışmalar, ticari borularda "doğal olarak" oluşan pürüzlülüğe odaklanmış olmasına rağmen, Bergles (1998) doğal pürüzlülüğün iyi tanımlanamamasına dikkat çekmiştir. Böylelikle yapay veya yapılandırılmış pürüzlülük artık çoğu uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılandırılmış pürüzlülük, yüzeye entegre olabilir veya çıkıntılar, tel-bobin tipi ekler şeklinde sağlanabilir. Şekiller tırtıl çekme, diş açma ve kanal açma gibi formlarda olabilmektedir [70].



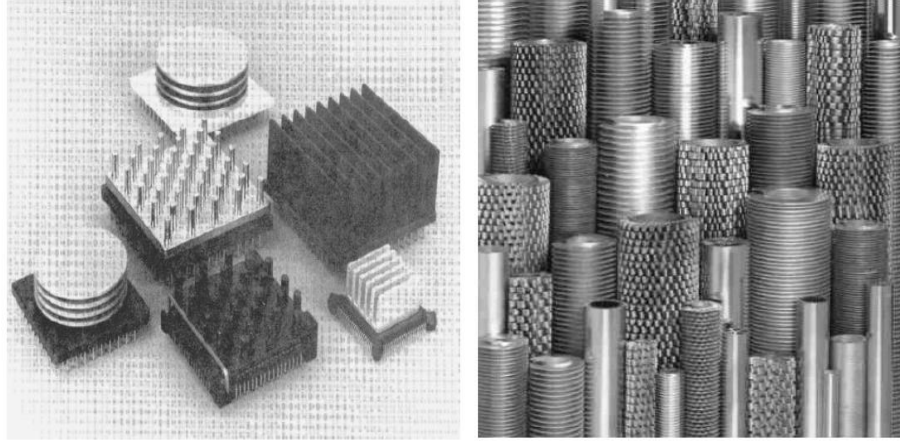
Şekil 3.5. Pürüzlülük geometrileri [71]



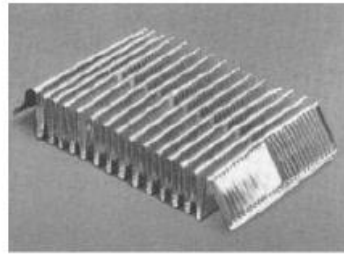
Şekil 3.6. Pürüzlü yüzeylere örnekler a) iki boyutlu b) üç boyutlu [70]

Genişletilmiş yüzeyler

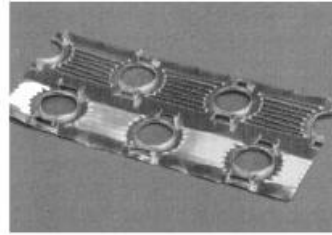
Genişletilmiş yüzeyler (Şekil 3.7.ve 3.8.), ısı değıştircilerinde sıklıkla kullanılmaktadır ve daha çok kanatlı yüzeyler olarak adlandırılmaktadır. Isı transfer yüzey alanını arttırmayı sağlamaktadırlar. Radyatör, klima sistemleri gibi evsel alanlarda görebilmek mümkündür. Araştırmacılar tarafından çeşitli kanat tipleri ve davranışları incelenmiştir [70].



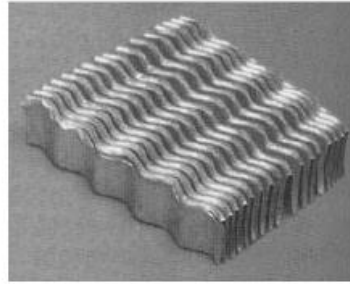
Şekil 3.7. a) Elektronik soğutma için kullanılan tipik kanatlı soğutucular (Courtesy of EG&G Wakefield Engineering) **b)** Kabuk ve borulu ısı eşanjörleri için dış yüzeylerinde çevresel ve şerit kanatlı borular (Courtesy of Wieland-Werke AG) [70]



Louvered plate fins

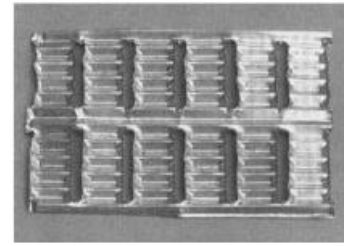


Circular-tube louvered fin



Wavy plate fins

(a)



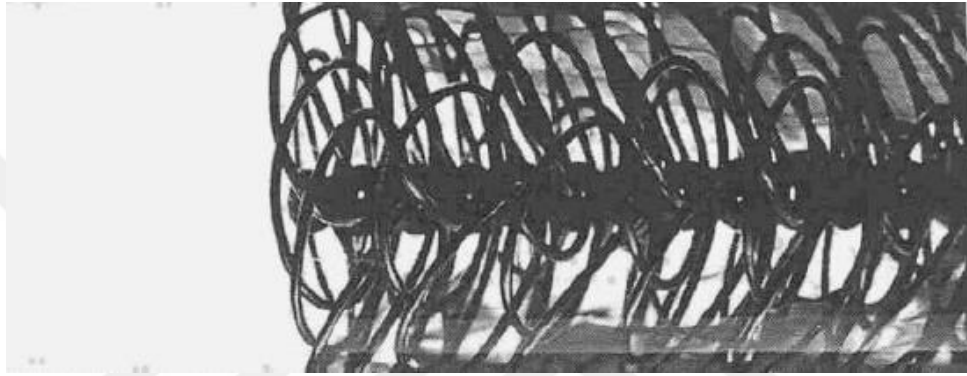
Oval-tube louvered fin

(b)

Şekil 3.8. a) plaka kanatlı ve **b)** tüp plaka kanatlı kompakt ısı değıştircide kullanılan bazı genişletilmiş kanat geometrileri [70]

Yerinden edilmiş güçlendirme araçları

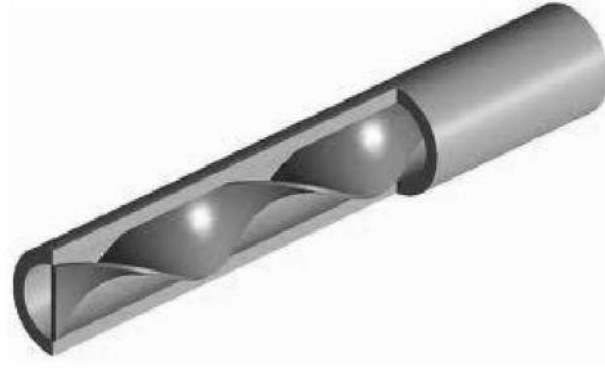
Özellikle zorlanmış akışta kullanılan ve akış kanalının içerisine yerleştirilerek ısıtılmış yüzeylerde enerji transferini arttıran araçlardır (Şekil 3.9.). Bu araçların bir birkaç farklı tipte kullanımı literatürde belgelendirilmiştir. Bunlar, sıvıyı kanalın çekirdeğinden ısıtılmış veya soğutulmuş duvara veya tam tersi şekilde yer değiştirme eğilimi gösteren statik karıştırıcı elemanlar, metalik ağ, diskler, halkalar veya bilyalar içermektedir.



Şekil 3.9. Yerinden edilmiş güçlendirme aracı (Tel matris tüp eki) [72]

Girdap akış cihazları

Girdap akış cihazı (Şekil 3.10.) kanaldaki aksenal akış üzerinde girdap akışı ya da ikincil bir akış oluşturmaktadırlar. Bükümlü bant ekleri, vida tipi boru ekleri, bükülmüş kanallar gibi çeşitli tipleri vardır. Tek fazlı ve iki fazlı akışlar için kullanılabilirler [73].



Şekil 3.10. Girdap akış cihazı [74]

Sarmal tüpler

Sarmal tüpler (Şekil 3.11.), girdaplar oluşturan akış geometrileri olarak uzun bir süredir bilinmektedir. Daha çok ısı değişiriciler gibi davranmaktadırlar. Bu tüpler, aksenal akış üzerine üst üste binen çoklu sarmal girdaplar ile karakterize edilen oldukça karmaşık akış modelleri oluşturarak ısı veya kütle transferini arttırmaktadırlar. Sarmal tüpler evsel sıcak su ısıtıcıları, kimyasal proses reaktörleri, endüstriyel ve denizcilik kazanları, böbrek diyaliz cihazları ve kan oksijenatörleri gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.11. Sarmal tüp [75]

Yüzey gerilim cihazları

Kaynamada ve yoğunlaşmada sıvı akışını yönlendirmek için kullanılan fitilli veya oluklu yüzeylerden oluşan cihazlardır.

Katkı maddeleri

Sıvılar için katkı maddeleri, tek fazlı akışlarda katı parçacıkları ve gaz kabarcıklarını, kaynatma sistemleri için ise genellikle sıvının yüzey gerilimini düşüren sıvı iz katkı maddelerini içermektedir. Gazlar için katkı maddeleri sıvı damlacıklar veya katı parçacıklardan oluşabilir. Bu katkı maddeleri hem seyreltik fazda (gaz-katı süspansiyonlar) hem de yoğun fazda (akışkan yataklar) tercih edilebilmektedir.

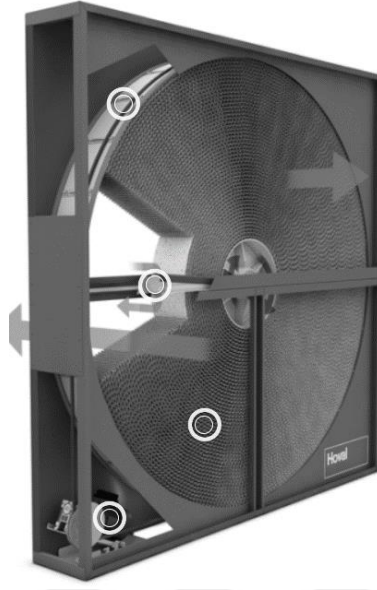
Pasif yöntemler sistemde birtakım problemler oluşturabilir. Örneğin, parçacık ilavesi sistemde zaman içerisinde akışkan özellikleriyle değişebilen çökelme, kirlenme gibi istenmeyen ya da hesaplamalara önceden dahil edilmesi gereken faktörleri beraberinde getirebilir. Bir başka örnek ise geometrisi ya da yapısı gereği sisteme kanat gibi pasif yöntemler entegre edilemeyebilir. Türbülantörlü sistemlerde ses ve titreşim oluşmasına bu nedenle yorulmalara sebep olabilirler. Bu ve benzeri sebeplerden dolayı bazı durumlarda aktif yöntemler tercih edilebilmektedir [70].

3.2.2 Aktif Yöntemler

Geometrik düzenlemeleri, tasarım gereği ya da kullanım şartları gereği katkı maddelerinin kullanımının yeterli olmadığı durumlarda dışarıdan bir güç yardımıyla ısı transferini iyileştirme tekniğine aktif yöntem adı verilmiştir. Mekanik karıştırıcılar, yüzey titreşimi, akışkan titreşimi, elektrik veya manyetik alan, enjeksiyon, emme, jet akışı aktif yöntemler arasındadır.

Mekanik karıştırıcılar

Bu yöntem, akışkanın mekanik yollarla karıştırılmasını ya da herhangi bir karıştırıcı olmaksızın yüzeysel döndürülmesini kapsamaktadır. Döner tip ısı değiştiricileri (Şekil 3.12.) sıklıkla kullanılan örnekleri arasındadır.



Şekil 3.12. Döner tip ısı değıştirci [76]

Yüzey titreşimi

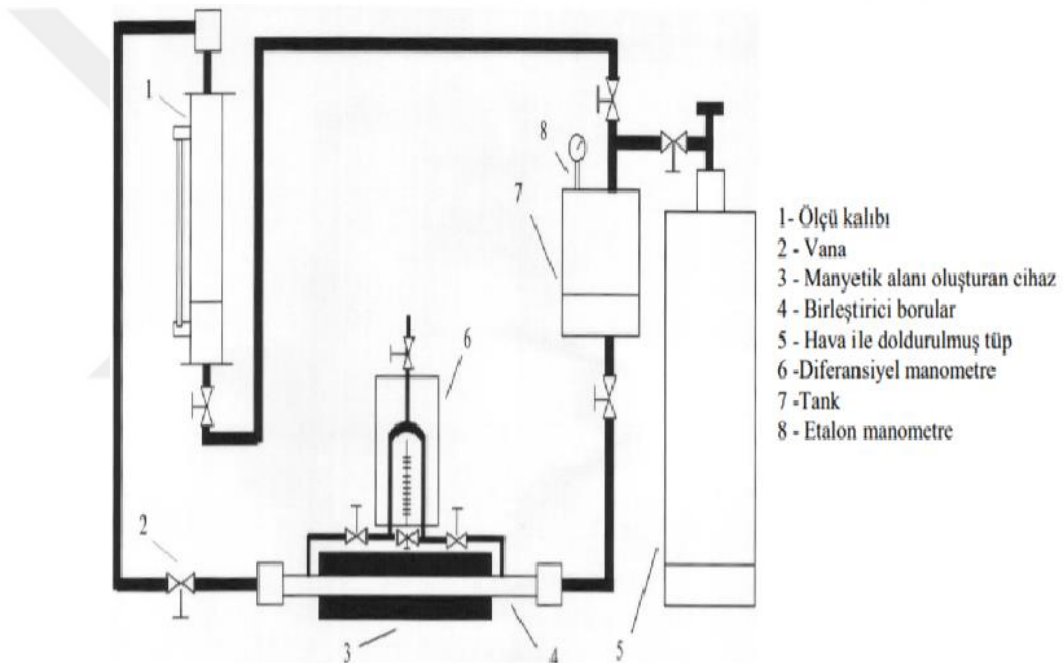
Yüzey titreşimi, daha yüksek ısı transfer katsayıları elde etmek için özellikle düşük veya yüksek frekansta tek fazlı akışlarda uygulanmaktadır. Yüzey titreşimi ve akustik dalgalar ısı transferini ve ısı akısını taşınım etkilerini artırarak sağlarlar. Isı değıştircilerinde bu titreşim yapısı yorulma ve yorulmaya bağı kırıma gibi problemlere yol açabilir [73].

Akışkan titreşimi

Özellikle tek fazlı akışlarda kullanılan bu yöntem 1 Hz' den ultrasonik (20000 Hz) frekansa kadar çıkarak titreşim uygulayabilmektedir. Bu yöntem ısı değıştircilerinin kütlesi göz önüne alındığında titreşim oluşturmak için pratik bir yöntemdir. Akış kararsızlığı ve türbülansı yoluyla ısı transfer sıvısına titreşim veya salınım hareketi verilir. Akışkan titreşimi, yüzey titreşimine göre tahribat etkilerine göre avantajlıdır. Düşük Reynolds sayılarında ve zorlanmış taşınımlı akışlar için kullanışlıdır [73].

Elektrik veya manyetik alan

Elektrik iletkenliğine sahip akışkanlarda akışın kontrolünü sağlamak amaçlı kullanılan bir yöntemdir. Kısaca EHD olarak tanımlanan elektro hidrodinamik ısı transferi iyileştirme yöntemi akışa bir elektrik alan bağlanarak yüksek voltaj ve elektrik akımı uygulayarak elektrik enerjisini kinetik enerjiye çevirip akış hızını arttırmaktır. Akışkanların elektromanyetik alan etkisi altına girmesi sonucu oluşan akışa manyetohidrodinamik akış (MHD) denilmektedir. Manyetik alan etkisi, EHD akışta olduğu gibi elektrik iletkenliği olan akışlarda ısı transferini ve akışı etkilemektedir. Akışı yönlendirme ve kontrol altına almada kullanılmaktadır.



Şekil 3.13. Akışkan hareketine ve ısı taşınımına manyetik alanın etkisini incelemek için kurulan deney düzeneği [77]

Enjeksiyon

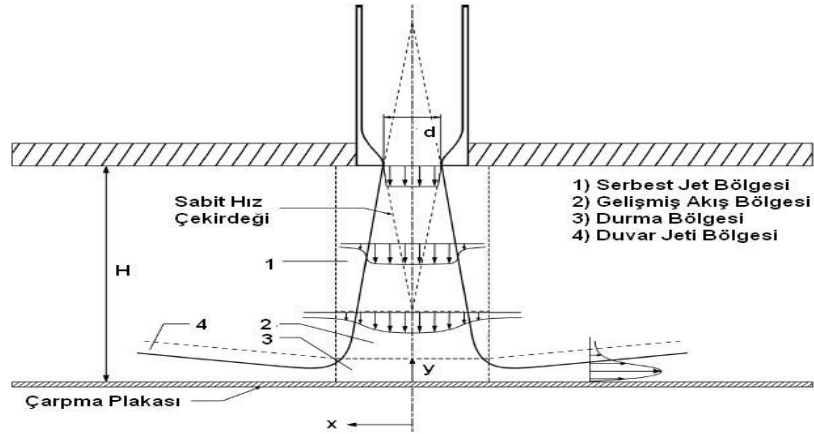
Tek fazlı akışta kullanılan bu yöntem gözenekli bir ısı transfer yüzeyi aracılığıyla gazın durgun veya hareketli akışkana ya da akışkanın üst yüzeyine gaz verilmesini içermektedir.

Emme

Emme, çekirdek veya film kaynamada gözenekli ısıtılmış bir yüzey yoluyla buharın çıkarılmasını veya tek fazlı akışta gözenekli ısıtılmış bir yüzeyden sıvı çekilmesini içerir.

Çarpan jet

Akış yönüne dik ya da açılı bir şekilde zorlanmış taşınım etkileriyle ısı transferini arttıırırlar. Tekli ya da çoklu olabilen jetler, akışa dik ya da eğik bir jet akışı oluşturmaktadır. Çoklu jetler kümeler halinde ya da akış eksenı boyunca uygulanabilmektedir. Çarpan jetlerde akış yapısı serbest jet bölgesi, gelişmiş akış bölgesi, durma bölgesi ve duvar jeti bölgesi olarak ayrılır (Şekil 3.14.) [67].



Şekil 3.14. Çarpan jet akış bölgeleri [67]

3.2.3 Bileşik Etki

Bileşik etki ısı transfer katsayılarını daha da yükseltmek için aktif ve pasif yöntemlerin bir arada kullanıldığı tekniktir. Bu geliştirme teknolojisi alanı, gelecekteki gelişmeler için önem kazanmaktadır. Bileşik tekniklerle, ısı transfer katsayıları, tek başına kullanılan tekniklerin her birinin üzerine doğru şartlar altında arttırılabilir. Bileşik teknik kullanımına bu tez çalışmasının da konusu olan nanoakışkan içeren çarpan jetlerin MHD etkisi altındaki ısı transferini geliştirmesi örnek olarak verilebilir.

3.3 Nanoakışkanlar

Temel (baz) akışkan olarak adlandırılan su, yağ, etilen ve glikol gibi sıvıların ısı iletkenlik katsayıları katılara kıyasla genellikle düşüktür (Tablo 3.5.). Mühendislik gerekliliklerinden doğan bu sınırlamaların üstesinden gelmek için bazı teknikler denenmiştir [78]. 1881 yılından itibaren birçok çalışmada etkili bir transfer sağlamak için mikrometre veya milimetre boyutunda olan katı parçacıklar tercih edilmiştir. Ancak bu çalışmalarda kullanılan büyük boyutlu parçacıklar akışkan içerisinde çabuk çökme, düşük kararlılık, akış direnci, akış kanalında erozyon, tıkanma, kirlenme ve akışkan içerisinde basınç düşmesi gibi problemler meydana getirmektedir [79]. Mikro veya milimetre boyutundaki parçacıkların oluşturduğu bu problemleri ortadan kaldırmak için 1990 yılının başında Choi tarafından nano terimi bu alandaki literatüre girmiştir [80].

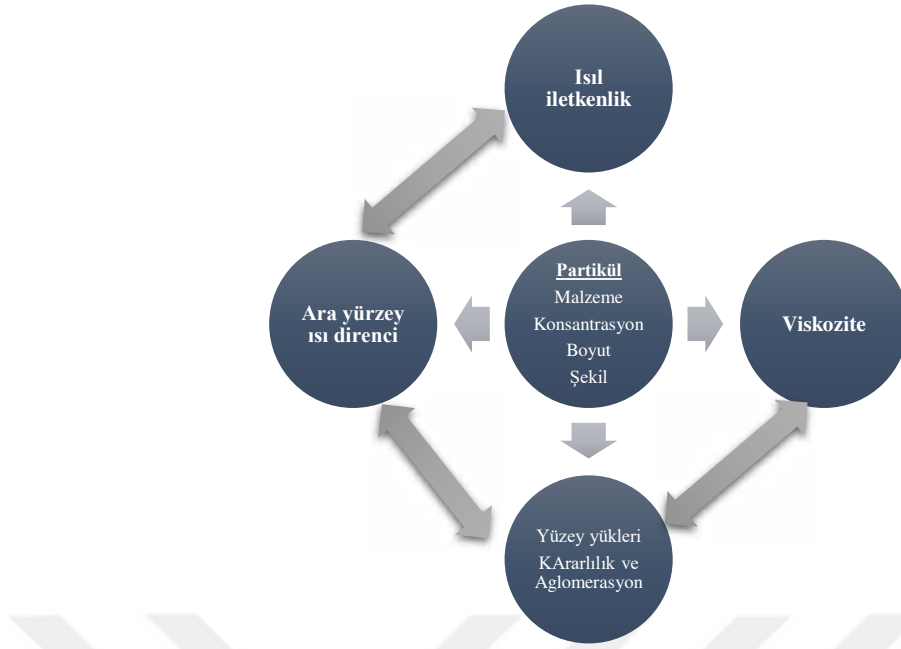
Nanopartiküller 100nm çapından daha küçük ve termal iletkenlikleri baz akışkana göre daha yüksek olan parçacıklardır. Bu boyut aralığındaki parçacıklarla, özellikle 10 nm'nin altında, benzersiz ve dikkat çekici termal olaylar gözlemlenmektedir. Bir baz sıvı içinde homojen olarak dağılmış ve asılı nanometre boyutlu parçacıklar içeren yeni bir tür çok bileşenli sıvılara “nanoakışkan” terimi kullanılmaktadır [81]. Başka bir deyişle, nanoakışkanlar, yoğunlaştırılmış nanomateriyaller içeren nano ölçekli koloidal süspansiyonlardır. Katkı maddesi olarak kullanılan nanomateriyaller kimyasal stabil metaller, metal oksitler, seramik oksitler ve karbon türevlerini içermektedir [82, 83, 84]. Nanoakışkan eldesinde kullanılan nanomateriyaller nanopartiküller, nanolifler, nanotüpler, nanoteller, nanorodlar, nanotabaka veya damlacıklar şeklinde olabilmektedir. Baz akışkan içerisine eklenen nanopartiküller ile akışkanın yüzey alanı ve buna bağlı olarak da ısı iletkenliği artmaktadır. Ayrıca bu eklenti akışkanın türbülans kapasitesini arttırmaya yardımcı olmaktadır [79]. Nanopartiküllerin kullanımı ile ani basınç düşüşü, tortullaşma, korozyon gibi sorunlar büyük ölçüde azalmaktadır.

Tablo 3.5. Nanoakışkanlarda kullanılan bazı katkı maddelerinin ve baz akışkanları termal iletkenlik değerleri [85]

Malzeme		Termal iletkenlik (W/Mk)
Metalik	Cu	401
	Al	237
	Ag	428
	Au	318
	Fe	83.5
Metalik olmayan	Al ₂ O ₃	40
	CuO	76.5
	Si	148
	SiC	270
	CNTs	~3000 (MWCNTs) ~6000 (SWCNTs)
	BNNTs	260 ~ 600
Baz akışkan	H ₂ O	0.613
	Etilen glikol (EG)	0.253
	Motor yağı (EO)	0.145

Son yıllarda, nanoakışkanlar giderek daha fazla ilgi görmektedir. Nanoakışkan araştırmalarındaki bu ivmelenme için ana itici güç, nanoakışkanların geniş bir uygulama yelpazesinin bulunmasında yatmaktadır. Nanoakışkanlar, otomobil transmisyonu, elektronik soğutma, sondaj sıvıları, güneş enerjili su ısıtma, nükleer reaktör, radyatör vb. gibi alanlarda soğutucu olarak uygulama bulmaktadır [86].

Baz akışkan içinde dağılan nanoparçacıkların malzemesi, boyutu, şekli, konsantrasyonu ve Brownian hareketleri gibi parçacık özellikleri ve nanoakışkanın türü, özelliği, akış geometrisi ve akış türü nanoakışkanın termal özelliğini etkilemektedir (Şekil 3.15.) [84, 87].



Şekil 3.15. Nanoakışkan bir sistemin çok değişkenliğinin şematik gösterimi [88]

Nanopartikül malzemesi

Teorik olarak, yüksek ısı iletkenliğe sahip tüm katı nanopartiküller, nanoakışkanların katkı maddeleri olarak kullanılabilir. Literatürde bildirilen nanoakışkanları hazırlamak için sıklıkla kullanılan bu nanopartiküller; Ag, Fe, Cu ve Au gibi metalik partiküller, TiO_2 , Al_2O_3 , CuO, SiC ve Fe_3O_4 metal olmayan parçacıklar, karbon nanotüp gibi karbon türevleri olabilir [85].

Eastman ve ark., 2001 [89], ortalama çapı ~10nm olan Cu nanopartikülleri, yaklaşık hacimce %0.3 olacak şekilde yüklendiğinde oluşturdukları etilen glikol bazlı nanoakışkanın termal iletkenliğinin % 40'a kadar arttığını göstermişlerdir.

Patel ve çalışma arkadaşları [90] ise, su ve toluen içinde dağılmış Au ve Ag nanopartiküllerinin davranışları üzerine yaptıkları son çalışmada sıvı termal iletkenliğinde %21'e varan artışlar gözlemlemişlerdir. Ancak şaşırtıcı bir şekilde bu sonuçları sadece hacimce %0.011 gibi son derece düşük nanoparçacık yüklemelerinde elde etmişlerdir.

Yu ve Xie, 2012 [91], MgO, TiO₂, ZnO, Al₂O₃ ve SiO₂ nanopartikülleri gibi oksitleri içeren etilen glikol (EG) bazlı nanokışkanların ısı iletkenliklerini incelemiştir. Sonuçlara göre, hacimce %5 oranında kullanılmış olan MgO, TiO₂, ZnO, Al₂O₃ ve SiO₂ nanopartiküllerin nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerindeki % artışı sırasıyla şu şekildedir: 40.6, 27.2, 26.8, 28.2, 25.3. MgO-EG nanoakışkanın en yüksek ısı iletkenlik ve en düşük viskozite ile üstün özelliklere sahip olduğunu görmüşlerdir.

Termal iletkenlikte en büyük artışlar, yüksek termal iletkenliğe ek olarak çok yüksek en-boy oranına sahip olan karbon nanotüp süspansiyonlarında gözlenmiştir. Karbon nanotüpler oldukça karmaşık bir fiber ağı oluşturduğundan, viskozite ölçümlerinin gösterdiği gibi mobil değildirler ve bu nedenle sıvı süspansiyonların termal taşınması üzerindeki etkilerinin polimer kompozitlere benzer olması beklenir. Biercuk ve ark., 2002 [92] tarafından tek duvarlı bir karbon nanotüp-polimer epoksi kompoziti üzerinde bildirilen ilk çalışma, oda sıcaklığında ağırlıkça %1 nanotüp yüklemesinde termal iletkenlikte %125'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca araştırmacılar artan sıcaklıkla artan bir termal iletkenlik gözlemlenmiştir.

Nanopartikül boyutu

Spesifik yüzey alanı (SYA), nanopartiküllerin şekli ve boyutu gibi nanopartiküllerin morfolojisini oluşturan parametreler, nanoakışkanların termal iletkenliğini güçlü bir şekilde etkileyebilmektedir [85].

Masuda ve ark. [93] hacimce %4.3 Al₂O₃ nanopartiküllerinin eklenmesiyle suyun termal iletkenliğinde %30 artış bildirmişlerdir. Lee ve arkadaşları [94] tarafından yapılan Al₂O₃ nanopartiküllerinin sudaki davranışını inceleyen benzer bir çalışmada ise, hacimce aynı nanopartikül yüklemesinde, termal iletkenlikte yalnızca %15'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Termal davranıştaki bu farklılığın sebebi, iki örnek çalışma arasındaki ortalama parçacık boyutundaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Masuda ve ark. tarafından kullanılan Al₂O₃ nanopartikülleri 13 nm çapa sahipken, Lee ve ark. tarafından yapılan çalışmada 33 nm ortalama çapa sahip olduğu belirlenmiştir.

Benzer şekilde Choi ve ark. [95] parçacık boyutunun Al_2O_3 nanopartiküllerini içeren su ile oluşturulan nanoakışkanının ısı iletkenliğine olan etkisini inceledikleri çalışmada, Al_2O_3 nanopartiküllerinin boyutu küçüldükçe, termal iletkenlikte önemli bir artış olduğunu göstermişlerdir. Bu durumun, nanoakışkan içerisindeki nanopartiküller arasındaki ısı alışverişinin artmasından kaynaklanıyor olabileceğini belirtmişlerdir [96].

Nanopartikül şekli

Nanoakışkan içerisinde kullanılan nanopartiküllerin şeklinin de nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Nanoakışkan araştırmalarında normalde silindirik ve küresel partiküller olmak üzere iki şekilde partikül kullanılmaktadır. Silindirik şekilli nanopartiküllerde uzunluk çaptan daha büyüktür [97]. Gao ve ark., 2007 [98], yaptıkları çalışmada nanopartikül şeklinin küreselden saptığında etkili bir şekilde termal iletkenlikte yüksek artışa sebep olduğunu göstermişlerdir.

Murshed ve ark., 2005 [99], ise çubuk şeklinde ve küresel şekilli TiO_2 nanopartikülleri deiyonize suda dağıtarak nanoakışkanlarda, partikül oranlarındaki artışla (hacimce %0.5–5) termal iletkenlikte iyileşme göstermişlerdir. Ayrıca termal iletkenliğin partikül boyutu ve şeklinden etkilendiğini ispatlamışlardır. 15nm çapındaki küresel şekilli TiO_2 ile %5 partikül hacim fraksiyonunda hazırlanan nanoakışkanın termal iletkenliği %29.70 artış gösterirken, aynı hacim fraksiyonunda, ϕ 10 nm $\times$ 40 nm boyutlara sahip çubuk şekilli TiO_2 ile hazırlanan nanoakışkandaki termal iletkenlik %32.80 artış göstermiştir. Bu çalışma ile araştırmacılar, çubuk şeklindeki nanomateriyallerin, küre şekline kıyasla termal iletkenliği daha fazla arttırdığını bulmuşlardır.

Nanopartikül konsantrasyonu

Nanoakışkan özelliklerini etkileyen nanopartikül konsantrasyonunun %5 oranından düşük olduğu durumlarda dahi akışkan sisteminin, ısı iletkenliğini (k) oldukça yükselttiği gösterilmektedir. En az konsantrasyonda nanopartikül kullanımı

ile en yüksek ısı iletkenlik kapasitesine ulaşmak nanoakışkan meydana getirmenin temel amacıdır [79].

Eastman ve ark., 2001 [89] etilen glikol içinde dağılan Cu nanopartiküllerinin hacimce %0.3 konsantrasyonu ile termal iletkenliğinin %40 artacağı gerçeğini sunmuşlardır.

Das ve ark., 2003 [100] suya eklenen alümina nanopartiküllerin %1-%4 hacim konsantrasyonu ile ısı iletkenlikte %10-25 artış gözlemlemiştir.

Duangthongsuk ve Wongwises, 2009 [101], TiO_2 nanopartiküllerinin termal iletkenliğini hacimce %0.2-2 oranında su içinde dağılmış olarak incelemiştir. Çalışma sonunda, nanoakışkanların ısı iletkenliğinin partikül yükü ve sıcaklık (15°C ile 35°C arasında değişen) ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir.

Nguyen ve ark., 2006 [102] Baz sıvıyı (damıtılmış su), damıtılmış su ve çeşitli konsantrasyonlarda Al_2O_3 nanopartiküllerinden oluşan bir nanoakışkan ile değiştirerek bir sıvı soğutma sisteminin ısı transferini artırmayı araştırmak için kapalı bir devre tasarladı. Ölçülen veriler, nanopartiküllerin damıtılmış suya dahil edilmesinin soğutma bloğunun konvektif ısı transfer katsayısında önemli bir artış sağladığını açıkça göstermiştir. Hacimce %4.5 partikül yüklemesi ile artış, baz sıvınıninkine göre %23'e kadar çıkmaktadır. Aynı zamanda, partikül konsantrasyonunun artmasının, ısıtılmış bileşen ile soğutma bloğu arasındaki bağlantı sıcaklığında açık bir düşüş ürettiği de gözlemlenmiştir.

Diğer faktörler

Az miktarda nanopartikül içeren nanoakışkanların termal iletkenliklerinin, baz akışkanlarinkine göre önemli ölçüde geliştirildiği bilinmektedir. Bu gelişim, büyük ölçüde partiküllerin yüzey alanına ve baz sıvının ısı iletkenliğine bağlıdır. Bununla birlikte, nanoakışkanın artırılmış termal iletkenlik oranı ile baz sıvı arasındaki ilişki hakkında çok az veri bulunmaktadır. Xie ve ekibi 2002 [103], su, etilen glikol, gliserol ve pompa yağındaki aynı Al_2O_3 nanopartiküllerinden (%5) oluşan nanoakışkanları,

baz sıvının termal iletkenliğinde azalma ile bağıl termal iletkenlikte (k_{eff}/k_0) artış olduğunu göstermişlerdir.

Yüzey aktif maddelerin ısı iletkenliği, su ve etilen glikolden önemli ölçüde daha düşüktür. Bu nedenle, bu tür katkı maddelerinin eklenmesi viskoziteyi iyileştirirken tipik olarak süspansiyonun termal iletkenliğini azaltmaktadır [88].

Bunlara ek olarak, tüm termofiziksel özelliklerin sıcaklık ile bağlantılı olduğu belirtilmelidir. Sıvıların ısı iletkenliği sıcaklıkla artabilir veya azalabilir; bununla birlikte, nanopartiküllerin eklenmesinden dolayı termal iletkenlikte göreceli artışın sabit kaldığı gösterilmiştir. Çoğu sıvının viskozitesi büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır ve tipik olarak artan sıcaklıkla düşer. Birkaç nanoakışkan sisteminde, sıcaklık arttıkça viskozitedeki nispi artışın azaldığı kaydedilmiştir. Sıcaklık ile sabit ısı iletkenlik artışı ve viskozite düşüşü gerçeği, nanoakışkan teknolojisini yüksek sıcaklık uygulamaları için çok umut verici kılmaktadır [88].

3.3.1 Nanoakışkanların Hazırlanması

Nanoakışkanlar hazırlanırken; kararlı ve dayanıklı yapıda bulunması, parçacık topaklanmasının kabul edilebilir seviyede olması, akışkanın kendi kimyasal yapısını muhafaza edebilmesi gibi temel özellikler dikkate alınır. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) gözlenmesi için yaygın olarak kullanılmıştır. Nanoakışkanların elde edilmesi iki yöntemle gerçekleştirilebilir. Bunlar tek adım metodu ve iki adım metodudur.

İki adım metodu

İki aşamalı yöntemde önce nanopartiküller, inert gaz yoğunlaştırma, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme, mekanik alaşımlama, solvotermal sentez veya diğer tekniklerle hazırlanmaktadır. Ardından ikinci aşamada, bu parçacıklar baz sıvısı içine dağıtılır ve uniform dağılım sağlamak ve aglomerasyonu önlemek için ultrasonik çalkalama, pH ayarlaması veya yüzey aktif madde ilavesi gibi birkaç yöntem kullanılmaktadır [104]. Büyük ölçeklere uygulanabilirliği açısından iki adım metodunun daha avantajlı olduğu düşünülmektedir. İki aşamalı yöntem, deiyonize

suda dağılmış oksit nanopartiküllerden oluşan nanoakışkanların oluşturulmasında daha iyi çalışmaktadır. Ancak daha ağır metalik nanopartiküller içeren nanoakışkanların üretiminde daha az başarılı olduğu bulunmuştur [105].

Tablo 3.6. İki adım metodu ile yapılan çalışmalara örnekler

Sistem	Hacimce partikül yüklemesi (%)	Partikül boyutu (nm)	Isıl iletkenlik artışı (%)	Araştırmacılar
Cu/H ₂ O	7.5	100	78	[106]
CuO/H ₂ O	5	33	11.5	[107]
Ag/Toluen	0.001	60-80	16.5 (60°C)	[90]
Au/Toluen	0.00026	10-20	21 (60°C)	[90]
Au/etanol	0.6	4	1.3 ± 0.8	[108]
TiO ₂ /H ₂ O	5	15	30-33	[99]
Al ₂ O ₃ /H ₂ O	5	20	20	[103]
Al ₂ O ₃ /EG	0.05	60	29	[103]
SiC/H ₂ O	4.2	25	15.9	[109]

Tek adım metodu

Tek adım metodu nanopartiküllerin aglomere olmasını ve oksidasyonu en aza indiren, temel akışkanın içinde parçacıkların dağıtılmasıyla meydana gelen bir işlemdir. Ayrıca bu yöntemde kurutma, depolama, nakliye ve dağıtım gibi maliyet oluşturan kalemler olmaması sebebiyle de daha düşük üretim maliyetine sahiptir. Sağladığı bu avantajlar sebebiyle de iki adımlı yöntem alternatif olarak kullanılmaktadır. Fakat yöntemin en büyük kısıdı; sadece düşük buhar basınçlı akışkanlara uygun olmasıdır [110].

Direkt buharlaştırma ve yoğunlaştırma, lazer ablasyon teknikleri gibi fiziksel yöntemler ve kimyasal indirgeme, toz altı nanoparçacık üretme, mikrodalga ısıma teknikleri gibi kimyasal yöntemler nanoakışkan üretmek için kullanılan tek adım metotlarını oluşturmaktadır [104].

Nanoakışkanların bir kısmı sadece partikül özelliklerine, baz akışkanın özelliklerine, etkileşimlere ve ürün uygulama gerekliliklerine bağlı olan tek aşama yöntemi ile hazırlanabilmektedir [111].

Lee ve ark., 1999 [112], ticari CuO nanopartiküllerini ultrasonik titreşim altında suda dağıtarak CuO nanoakışkanını hazırladıkları çalışmalarında, nanopartiküllerin hazırlanmasının ve nanoakışkanın hazırlanmasının ayrıldığı iki aşamalı bir yöntem uygulamışlardır. Bu yöntemde nanopartiküller, kurutma, depolama ve taşıma işlemi sırasında aglomere olma ve sonraki dağılım aşamasında zorluklara yol açma gibi sıkıntılara sebep olmuştur. Sonuç olarak, çalışmada elde edilen nanoakışkanın kararlılığı ve ısı iletkenliği ideal olmadığı gibi üretim maliyeti de yüksek bulunmuştur.

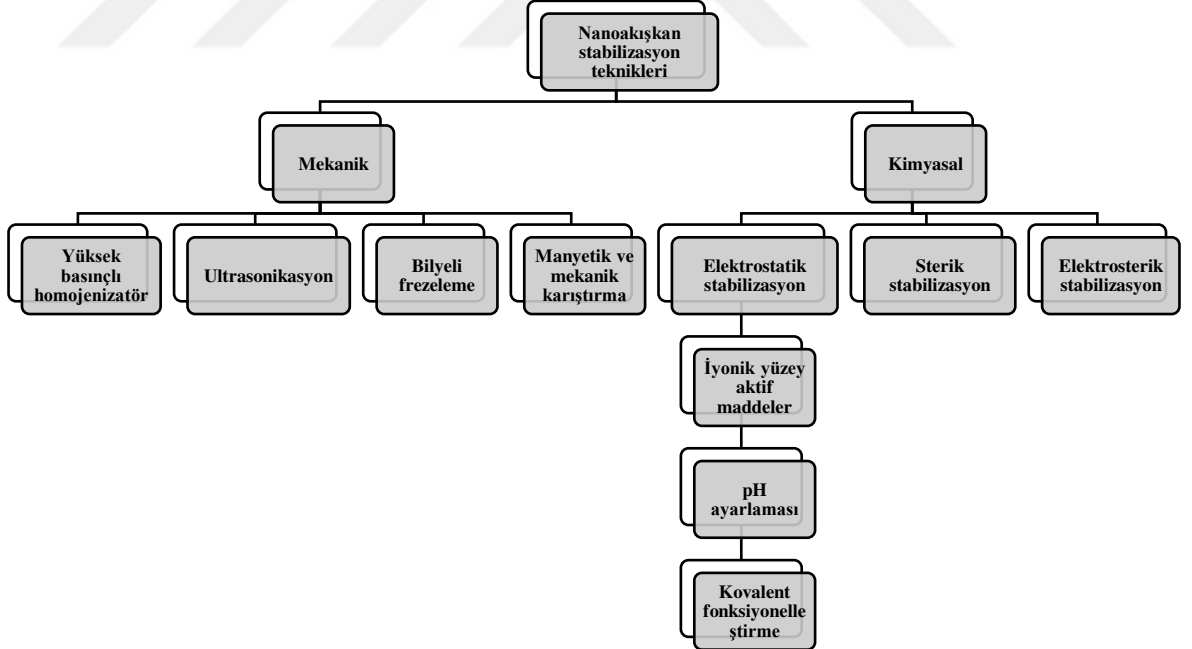
Nanopartiküllerin aglomerasyonunu azaltmak için, Choi ve Eastmann, 2001 [89] Cu/EG nanoakışkan hazırlamak için tek aşamalı bir fiziksel buhar yoğunlaştırma yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemde; Cu buharının, akan bir etilen glikol ile temas ettirilerek doğrudan nanopartiküller halinde yoğunlaştırılması söz konusudur. Hazırlanan nanoakışkan, yüksek ısı iletkenliğin yanı sıra yüksek stabilite de göstermiştir. Ancak bu yöntemle büyük ölçekte nanokışkan sentezlemek zordur ve maliyeti de yüksektir.

Tablo 3.7. Tek adım metodu ile yapılan üretimlere örnekler

Araştırmacılar	Yöntem	Açıklama
[113]	Akan Yağ Alt Tabakasında Vakumla Buharlaştırma (VEROS)	Kuru nanopartikül elde etmek için partikülün sıvıdan ayrılması bir sorun haline gelmektedir.
[114]	Modifiye VEROS	Kullanılan yüksek basınçlı magnetron püskürtme kullanılmaktadır. Bu yöntem gümüş ve altın nanopartiküller ile kullanıma uygundur.
[115]	Modifiye VEROS	Cu buharı, akan düşük buhar basınçlı etilen glikol ile temas ettiğinde doğrudan nanopartiküle yoğunlaşmıştır.
[116]	Yeni bir tek adımlı kimyasal metot	Mikrodalga ışınlaması altında etilen glikolde $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ile $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 'yu indirgeyerek Cu bazlı nanoakışkan üretimi gerçekleştirilmiştir.
[117]	Batık ark nanopartikül sentez sistemi (Vakum SANSS)	%30, %50, %70 (hacimce) oranında etilen glikol ve saf etilen glikol içeren deiyonize su gibi farklı dielektrik sıvılar içerisinde Cu bazlı nanoakışkan elde edilmiştir.
[118]	SANSS metodu	Ni nanomanyetik akışkan ve gümüş nanoakışkan üretimi gerçekleştirilmiştir.

3.3.2 Nanoakışkanların kararlılığı

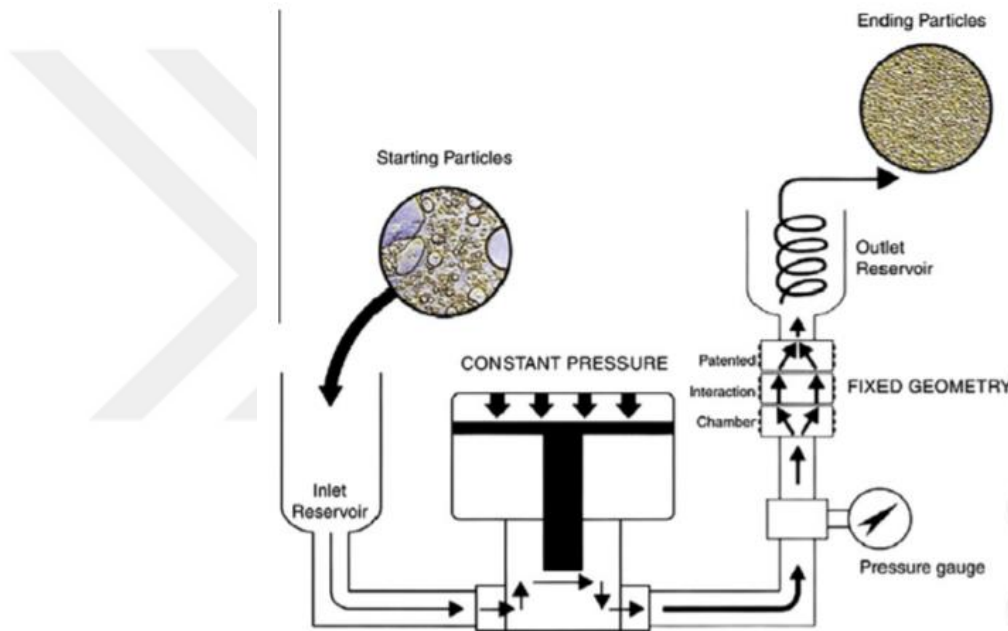
Nanoakışkanlar, nanopartiküller arasındaki güçlü Van der Waals etkileşimleri ve kohezif kuvvetler nedeniyle kararsız olabilmektedir. Bu bağları kırmak ve kararlı nanoakışkanlar oluşturmak büyük ölçüde hazırlama metoduna bağlıdır. Nanopartikül aglomerasyonunu önlemek ve nanoakışkanların stabilitesini iyileştirmek için pH kontrolü, yüzey aktif madde ilavesi, ultrasonik çalkalama, manyetik karıştırma, işlevselleştirme ve yüksek basınçlı homojenleştirme gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır [119]. Şekil 3.16.' da genel olarak mekanik ve kimyasal teknikler olarak sınıflandırılan farklı stabilizasyon yaklaşımlarının sınıflandırılmasını gösterilmiştir. Bu tekniklerden bazıları aşağıda detaylandırılmıştır. Nanoakışkanlarda uygun şekilde dispersiyon sağlanmadığı takdirde sistemlerde tıkanma, agregasyon ve sedimentasyon meydana gelerek, ısı iletkenlik, viskozite ve artan özgül ısı gibi süspansiyon özelliklerinin azalmasına neden olmaktadır [120].



Şekil 3.16. Nanoakışkan stabilizasyon tekniklerinin sınıflandırılması

Ultrasonik titreşim: Ultrasonikasyon, nanopartikül kümesini kırarak kararlı nanoakışkan üretimine yol açan bir tekniktir. Ultrasonik titreşim iki şekilde uygulanabilmektedir: a) dolaylı yöntem (ultrasonik banyo) ve b) doğrudan yöntem (prob sonikatörü). Bu iki teknik arasında, prob sonikatörü, parçacık kümesini kırma ve ortalama küme boyutunu düşürme açısından üstün sonuç sağlamaktadır [121].

Yüksek basınçlı homojenizatör: Yüksek parçalayıcı ve yüksek basınçlı homojenizatörler (Şekil 3.17.), kümeyi orijinal partikül boyutuna bölerek nanoakışkan stabilitesini iyileştirmek için etkili araçlar olarak kabul edilmektedir [122].



Şekil 3.17. Yüksek basınçlı homojenizatörün şematik gösterimi [123]

Yüzey aktif maddeler: Doğru yüzey aktif maddeyi seçmek, prosedürün en önemli kısımlarından biridir. Kullanılan yüzey aktif madde; anyonik, katyonik veya noniyonik olabilmektedir. Literatürde kullanılan popüler yüzey aktif maddeler sodyum dodesilsülfat (SDS), SDBS, tuz ve oleik asit, setiltrimetilamonyumbromid (CTAB), dodesil trimetilamonyum bromür (DTAB) ve sodyum oktanoat (SOCT), heksadesiltrimetilamonyumbromid (HCTAB), polivinilpirolidon olarak listelenmektedir. Sürfaktan ilavesinin dezavantajı, 60 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklardaki uygulamalar için sürfaktan ile nanopartiküller arasındaki bağın zarar

görebilmesidir. Bu nedenle, nanokışkan kararlılığını kaybedecek ve nanopartiküllerin çökmesi meydana gelecektir [124].

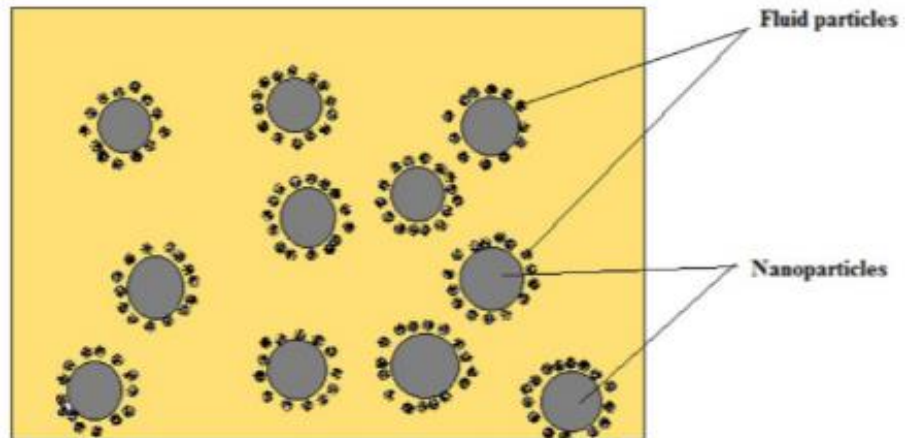
pH kontrol: Nanoakışkanın stabilitesi, doğrudan elektrokinetik özelliklerine bağlıdır. Yüksek yüzey yükü yoğunluğu sayesinde, güçlü itici kuvvetler iyi dağılmış bir süspansiyonu stabilize etmektedir [120].

3.3.3 Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler

Termal iletkenlik, özgül ısı kapasitesi, viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi nanoakışkanların termofiziksel özellikleri arasında gösterilmektedir ve nanoakışkan performansını belirlemede kullanılan parametreler arasındadır [110]. Farklı nanopartiküller, nanoakışkanlara ait parametreleri farklı boyutlarda değiştirmektedir.

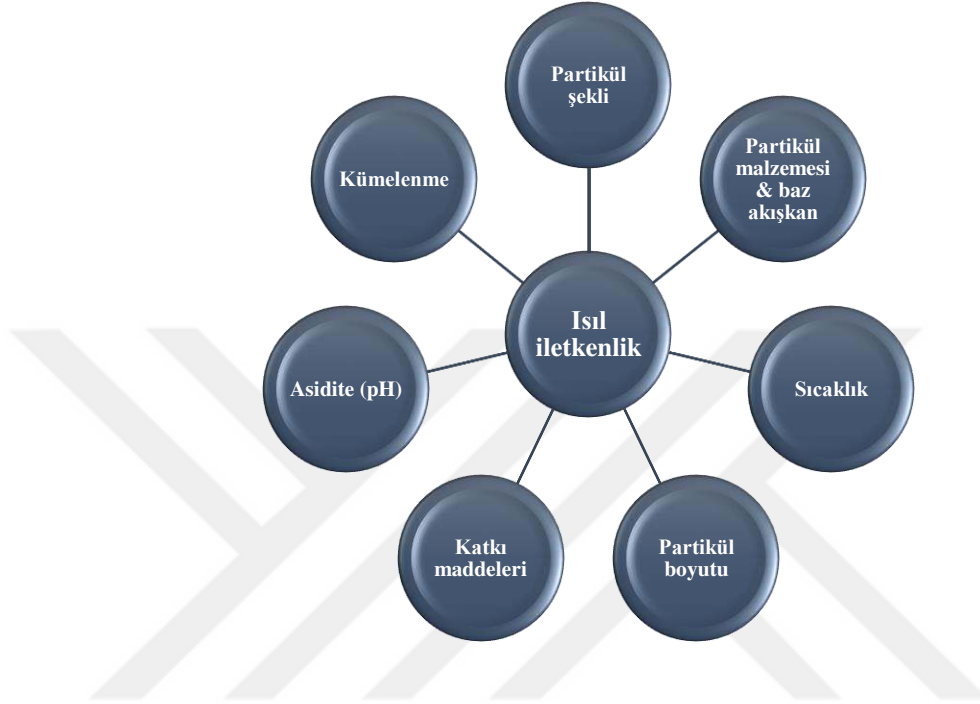
Termal iletkenlik

Nanopartiküllerin baz akışkana eklenmesi termal iletkenliği arttırmaktadır. Bunun nedeni, nanoakışkanın termal davranışını kontrol eden anahtar bir mekanizma olan Brownian hareketidir. İkinci neden, ara yüzey tabakasıdır (nano tabaka). Yani katı bir parçacık yüzeyine yakın sıvı moleküller katmanlı yapılar oluşturur (Şekil 3.18.). Bu katmanlı yapılar, nanopartiküller ile baz akışkan arasında bir termal köprü görevi görmektedir ve termal iletkenliği arttırmaktadır [86].



Şekil 3.18. Nanopartikül, bulk akışkan ve nanotabakaları içeren nanoakışkan yapısı [86]

Nanoakışkanların termal iletkenliği, kullanılan partikülün boyutu, şekli ve materyali, baz akışkanın cinsi ve sıcaklık gibi faktörlere (Şekil 3.19.) bağlıdır.



Şekil 3.19. Nanoakışkanlarda termal iletkenliği etkileyen faktörler

Sıcaklık salınım, kararlı hal paralel plaka ve geçici sıcak tel yöntemi gibi çeşitli tekniklerle nanoakışkanların ısı iletkenliği ölçülebilmektedir [86, 125].

Nanoakışkanın efektif ısı iletkenliğini hesaplamak için farklı parametreler temel alınarak bazı modeller elde edilmiştir. Aşağıda Tablo 3.8.’de bu modellere ait detaylar özetlenmiştir.

Tablo 3.8. Nanoakışkanlarda ısı iletkenliği hesaplamak için kullanılan modeller

Model	Denklem	Açıklama
Maxwell (1881) [126]	$k_{nf} = \frac{2k_f + k_p + \varphi(k_f - k_s)}{2k_f + k_s - 2\varphi(k_f - k_s)} k_f \quad (3.4)$	Nispeten büyük ve dairesel şekilli partiküller için kullanılmaktadır.
Bruggeman (1935) [127]	$k_{nf} = \frac{(3\varphi_p - 1) \frac{k_p}{k_f} + [3(1 - \varphi_p) - 1] + \sqrt{\Delta}}{4} k_f \quad (3.5)$ $\Delta = [(3\varphi_p - 1) \frac{k_p}{k_f} + 3(1 - \varphi_p) - 1]^2 + 8 \frac{k_p}{k_f} \quad (3.6)$	Brownian hareketini de dikkate alan, nispeten büyük parçacıklar için geliştirilmiş bir denklemdir.
Hamilton-Crosser (1962) [128]	$k_{nf} = \frac{k_p + (n - 1)k_f + (n - 1)(k_f - k_s)\varphi}{k_p + (n - 1)k_f + (k_f - k_s)\varphi} k_f \quad (3.7)$	Bu denklemde, parçacık şeklinin ısı iletkenliğine olan etkisi de göz önüne alınmıştır.
Jeffrey (2003) [129]	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 3\beta\varphi + (3\beta^2 \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3 + (\alpha + 2)}{16(2\alpha + 3)} + \frac{3\beta^4}{64} + \dots)\varphi^2 \quad (3.8)$	Parçacıkların birbirleriyle olan etkileşimini de içermektedir.
Yu-Choi (2003) [130]	$k_{nf} = \frac{k_{pe} + 2k_f + 2(k_{pe} - k_f)(1 - \eta)^3\varphi}{k_{pe} + 2k_f - 2(k_{pe} - k_f)(1 - \eta)^3\varphi} k_f \quad (3.9)$	Katı-sıvı arayüzeyindeki nanotabanın ısı iletkenliğe etkisinin olduğunu göz önünde bulundurmuştur.

Viskozite

Termal iletkenliğin yanı sıra viskozite termal sistemler için önemli bir başka parametredir. Çünkü ısı transfer uygulamalarında basınç düşüşünün ve pompalama

gücünün viskozite ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Kullanılan baz akışkanın viskozitesi, parçacık yükü, nanaopartiküllerin türü ve boyutu nanoakışkanın viskozitesini etkilemektedir [85].

Genel olarak, partiküllerin hacim konsantrasyonu arttıkça viskozite artmaktadır. Aynı hacim konsantrasyonuna ve nanopartikül materyaline sahip ancak farklı boyutlara sahip süspansiyonlarla ilgili çalışmalar, partikül boyutu azaldıkça süspansiyonun viskozitesinin arttığını göstermiştir. Bu davranış, akıştaki parçacıklarla birlikte hareket eden nanoparçacık arayüzleri boyunca sıvının yapılandırılmış katmanlarının oluşumu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. "Etkili hacim konsantrasyonu" (hareketsiz sıvı ve nanopartiküller) daha küçük nanopartikül süspansiyonlarında daha yüksektir ve bu da daha yüksek viskoziteye neden olmaktadır. Bu nedenle, mikron partikül boyutlarında ihmal edilebilen arayüzey etkilerinin katkıları, nanopartikül süspansiyonları için çok önemli hale gelmektedir. Isı transferinden fayda sağlamak için, daha yüksek termal iletkenliğe ve daha düşük viskoziteye sahip daha büyük nanopartiküllerden oluşan nanoakışkanların kullanılması önerilmektedir [88].

Tablo 3.9. Nanokışkanların viskozitesi için en uygun modeller [131]

Model	Denklem	Açıklama
Einstein modeli	$\mu_r = \frac{\mu_{\eta f}}{\mu} = 1 + \eta\phi \quad (3.10)$	$\phi < 1\%$ olduğunda ve parçacıklar arasında etkileşim olmadığında uygulanabilir.
Brinkmann modeli	$\mu_e = \left(\frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \right) \mu_f \quad (3.11)$	Nanoakışkanların viskozite hesaplamalarında sıklıkla kullanılan bu model, daha yüksek konsantrasyonlarda ki süspansiyonlar için geliştirilmiştir.

Batchelor modeli	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2 \quad (3.12)$	Nanopartiküllerin Brownian hareketi ve aralarındaki etkileşim bu modelde dikkate alınmıştır. Einstein modelinin bir uzantısıdır.
Ward modeli	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2 + (\eta\phi)^3 \quad (3.13)$	%35'e kadar olan ϕ için üstel bir modeldir.
Renewed modeli	$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu} = 1 + \eta\phi_e + (\eta\phi_e)^2 + (\eta\phi_e)^3 \quad (3.14)$	Sıvı tabakalamanın etkisi, ϕ hesaplanırken dikkate alınmıştır. ϕ , ϕ_e ile değiştirilir

Nanoakışkanların viskozitesi, ısı eşanjörleri veya soğutma gibi termal cihazlarda/sistemlerde nanokışkanların uygulamaları için önemli bir taşıma özelliğidir. Bununla birlikte, termal iletkenliğin aksine, nanoakışkanların viskozitesi için deneysel verilerin az olduğu dikkat çekmektedir [132].

Li ve ark., 2002 [133], CuO nanopartikül ve su ile oluşturdukları nanoakışkanın viskozitesini bir kılcal viskometre kullanarak ölçmüşlerdir. Sonuçlar, nanoakışkanların görünür viskozitesinin artan sıcaklıkla azaldığını göstermektedir.

Wei Yu ve grubu, 2009 [134] hazırladıkları ZnO nanopartikülleri içeren etilen glikol bazlı nanokışkanın termal iletkenlik ve viskozite dahil termal taşıma özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, geliştirilmiş termal iletkenlik değerinin %5 hacim için %26.5'e kadar çıktığını göstermişlerdir. Buna ek olarak, ZnO-EG nanoakışkanının düşük hacim konsantrasyonlarında Newtonian davranış sergilediğini göstermişlerdir.

Chandrasekar ve ark., 2010 [131] ise Al₂O₃/H₂O nanoakışkanın etkili termal iletkenliği ve viskozitesi hakkında yaptıkları çalışmada viskozite artışının, termal

iletkenlikteki artıştan önemli ölçüde daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca nanokışkanların ısı iletkenliğinin artan partikül hacmi konsantrasyonu ile doğrusal olarak önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir.

Yoğunluk

Nanoakışkanların yoğunluğu büyük ölçüde içerisinde kullanılan nanopartiküle bağlıdır ve nanopartikül konsantrasyonu arttıkça nanoakışkanın yoğunluğu da artmaktadır. Nanopartiküllerin şekli, boyutu, zeta potansiyeli gibi diğer parametreler nanoakışkanların yoğunluğunu etkilemezken baz akışkanın da nanoakışkanların yoğunluğunda önemli bir rol oynadığı bilinmektedir [135]. Nanoakışkan yoğunluk denklemi aşağıdaki gibidir [136]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \quad (3.15)$$

Burada ρ_{nf} , nano akışkanın yoğunluğu, ρ_{np} , partikülün yoğunluğu, φ , partikül hacmi konsantrasyonu ve ρ_{bf} , baz sıvının yoğunluğudur.

Özgöl ısı

Özgöl ısı, bir maddenin bir birim kütlesinin sıcaklığını bir derece yükseltmek için gereken enerji miktarıdır. Genel olarak özgöl ısı kapasitesi, Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) [137] ve Modüler Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (MDSC) kullanılarak ölçülmektedir [138].

Bazı araştırmacılar, daha yüksek özgöl yüzey enerjisi, nanopartiküller ve çevreleyen sıvı moleküller arasında artan ara yüzey termal direnci, nanopartiküllerin etrafında yarı katı sıvı katmanların oluşumu gibi özgöl ısı kapasitesinin artırılması için bazı mekanizmalar önermektedir [138]. Nanoakışkan özgöl ısı denklemi aşağıdaki gibidir [136]:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_{bf} + \varphi(\rho c_p)_{np} \quad (3.16)$$

$$c_{p_{nf}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho c_p)_{bf} + \varphi(\rho c_p)_{np}}{\rho_{nf}} \quad (3.17)$$

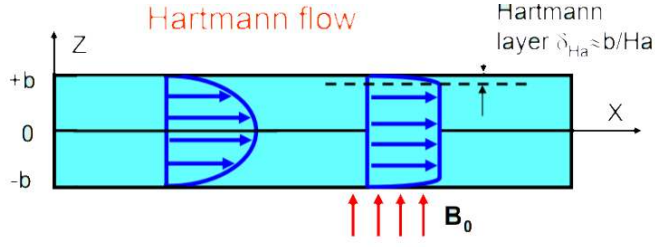
Yüzey gerilim

Yüzey gerilimi, iki karışmayan sıvı arasındaki ara yüzde gelişen ve ara yüz düzleminde yer alan moleküller arasındaki kuvvettir. Termal akışkanların yüzey gerilimi (ST), termal sistemlerin performansını analiz ederken büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu fiziksel özellik, yüzey ıslanabilirliğini ve kabarcık büyümesini etkilemektedir [139]. Saf sıvıların yüzey gerilimi üzerine çokça literatür varken nanoakışkanların yüzey gerilimi üzerine çok az çalışma bulunmaktadır [140].

Kumar ve Milanova, 2009 [141], deiyonize (DI) sudaki tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) süspansiyonlarının yüzey gerilimini yüzey aktif NaBDS (bis (1-dodesenil süksinamik asit) sodyum tuzu) ile kabarcık basıncı yöntemini kullanarak ölçtüler. Elde ettikleri sonuçlar, nanoakışkanların yüzey geriliminin baz akışkanınkinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Hem nanoakışkanın hem de baz akışkanın yüzey gerilimi, yüzey aktif maddenin konsantrasyonundaki bir artışla azalmıştır.

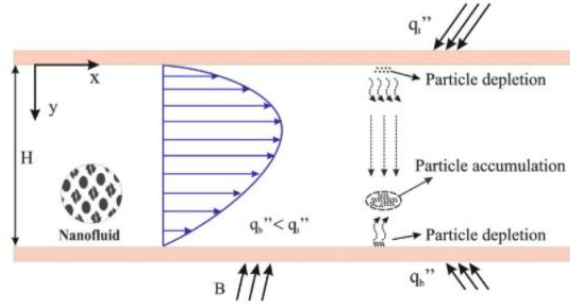
3.4 Manyetohidrodinamik (MHD) Akış

Manyetohidrodinamik akış, iki paralel katı düzlem arasındaki boşlukta sürekli akışta olan elektriksel iletkenliğe sahip akışkanlara bir manyetik alan uygulandığında meydana gelen akış biçimidir [142]. Bu, sıradan akışkan dinamiğindeki Poiseuille akışının en basit analogudur [143].



Şekil 3.20. Manyetik alan etkisi altında kanal içinde hız profili [144]

MHD etki, harici bir manyetik alanın etkisi altında akan iletken bir sıvının hareketini tanımlayan fiziksel bir fenomendir (Şekil 3.20) [145]. MHD, elektromanyetizma ve hidrodinamiğin bir kombinasyonudur ve bu durum, hidrodinamiğin zorluklarının yanında elektromanyetizmanın zorluklarını da beraberinde getirmektedir [146].



Şekil 3.21 Manyetik alan varlığında paralel bir plaka kanalı içinde nanopartikül hareketi [147]

Sıvı akışının ($v \rightarrow$) ve manyetik alanın büyüklüğü ve yönü, MHD etkisinin büyüklüğünü ve sonuçtaki yönünü doğrudan etkiler ve indüklenen Hall Etkisi voltajlarında bir varyans yaratır. Aşağıda, Maxwell denklemlerinin sıvı akışı ile birleştirilmiş türetilmesi yoluyla MHD teorisinin bir sunumu bulunmaktadır [145]. Manyetohidrodinamik denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [148].

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -gradP + \rho \cdot g + \eta \nabla^2 u + (\vec{\delta} \times \vec{B}) \quad (3.18)$$

$$rot(\overline{ux\vec{B}}) + \frac{1}{\gamma\rho} \nabla^2 B = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad (3.20)$$

$$\vec{\delta} = \gamma \cdot [\vec{E} - (\vec{u} \times \vec{B})] \quad (3.21)$$

Denklemlerde u , akışkanın akış hızını (m/s), η , akışkanın dinamik viskozitesini (kg.s/m²), ρ , akışkanın yoğunluğunu (kg/m³), γ , akışkanın özgül elektriksel iletkenliğini (1/Ohm.m), δ , elektrik akım yoğunluğunu (A/m²), ∇^2 , Nabla operatörünü, t , zamanı (s), B , manyetik alan indüksiyonunu (Wb), g , yerçekimi ivmesini (m/s²) ifade etmektedir. Bu denklemin çözümü için sistemde bazı kabuller yapmak gerekmektedir.

MHD, güç jeneratörleri, pompalar, biyomedikal sensörler, aktüatörler, güneş rüzgarları gibi pek çok alanda uygulama bulmaktadır [149].

Çarpan jet durumunda manyetik alan etkileri sistemde var olabilir ya da ısı transferi ve akış etkilerini arttırmak için uygulanabilir. Isı transferi ve akışı daha etkili kullanmak için baz akışkanlara göre daha verimli olan nanoakışkanlar kullanılarak manyetik alan etkileri arttırılabilir. Bu tez çalışmasında da bu amaçlar doğrultusunda MHD etkisi Cu-su nanoakışkanı ile birlikte çarpan jetlerde incelenmiştir.

4.2 Genel Denklemler ve Sınır Koşulları

İki boyutlu, sıkıştırılamaz, laminar ve kararlı durum akışı için kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri şu şekilde ifade edilebilir [150]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.1)$$

$$\rho_{nf}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{nf} + \rho_{nf} f_b^f \quad (4.2)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha_{nf} \nabla^2 T \quad (4.3)$$

Burada f_b^f , $\boldsymbol{\sigma}_{nf}$, $\mathbf{u}_g$ birim hacim başına vücut kuvvetini, gerilim tensörünü ve hareketli koordinatın hızını temsil etmektedir. Momentum denklemlerindeki manyetik alan nedeniyle Lorentz kuvvetleri şu şekilde ifade edilebilir [151]:

$$F_{L,X} = \Gamma_{nf} B_0^2 (v \sin(\gamma) \cos(\gamma) - u \sin^2(\gamma)) \quad (4.4)$$

$$F_{L,Y} = \Gamma_{nf} B_0^2 (u \sin(\gamma) \cos(\gamma) - v \cos^2(\gamma)), F_b = \beta_{nf} g(T - T_c) \quad (4.5)$$

Akışkan-yapı etkileşim modelinin katı alan denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [150].

$$\rho_s \mathbf{a}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s^b \quad (4.6)$$

Burada $\mathbf{a}_s$, $\mathbf{f}_s^b$, $\boldsymbol{\sigma}_s$ sırasıyla yerel ivmeyi, harici olarak uygulanan vücut kuvvetini ve katı gerilim tensörünü belirtmektedir. Denklemleri temsil eden nanoakışkan özellikleri sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir [150]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \quad (4.7)$$

Nanoakışkanın özgül ısısı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [85]:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_{bf} + \varphi(\rho c_p)_{np} \quad (4.8)$$

Burada μ_{nf} , μ_{bf} , φ sırasıyla nanoakışkanın dinamik viskozitesi, baz akışkanın dinamik viskozitesi ve hacim partikül konsantrasyonunu ifade etmektedir. Nanoakışkanın dinamik viskozitesi şu şekilde ifade edilebilir [85]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 - \varphi)^{-0.25} \quad (4.9)$$

Burada k_{nf} , k_f , k_{np} , φ sırasıyla nanoakışkanın termal iletkenlik katsayısı, baz akışkanın termal iletkenlik katsayısı, nanopartikülün termal iletkenlik katsayısı ve hacim partikül konsantrasyonunu ifade etmektedir. Nanoakışkanın termal iletkenlik katsayısı şu şekilde ifade edilebilir [85]:

$$k_{nf} = k_f \frac{(k_{np} + 2k_f) - 2\varphi(k_f - k_{np})}{(k_{np} + 2k_f) + \varphi(k_f - k_{np})} \quad (4.10)$$

Tablo 4.1. Baz akışkanın ve nanopartikülün termofiziksel özellikleri

Termofiziksel özellikler	Su	Bakır
Rho (kg/m ³)	998.2	8933
c _p (J/kgK)	4182	385
K (W/mK)	0.6	401
σ _s	0.05	1.11x10 ⁻⁴
ν	8.99x10 ⁻⁴	-

4.3 Çözüm Yöntemi

Problem çözümünde kullanılan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü, Galerkin ağırlıklı artıklar sonlu elemanlar yöntemi kullanan Comsol Multiphysics 5.3 paket programı kullanılarak analizler elde edilmiştir.

4.4 Sonlu Elemanlar Analizi

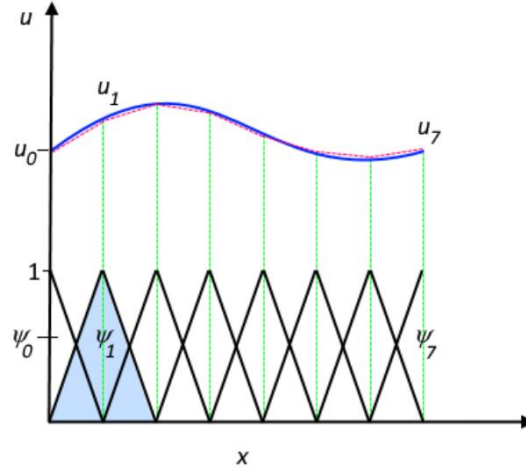
Uzay ve zamana bağlı problemler için fizik yasalarının tanımı genellikle kısmi diferansiyel denklemler (KDD) olarak ifade edilir. Geometrilere ve problemlerin büyük çoğunluğu için bu KDD'ler analitik yöntemlerle çözülmeye uygun değildir. Bunun yerine, ayrıklaştırmalara dayalı olarak denklemlerin bir yaklaşımı oluşturulabilir. Bu ayrıklaştırma yöntemleri, sayısal yöntemler kullanılarak çözülebilen sayısal model denklemleri ile KDD'lere yaklaşır. Sayısal model denklemlerinin çözümü ise, KDD'lere gerçek çözümün bir yaklaşımıdır. Bu tür yaklaşımları hesaplamak için sonlu eleman yöntemi (FEM) kullanılır.

Örneğin, bir KDD'de bağımlı değişken olabilen bir u fonksiyonunu (sıcaklık, elektrik potansiyeli, basınç, vb.) alalım. u fonksiyonuna, aşağıdaki ifadelerle göre temel fonksiyonların lineer kombinasyonları kullanılarak u_h fonksiyonu ile yaklaştırılabilir:

$$u \approx u_h \quad (4.11)$$

$$u_h = \sum u_i \psi_i \quad (4.12)$$

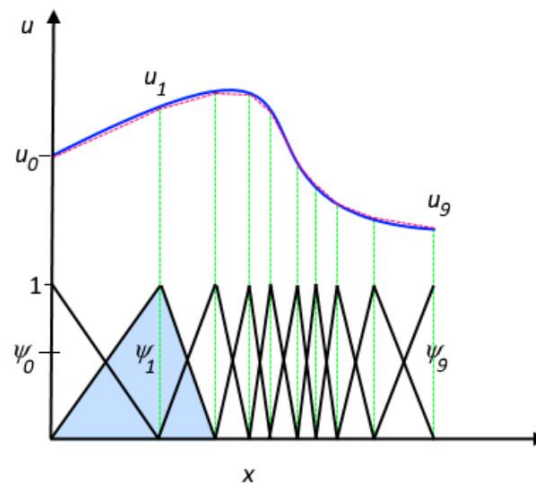
Burada ψ_i , temel fonksiyonları, u_i ise u 'ya u_h ile yaklaşan fonksiyonların katsayılarını gösterir. Aşağıda bir boyutlu olarak ele alınan Şekil 4.2. problem için bu prensibi göstermektedir. u , örneğin, homojen olmayan şekilde ısıtılmış bir çubuğun uzunluğu (x) boyunca sıcaklığı temsil etsin. Burada, doğrusal temel fonksiyonlar, ilgili düğümlerinde 1 ve diğer düğümlerde 0 değerine sahiptir. Bu durumda, u fonksiyonunun tanımlandığı x eksenini bölümleri boyunca yedi öge vardır.



Şekil 4.2. Çubuk uzunluğu boyunca(x) sıcaklık değişiminin eşit aralıklarla yaklaşık çözümü ve gerçek çözümü

Şekil 4.2. u fonksiyonu (düz mavi çizgi), u_h (kesikli kırmızı çizgi) ile yaklaşık fonksiyonu ifade eder. Burada u_h değerini gösteren çizgiler, lineer temel fonksiyonların (ψ_i) birleşiminden oluşmaktadır. Katsayılar u_0 ile u_7 arasında gösterilir.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanmanın bir avantajı da ayrıklaştırma yöntemlerinde istenilen özgürlüğü sağlamasıdır. Yukarıdaki şekilde parçalar x eksenini boyunca eşit dağılmıştır. Aşağıdaki şekilde parçalar x eksenini boyunca farklı aralıklarda bulunmaktadır.



Şekil 4.3 Çubuk uzunluğu boyunca(x) sıcaklık değişiminin farklı aralıklarla yaklaşık çözümü ve gerçek çözümü

Şekil 4.3 u fonksiyonu (düz mavi çizgi), u_h (kesikli kırmızı çizgi) ile yaklaşık fonksiyonu ifade eder. Burada u_h değerini gösteren çizgiler, lineer temel fonksiyonların (ψ_i) birleşiminden oluşmaktadır. Katsayılar u_0 ile u_9 arasında gösterilir.

Eldeki soruna bağlı olarak, doğrusal işlevler yerine başka işlevler seçilebilir.

Fizik yasaları genellikle matematik dilinde ifade edilir. Örneğin, enerjinin korunumu, kütleinin korunumu ve momentumun korunumu gibi korunum yasalarının tümü kısmi diferansiyel denklemler (KDD'ler) olarak ifade edilebilir. Diferansiyel denklemler, bağımsız bir değişkendeki (x, y, z, t) bir değişikliğe göre bağımlı bir değişkendeki küçük bir değişikliği belirleyen ifadeleri içerir. Bu küçük değişiklik, bağımsız değişkene göre bağımlı değişkenin türevi olarak da adlandırılır.

Diferansiyel denklemler, bağımsız bir değişkendeki (x, y, z, t) bir değişikliğe göre bağımlı bir değişkendeki küçük bir değişikliği belirleyen ifadeleri içerir. Bu küçük değişiklik, bağımsız değişkene göre bağımlı değişkenin türevi olarak da adlandırılır. Örneğin ısı kaynağına bağlı olarak sıcaklığı zamanla değişen bir katıya ait enerjinin korunum denklemi aşağıda ifade edilmiştir.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = g(T, t) \quad (4.13)$$

Bu eşitlikte yoğunluğu ρ , C_p ise ısı kapasitesini ifade etmektedir. Sıcaklık, T bağımlı değişkendir ve zaman, t bağımsız değişkendir. Denklem, sıcaklık ve zamana göre değişen bir ısı kaynağını tanımlayabilir ($T=f(t)$). Denklem, bir bağımsız değişkenin (t) türevleri cinsinden ifade edilen diferansiyel bir denklemdir. Bu tür diferansiyel denklemler, adi diferansiyel denklemler (ADF'ler) olarak bilinir.

Bir ısı kaynağına daha yakın konumdaki katı içindeki sıcaklık, diğer bölgelere göre nispeten yüksek olabilir. Bu gibi durumlarda, enerjinin korunumu hem zamana hem de konuma (x) bağlı ifade eden bir ısı transferi denklemiyle aşağıda verilmiştir.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot q = g(T, t, x) \quad (4.14)$$

Bir önceki denklemde olduğu gibi T bağımlı değişkendir, x (x = (x, y, z)) ve t ise bağımsız değişkenlerdir. Kartezyen koordinat sistemi için q' nun sapması şu şekilde tanımlanır:

$$\nabla \cdot q = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (4.15)$$

Bir katıdaki ısı akısı, aynı zamanda Fourier yasası olarak da adlandırılan, iletim yoluyla ısı akısının ilişkisi ile tanımlanabilir:

$$q = -k \nabla T \rightarrow \nabla q = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (4.16)$$

$$\rho C_p + \nabla \cdot (-k \nabla T) = g(T, t, x) \quad (4.17)$$

Burada türevler t, x, y ve z cinsinden ifade edilir. Bir diferansiyel denklem, birden fazla bağımsız değişkenin türevleri cinsinden ifade edildiğinde, bu, kısmi diferansiyel denklem (KDD) olarak adlandırılır. KDD'leri analitik olarak çözmek yerine, alternatif bir seçenek olarak, sayısal model denklemlerini çözmek için yaklaşık sayısal çözümler aramaktır. Sonlu elemanlar yöntemi tam olarak bu tür bir yöntemdir. Yukarıda bahsedilen termal enerji korunumuna benzer şekilde, akışkan dinamiğinin temelini oluşturan momentum ve kütle korunumu için denklemleri türetmek mümkündür.

Bir soğutucu içindeki sıcaklık dağılımının kararlı hal altında zamana bağlı türevinin sıfır olduğu durum ve model alanı için alan denklemini Ω ile tanımlanıp denklemini yeniden düzenlersek:

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = g(T, x) \quad \Omega \quad (4.18)$$

Bir sınır boyunca sıcaklığın ($\partial\Omega_1$) bilindiği buna ek olarak diğer sınırlar için ısı akısının ($\partial\Omega_2$) ve kalan sınırlar için ısı akısının ($\partial\Omega_3$) sıfır olduğu biliniyorsa bu sınırlardaki sınır koşulları aşağıdaki denklemlere dönüşmektedir:

$$T = T_0 \quad \Omega_1 \quad (4.19)$$

$$(-k\nabla T)n = h(T - T_{amb}) \quad \partial\Omega_2 \quad (4.20)$$

$$(-k\nabla T)n = h(T - T_{amb}) \quad \partial\Omega_3 \quad (4.21)$$

Burada h , ısı transfer katsayısını ve T_{amb} , ortam sıcaklığını gösterir. Sınır yüzeyine giden dışa doğru birim normal vektör, n ile gösterilir. Sonraki adım, denklemin her iki tarafını da bir test fonksiyonu ile çarpılıp etki alanı boyunca (φ) integrali alındığında denklem aşağıda verilmiştir:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot (-k\nabla T) \varphi dV = \int_{\Omega} g \varphi dV \quad (4.22)$$

Bu denklemde aralıktaki her düğüm için gösterilmesine zayıf gösterim adını alır. Yukarıdaki denklem ayrıklaştırılmış her bir nokta için hesaplanmasıyla yaklaşık bir T_h değerine ulaşılır ($T \approx T_h$). Bu şekilde bütün noktadaki temel fonksiyonların ψ_i toplamı yaklaşık çözüm olarak ifade edilebilir.

$$T_h(x) = \sum_i T_i \psi_i(x) \quad (4.23)$$

Eşitliğin ayrıklaştırılmış versiyonu her test fonksiyonu ψ_j için şu şekildedir:

$$\sum_i T_i \int_{\Omega} k \nabla \psi_i \cdot \nabla \psi_j dV + \sum_i \int_{\partial\Omega} -k T_i \nabla \psi_i \cdot n \psi_j dS = \int_{\Omega} g \left(\sum_i T_i \psi_i \right) \psi_j dV \quad (4.24)$$

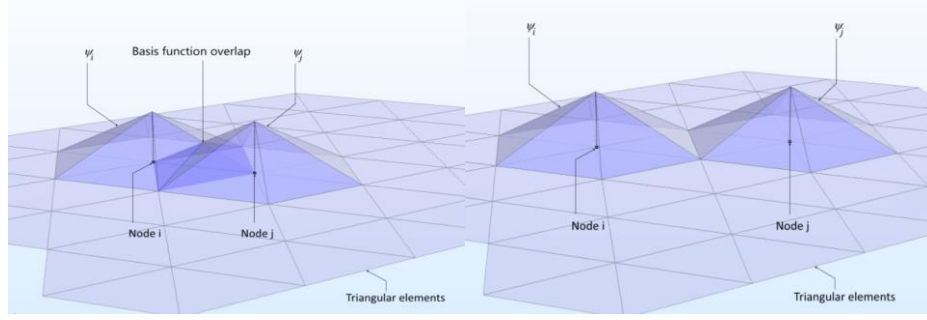
Buradaki bilinmeyenler, $T(x)$ fonksiyonunun yaklaşımındaki T_i katsayılarıdır. Sonlu boyutlu fonksiyon uzayıyla aynı boyutta bir denklem sistemi oluşturur. Eğer n sayıda test fonksiyonu ψ_j kullanılırsa, j 1'den n 'e giderse n sayıda

denklem sistemi elde edilir. Sistem ayrıştırıldığında ve sınır koşulları uygulandığında, aşağıdaki ifadeye göre bir denklem sistemi elde edilir:

$$AT_h = b \quad (4.25)$$

Burada T bilinmeyenlerin vektörüdür, $T_h = \{T_1, \dots, T_i, \dots, T_n\}$ ve A , bileşenleri A_{ji} içindeki her denklem j 'deki T_i katsayılarını içeren bir $n \times n$ matrisidir. Denklemin sağ tarafı, 1'den n 'ye kadar olan boyutların bir vektörüdür. A , sistem matrisi olarak ifade edilir. Kaynak sıcaklığına göre doğrusal değilse veya ısı transfer katsayısı sıcaklığa bağlıysa, denklem sistemi de doğrusal değildir ve vektör b bilinmeyen T_i katsayılarının doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Sonlu eleman yönteminin faydalarından biri, test ve temel fonksiyonları seçme avantajıdır. Çok küçük bir geometrik bölgede desteklenen test ve temel fonksiyonları seçmek mümkündür. İntegrallerin tümü i ve j fonksiyonlarının, ψ_j ve ψ_i fonksiyonlarının örtüştüğü çok sınırlı bölgeler dışında her yerde sıfırdır. Bazı çakışma bölgelerinde integraller sıfıra eşit olmaz bu nedenle artık fonksiyonlar ağırlık fonksiyonuyla çarpılarak sıfıra eşitlemek temel amaçtır bu yöntemle ağırlıklı artıklar yöntemi denir.

İki boyutlu bir geometrik alan olduğunu ve x ve y 'nin doğrusal fonksiyonlarının seçildiğini varsayalım, her biri bir i noktasında 1, ancak diğer k noktalarında sıfır değerine sahip olsun. İki boyutlu etki alanını üçgensel bölgeler kullanarak ayırklaştırmak ve üçgen bir ağda iki komşu düğüm i ve j için iki temel fonksiyonun (test veya şekil fonksiyonları) nokta oluşumlarını göstermektedir. Aynı bölgeyi paylaşan iki temel fonksiyonun birbiriyle örtüşmesi sonucu çakışma oluştururlar. Eğer temel fonksiyonlar örtüşmez yani çakışmazsa, denklem integralleri sıfır değerini alır.



Şekil 4.4. Çakışan ve çakışmayan üçgensel bölgeler kullanarak ayırıklaştırmak

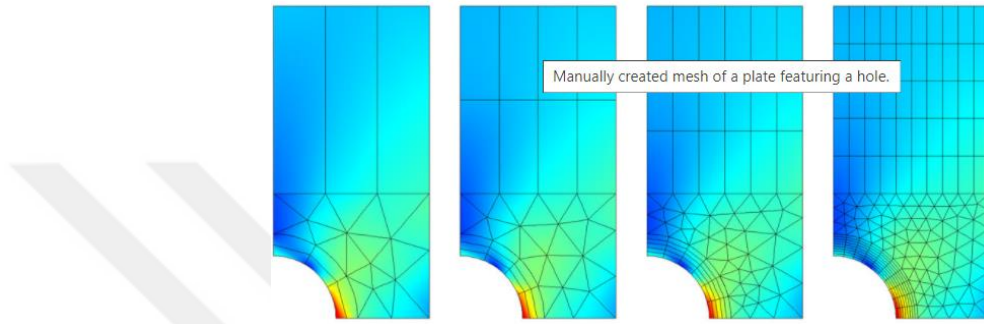
Bu bilgiler eşliğinde çakışma miktarımızı en aza indirdiğimizde artık fonksiyonlarımız o kadar azalacaktır. Artık fonksiyonların azalması sebebiyle gerçeğe en yakın yaklaşık çözüm elde edilecektir. Ağ yapısının sıklığı ve şekle uygunluğuyla bu çakışmaları en aza indirmek mümkündür [152].

Yapılan çalışmada Galerkin ağırlıklı artıklar yöntemi kullanan Multiphysics 5.3 ile çözümler gerçekleştirilmiştir.

4.5 Cmsol Multiphysics

Cmsol Multiphysics 5.3 programı gelişmiş sayısal modellemeler yaparak, fiziksel problemlerin modellenmesi, çözümü ve simülasyonunu gerçekleştiren ticari bir paket programdır. Mühendislik alanında karmaşık problemlerin çözümü bu program sayesinde yapılabilmektedir. Bu problemlerin yapısı elektrik, mekanik, termodinamik, ısı, matematiksel ve kimyasal gibi çok çeşitli uygulama alanlarıyla ilgili olabilir. Çözücü bu modüllerde tek başına ya da birlikte olan ilişkileriyle birlikte çözüm sağlayabilir. Cmsol Multiphysics 5.3 model ağacı penceresi içinde yapılacak olan simülasyona ait alt pencerelerde çözüm aşamalarının tümüyle sunulmaktadır. Bu alt pencereler içerisinde model geometrisi, malzeme yapısı, denklem düzenlemeleri, ağ yapısı, sınır koşulları, çözücü yöntemleri, sonuçlar ve sonuçların istenilen formatlarda görüntülenmesini sağlayan birçok alt başlığa yer verilmektedir. Cmsol Multiphysics 5.3 kendi kütüphanesinde birçok malzeme ve denklem barındırmaktadır fakat kullanıcının parametrik olarak elde edeceği yahut bulamadığı, düzenlemek istediği değişkenler için tanımlamalar yaparak eklentiler yapmasına izin vermektedir.

Comsol Multiphysics 5.3 programı ağ yapısı oluşturmada kullanıcılara otomatik ağ oluşturma ya da kullanıcı kontrollü ağ yapısı oluşturmaya izin vermektedir. İki boyutlu modeller için, üçgen ve dörtgen elemanların bir kombinasyonu kullanılabilir. Üç boyutlu modeller söz konusu olduğunda, dört yüzlü, altı yüzlü, üçgen prizmatik ve piramidal elemanların bir kombinasyonu kullanılabilir. Aşağıdaki şekil 4.5.'te farklı mesh yapılarına ait bir görüntü verildi.



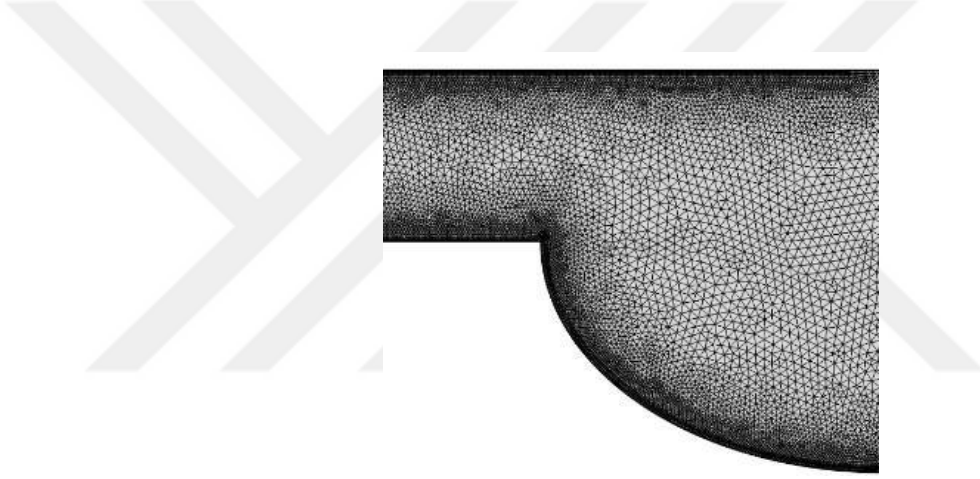
Şekil 4.5. Comsol programında özelleştirilmiş ağ yapıları

Programda çözüm gerçekleştikten sonra sonuçlar geometri üzerinde akış çizgileri, eş sıcaklık eğrileri ya da sayısal değerler çizgi, grafik, tablo tipi gibi istenilen yapıda gösterilmektedir [152].

Tez çalışmasında kullanılan eliptik geometri Comsol Multiphysics 5.3 programında çizilmiş parametreler kısmında birbirine bağlı boyutlar tanımlanmıştır. Malzeme seçimi ve fiziksel özellikler de bu şekilde malzeme kütüphanesinden seçilmiş, bakır-su nanoakışkanına ait termofiziksel özellikler ve gerekli denklemler parametreler kısmına eklenmiştir. Çözümde iki boyutlu eliptik geometride akışkan akışı modülünün alt seçeneği olan laminar akış ve ısı transferi alt seçeneği olan akışkanlarda ısı transferi, katı sıvı yüzey etkileşim modelleri seçilerek çoklu fiziksel çözüm yaptırılmıştır. Sonuçlar kısmında hız profilleri akış çizgileri (streamlines) olarak, sıcaklık değişimi ise eş sıcaklık eğrileri olarak (isotherms) alınmıştır. Yerel ısı transferi grafiği için bir boyutlu çizgi grafiği (1D line graph) ve ortalama ısı transferi hesaplamaları için de ortalama tablosu (line average) kullanılmıştır.

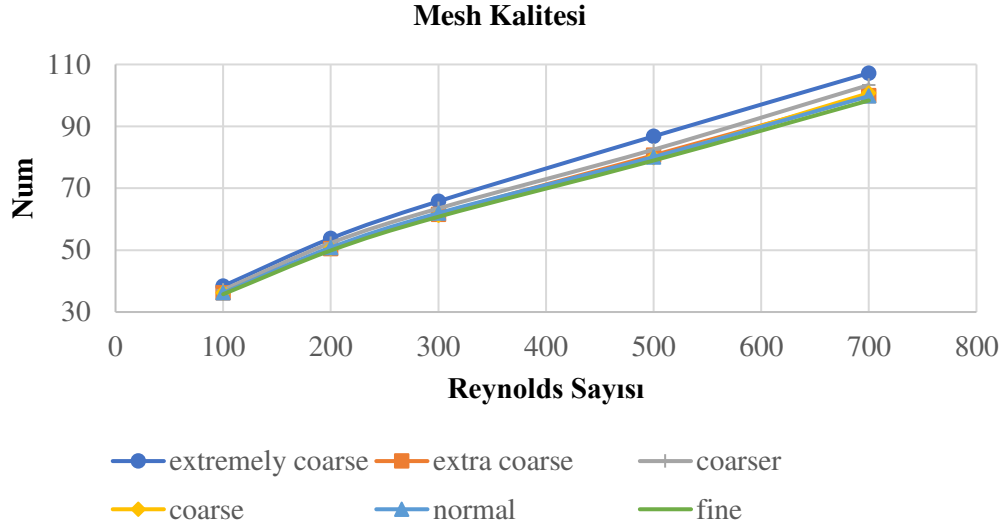
4.6 Ağ yapısı

Ağ yapısı iyi bir sonlu elemanlar analizi için oldukça önemli olup, bu noktada başlayan eksiklik hatalara sebebiyet verir. Ağ yapısı problemin gerçek çözüme yakınsamasında önemli fiziksel kısıtlardan birini oluşturmaktadır. Mevcut çalışmada üçgensel ağ yapısı tercih edilmiş olup sınır bölgelerinde ağ yapısı sıklaşmaktadır. Karmaşık geometriye sahip olmayan eliptik yüzeye sahip çalışmada üçgensel ağ yapılarının çakışabileceği sınır bölgelerde ağ bütünlüğünü tamamlamak ve çakışmaları engellemek adına dörtgensel ağ yapıları olabilmektedir. Aşağıdaki şekil 4.6.'da problem geometrisinin ağ yapısına dair kesit verilmiştir. Ağ yapısı 213.000 elementten oluşmakta ve çok iyi yapıdadır (extremely fine).



Şekil 4.6. Problem geometrisinin ağ yapısına dair kesit

Mesh yapısı, eleman sayısı, Reynols sayısı ve Nusselt değerlerinin karşılaştırmalı tablosu aşağıda Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Nusselt ve Reynolds numaralarına göre oluşturulan mesh kalite grafiği

Tablo 4.2. Ağ kalitesinin ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisi

Ağ Yapısı Kalitesi	Eleman Sayısı	Num
Extremely coarser	4481	86.781
Extra coarse	5443	80.660
Coarser	6917	82.479
Coarse	10100	79.811
Normal	14461	80.087
Fine	22227	78.954

Ağ kalitesinin ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisi Şekil 4.8'de ve Tablo 4.2.'de gösterilmiştir. Şekil 4.8. ortalama Nusselt sayısı artış sayısının Reynolds sayısındaki artışa bağlı olduğunu göstermektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

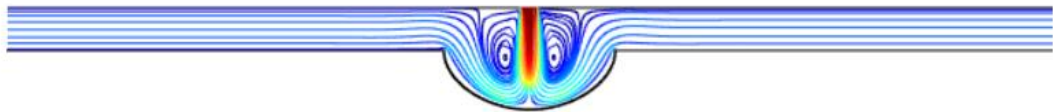
Analiz çalışmasıyla nano parçacık hacim fraksiyonu (0.01 ile 0.05 arasında), Hartmann sayısı (0 ile 20 arasında), Reynolds sayısı (100 ile 700 arasında), elastisite modülü ($1e4$ ile $1e9$ arasında), ağ etkisi gibi çeşitli parametrelerin etkileri sayısal olarak araştırıldı. Sonuçlar nanopartikül hacim fraksiyonu, Hartmann sayısı, elastisite modülü, Reynolds sayısı için akış çizgileri, eş sıcaklık eğrileri ve Nusselt sayı dağılımları aşağıda sunuldu.

5.1 Araştırma Bulguları

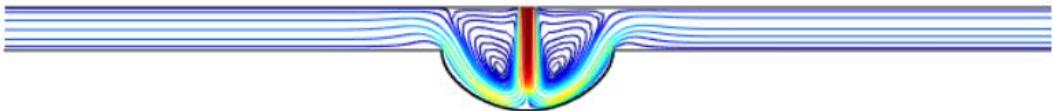
5.1.1 Reynolds Sayısının Etkisi

Sabit hacim oranı ve Hartmann değerleri için ($\phi = 0.03$, $Ha = 5$) akış çizgilerinin dağılımı (Reynolds sayısı 100'den 700'e kadar) Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.

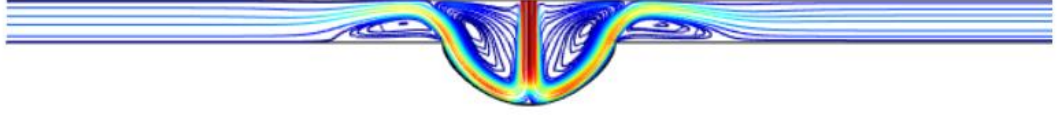
Reynolds sayısı arttıkça, duvar jetinin başlangıcında, serbest jet bölgesinde girdaplar gözlemlendi. Ayrıca tüm sirkülasyon bölgelerinin Reynolds sayısının daha yüksek değerleri için genişlediği görüldü. Reynolds sayısı ile akışkan hızı arttıkça, kavite bölgesindeki elastik deformasyon arttığı gözlemlendi. Düşük Reynolds sayılarında, boşluk bölgesindeki akışın eğri yüzeyini tamamen örtmediği görüldü.



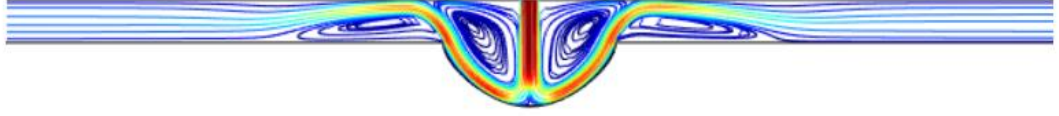
(a) Re=100



(b) Re=200



(c) Re=500



(d) Re=700

Şekil 5.1. $\varphi = 0.03$, $Ha=5$ için Reynolds sayısının akış çizgileri üzerindeki etkileri

Sabit değerler için ($\varphi = 0.03$, $Ha = 5$) eş sıcaklık eğrilerinin dağılımı (Reynolds sayısı 100'den 700'e kadar) Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.

Reynolds sayısı arttıkça, duvar jetinin ucundaki ve eğri bölgesindeki sınır tabakasının inceldiği görüldü. Duvar jetinin başlangıcındaki sınır tabakasının Reynolds sayısındaki artışla beraber arttığı belirlendi. Düşük Reynolds sayılarında eğri yüzeyinin kaplanmadığı görüldü.



(a) Re=100



(b) Re=200



(c) Re=500



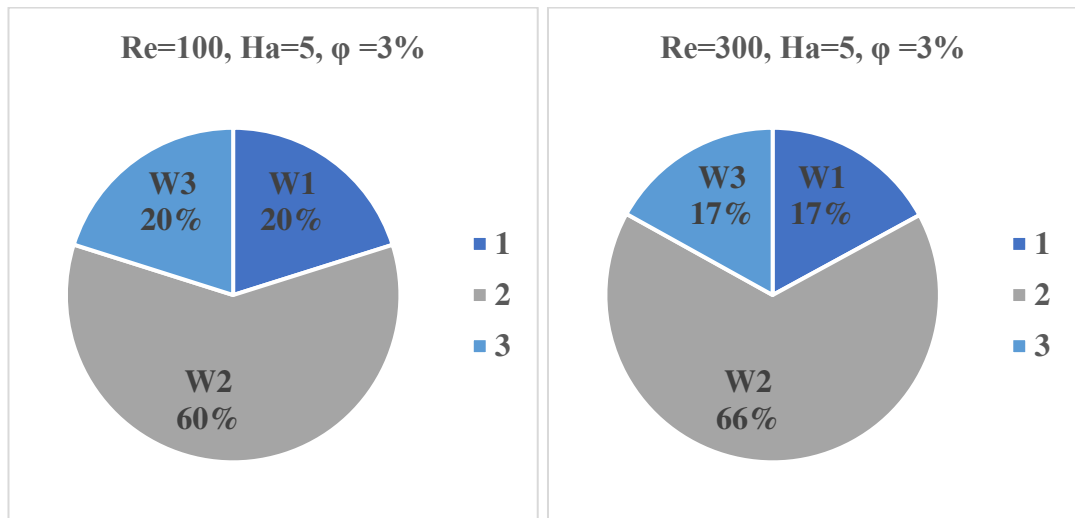
(d) $Re=700$

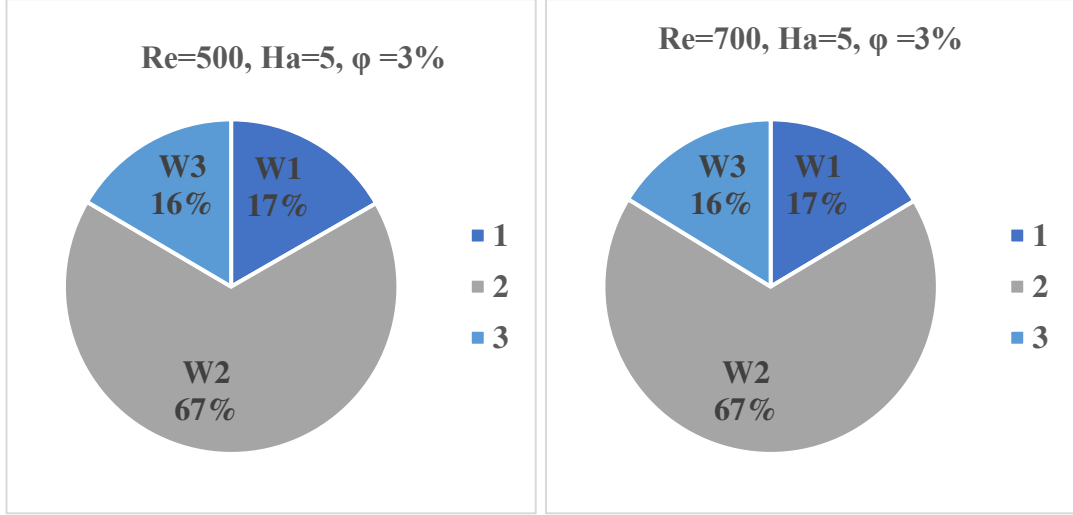
Şekil 5.2. $\phi=0.03$, $Ha=5$ için Reynolds sayısının izotermilere etkileri

Sabit değerler ($\phi=0.03$, $Ha=5$) için Reynolds sayısının (100'den 700'e) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre katkısının araştırılması Şekil 5.3'de gösterilmektedir.

Duvar 1 ve duvar 3'ün ortalama Nusselt değerinin katkısı azalırken, duvar 2'nin ortalama Nusselt değerinin katkısı Reynolds sayısı yükseldikçe arttığı tespit edildi. Ortalama Nusselt değerleri tek tek incelendiğinde veya tüm duvarlar dikkate alındığında bu değerlerin Reynolds sayısı ile arttığı görüldü.

Şekil 5.3.'de, duvar 2'deki 100 ve 700 Reynolds sayıları için ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 90.992 ve 295.330'dur. Duvar 2'de yüzde 224.56 gibi muazzam bir artış bulundu. Aynı karşılaştırma duvar 1 ve duvar 3 için yapıldığında sırasıyla yüzde 134.81 ve yüzde 132.35'lik bir artış gözlemlendi.





Şekil 5.3. $\phi = 0.03$, $Ha=5$ için Reynolds sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına etkisi

Tablo 5.1.'de yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.1. Sabit değerler ($\phi = 0.03$, $Ha = 5$) için Reynolds sayısının (100'den 700'e) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre katkısı

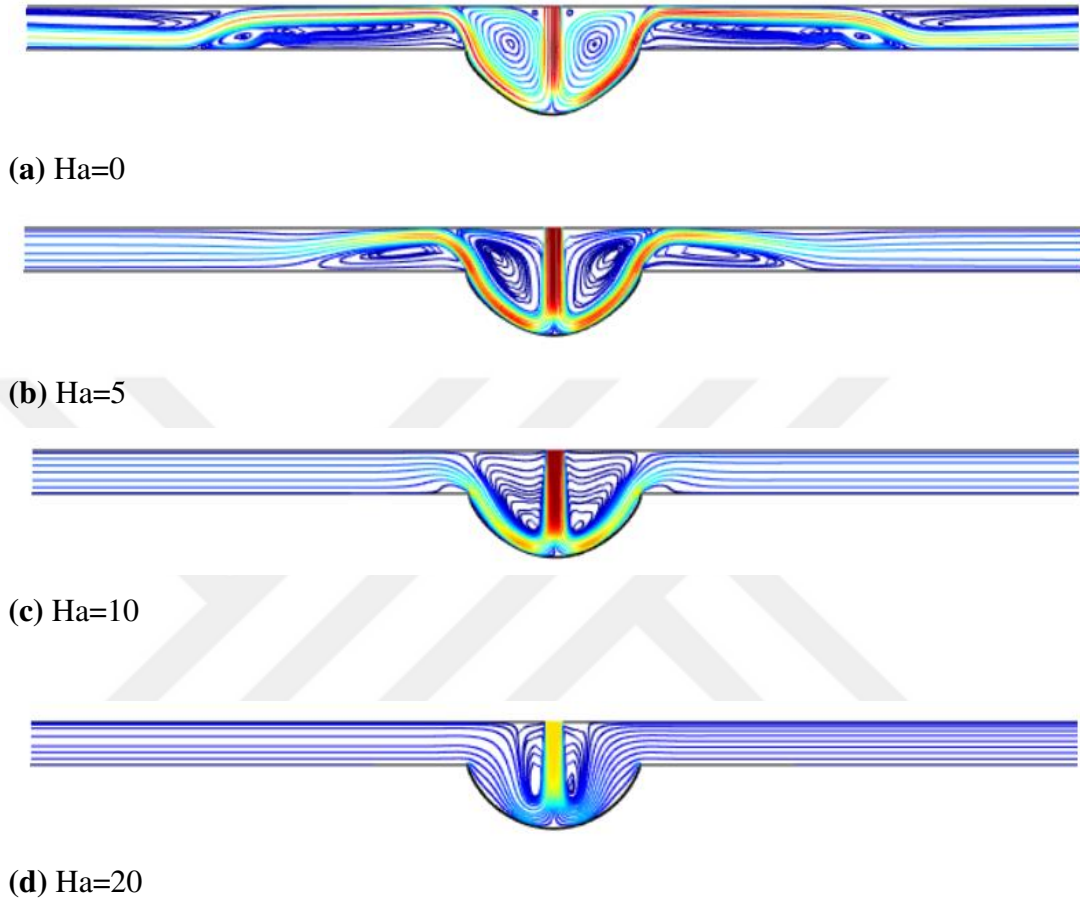
Reynolds Sayısı	W1	W2	W3
100	30.679	90.992	30.648
300	48.140	186.190	47.779
500	61.651	246.600	61.065
700	72.039	295.330	71.212

5.1.2 Hartmann Sayısının Etkisi

Sabit değerler için ($\phi = 0.03$, $Re = 700$) Hartmann sayısının (0'dan 20'ye kadar) akış çizgileri üzerindeki etkileri Şekil 5.4'de gösterilmektedir.

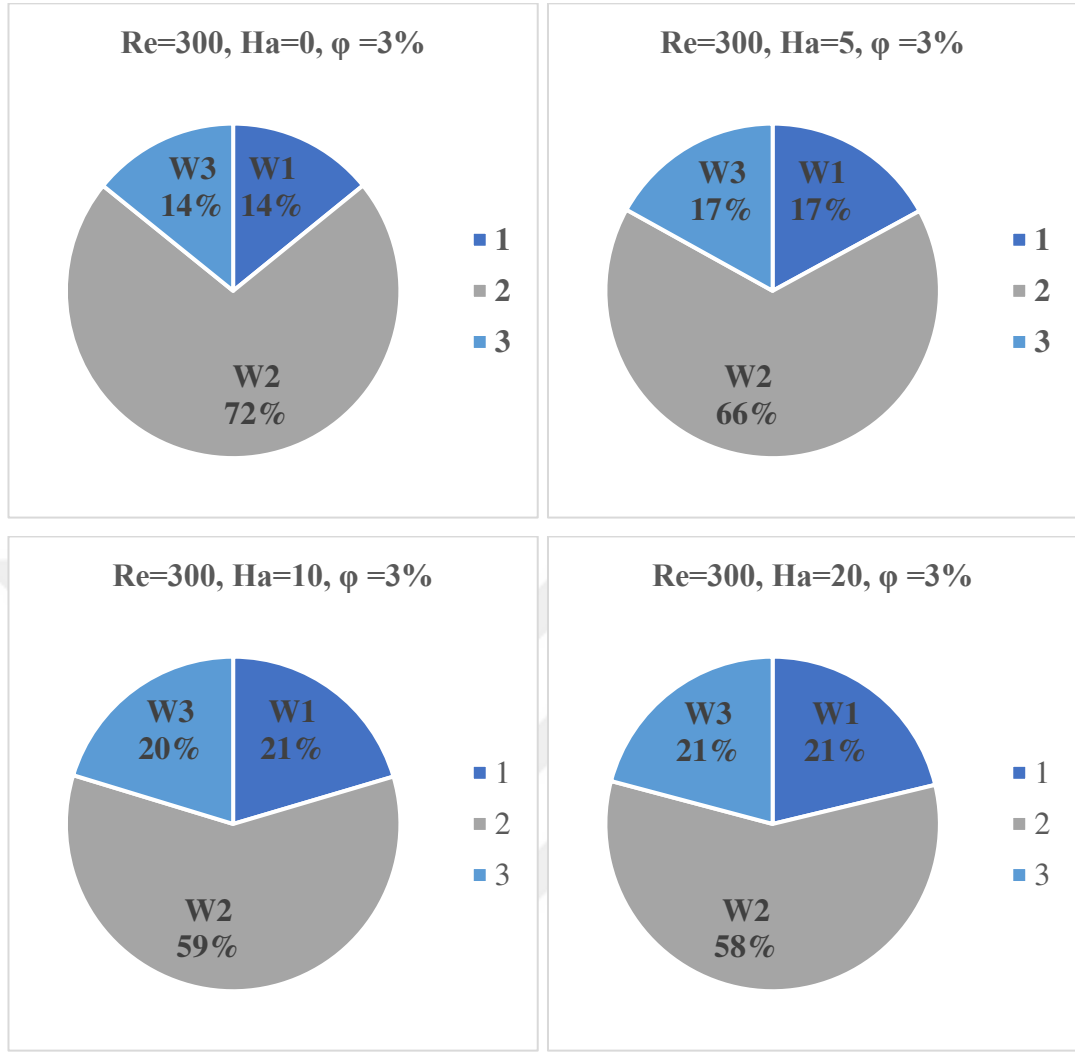
Manyetik alanın varlığında girdaplar bastırıldı. Düşük Hartmann sayılarında girdap oluşumu gözlemlendi ve girdap bölgesinin genişlediği belirlendi. $Ha = 0$ için, duvar jeti bölgesinde çoklu girdap oluşumu gözlemlendi. Kavite bölgesindeki elastik

deformasyon, manyetik alanın sönümlleme etkisiyle kademeli olarak azaltıldı. Hartmann sayısı arttıkça kavite bölgesindeki elastik deformasyonun azaldığı görüldü. Hartmann sayısı arttıkça akış çizgileri sabit hale geldiği görüldü.



Şekil 5.4. $\varphi = 0.03$, $Re=700$ için Hartmann Numarasının akış hatları üzerindeki etkileri

Sabit değerler için ($\varphi = 0.03$, $Re = 300$) Hartmann sayısının (0'dan 20'ye) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre etkisi Şekil 5.5.'de gösterilmektedir. Hartmann sayısı arttıkça duvar 1 ve duvar 3'ün ortalama Nusselt değeri artarken, duvar 2'nin ortalama Nusselt değeri yüzde olarak azaldı. Şekil 5.5.'de, Hartmann sayıları 0 ve 20 için duvar 2'deki ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 192.310 ve 199.720'dir. Ayrıca Şekil 5.5'de Hartmann sayıları 0 ve 20 için duvar 3'teki ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 38.055 ve 72.010'dur. Duvar 2 için yüzde 3.85'lik bir artış varken, duvar 3 için yüzde 89.22'lik büyük bir artış vardır. Bu artış Hartmann sayısı ile duvar jet bölgesini oldukça verimli hale getirmenin mümkün olduğunu gösterdi.



Şekil 5.5. $\phi = 0.03$, $Re=300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına etkileri

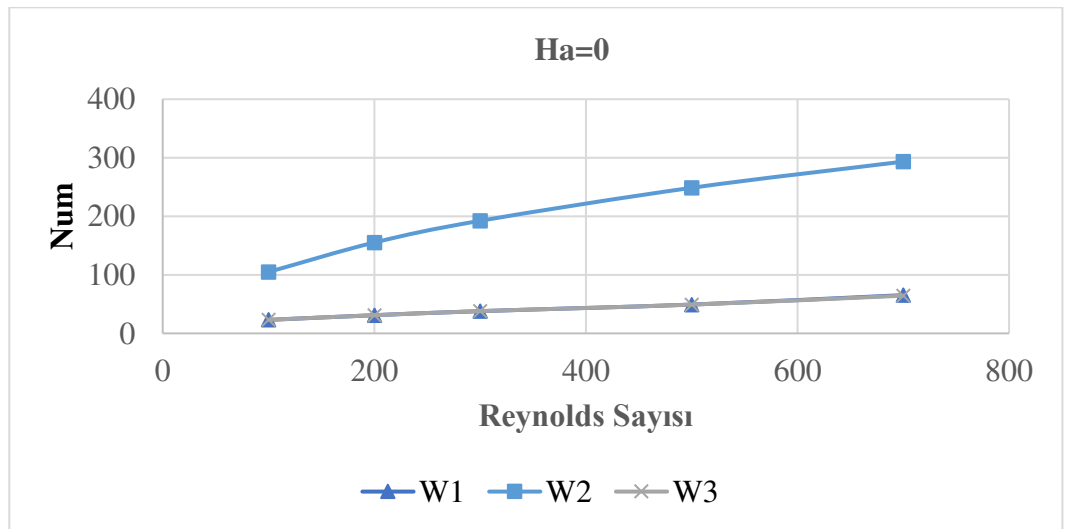
Tablo 5.2’de yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.2. $\phi = 0.03$, $Re=300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına etkileri

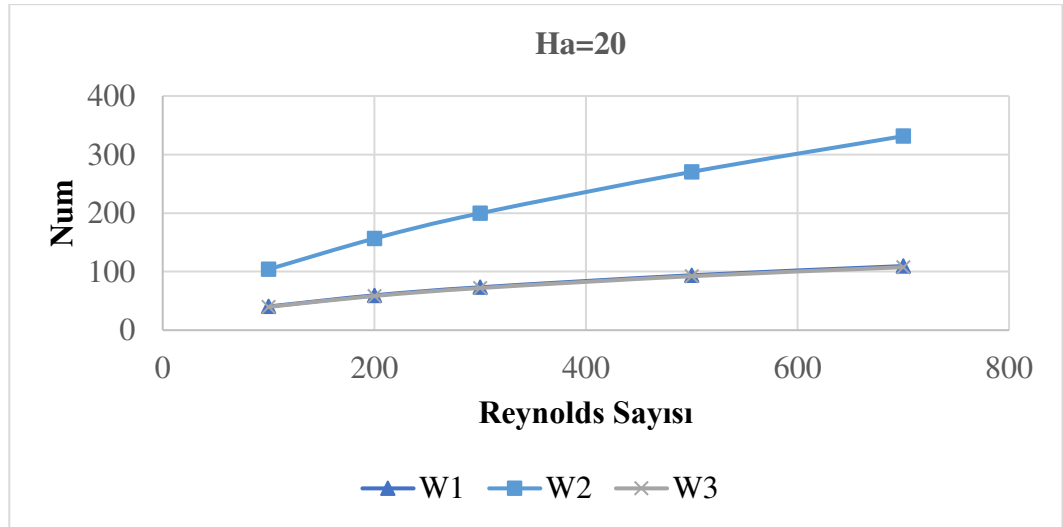
Hartmann Sayısı	W1	W2	W3
0	37.972	192.310	38.055
2	40.190	190.250	40.080
5	48.140	186.190	47.779
10	60.656	176.020	60.255
20	73.295	199.720	72.010

$Ha = 0$ ve $Ha = 20$ için Reynolds sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısıyla ilişkisinin sayısal analizi aşağıda verildi.

Şekil 5.6.'da $Ha = 0$ ve $Ha = 20$ sabit değerlerinde 100'den 700'e Reynolds sayısı için duvarlarda ortalama Nusselt sayısı incelendi. Reynolds sayısı arttıkça, her iki grafik için de duvar 1, duvar 2 ve duvar 3'ün ortalama Nusselt değeri arttı. $Re = 100$, $Ha = 0$ ve $Ha = 20$ için, duvar 2'nin ortalama Nusselt değerleri birbirine çok yakinken, $Re = 700$ için önemli bir fark gösterdiği bulundu. Bu değerler $Re = 100$ için 104.880 ve 104.000, $Re = 700$ için ise 293.410 ve 331.500'dür. Yaklaşık yüzde 13'lük bir artış gözlemlendi.



(a) $Ha=0$



(b) $Ha=20$

Şekil 5.6 $Ha = 0$ ve $Ha = 20$ sabit değerlerinde 100'den 700'e Reynolds sayısı için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları

Tablo 5.3.'de yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.3. $Ha = 0$ için Reynolds sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal analizi

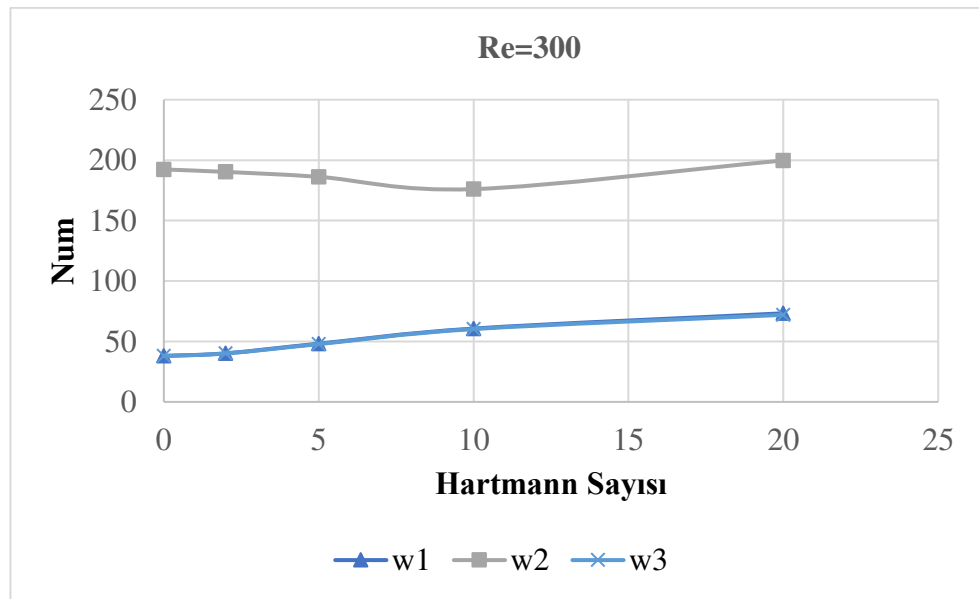
Reynolds Sayısı	W1	W2	W3
100	23.119	104.880	23.117
200	31.007	155.190	31.029
300	37.972	192.310	38.055
500	49.213	248.660	49.136
700	65.327	293.410	64.420

Tablo 5.4. $Ha = 20$ için Reynolds sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal analizi

Reynolds Sayısı	W1	W2	W3
100	40.496	104.000	39.806
200	59.509	156.450	58.421
300	73.295	199.720	72.010
500	93.779	270.400	92.243
700	109.520	331.500	107.570

$Re = 300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal analizi aşağıda verilmiştir.

Sabit değerler için ($Re = 300$) 0'dan 20'ye kadar Hartmann sayısı için duvarlarda ortalama Nusselt sayısının incelemesi Şekil 5.7.'de gösterilmektedir. Duvar 2'deki ortalama Nusselt sayısının $Ha = 10$ 'a kadar azaldığı ve ardından $Ha = 20$ 'ye kadar arttığı görüldü. Duvar 1 ve duvar 3, Hartmann sayısı ile artış eğiliminde olduğu belirlendi. Duvar 1 ve duvar 3 için yüzde 89.22'lik büyük bir artış olurken, duvar 2 yüzde 3.85'lik küçük bir artış gözlemlendi.



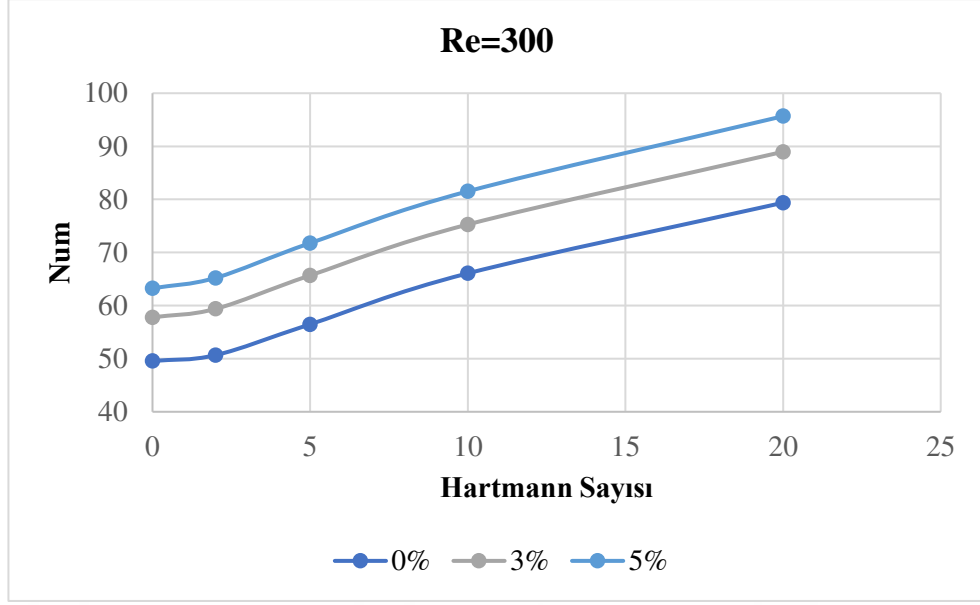
Şekil 5.7. $Re=300$ 'de çeşitli Hartmann sayısı için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları

Tablo 5.5.'de yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.5. $Re = 300$ için Hartmann sayısının duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı ile ilişkisinin sayısal tablosu

Hartmann Sayısı	W1	W2	W3
0	37.972	192.310	38.055
2	40.190	190.250	40.080
5	48.140	186.190	47.779
10	60.656	176.020	60.255
20	73.295	199.720	72.010

0'dan 20'ye kadar Hartmann sayısı ve nanopartikül hacim konsantrasyonu için sıcak duvarların ortalama Nusselt sayısı değişimi Şekil 5.8.'de gösterilmektedir ($Re=300$). Hartmann sayısı ve nanopartikül konsantrasyonu arttıkça, ortalama Nusselt değeri arttı. $\phi = \%0$ ve $\phi = \%5$ ($Ha = 0$) için ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 49.569 ve 63.263'tür. $Ha = 20$ için benzer karşılaştırma sırasıyla, 79.374 ve 95.674 bulundu. Başka bir deyişle, $Ha = 0$ için yüzde artış yüzde 27.626 ve $Ha = 20$ için artış yüzde 20.535'tir.



Şekil 5.8. $Re= 300$ 'de $\varphi= 0$, $\varphi= 0.03$, $\varphi= 0.05$ için çeşitli Hartmann sayıları için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları

Tablo 5.6.'da yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.6. 0'dan 20'ye kadar Hartmann sayısı ve nanopartikül hacim konsantrasyonu için sıcak duvarların ortalama Nusselt sayısı değişimi

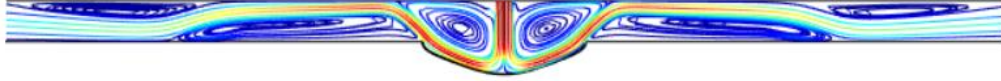
Hartmann Sayısı	$\varphi =0 \%$	$\varphi =3 \%$	$\varphi =5 \%$
0	49.569	57.797	63.263
2	50.668	59.383	65.222
5	56.482	65.685	71.769
10	66.073	75.280	81.526
20	79.374	88.972	95.674

5.1.3 Eğriliğin Etkileri

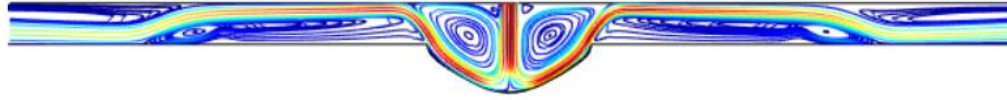
Sabit değerler için ($\varphi = 0.05$, $Re = 700$, $Ha = 2$) eğriliğin akış çizgisi üzerindeki etkileri Şekil 5.9.'da gösterilmektedir. Kavite etkisi arttıkça, serbest jet bölgesindeki girdap oluşumları azaldığı gözlemlendi.



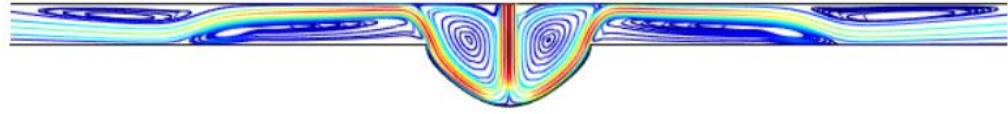
(a) 1/4 Elips



(b) 2/4 Elips



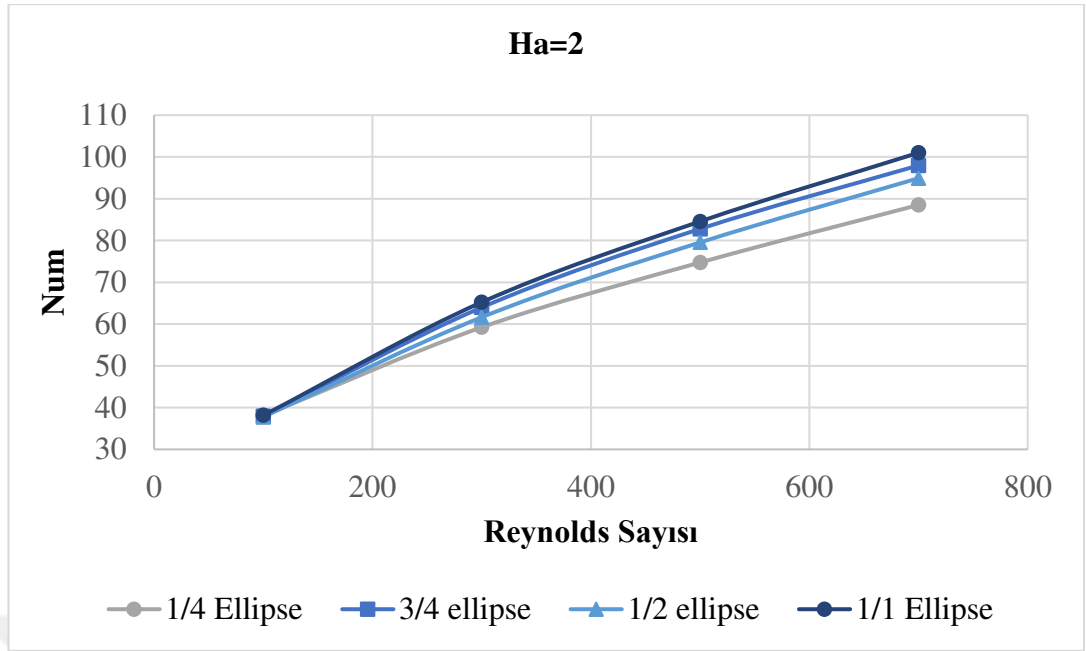
(c) 3/4 Elips



(d) 1/1 Elips

Şekil 5.9 $\varphi = 0.05$, $Re=700$, $Ha=2$ için Eğriliğin akış çizgileri üzerindeki etkileri

Şekil 5.10.'da $Ha = 2$, $\varphi = 0.05$ için ortalama Nusselt sayıları ve Reynolds sayılarına bağlı olarak duvarlardaki eğrilik etkisi incelendi. Eğrilik etkisinin özellikle yüksek Reynolds sayılarında etkili olduğu görüldü. Düşük Reynolds sayılarında, eğrilik etkisi neredeyse ortadan kalktığı tespit edildi. $Re = 700$ için, çeyrek eğrilikten tam eğriliğe %14.11'lik bir artış gösterdi. Düşük Reynolds sayılarında bu etki gözlenememiştir.



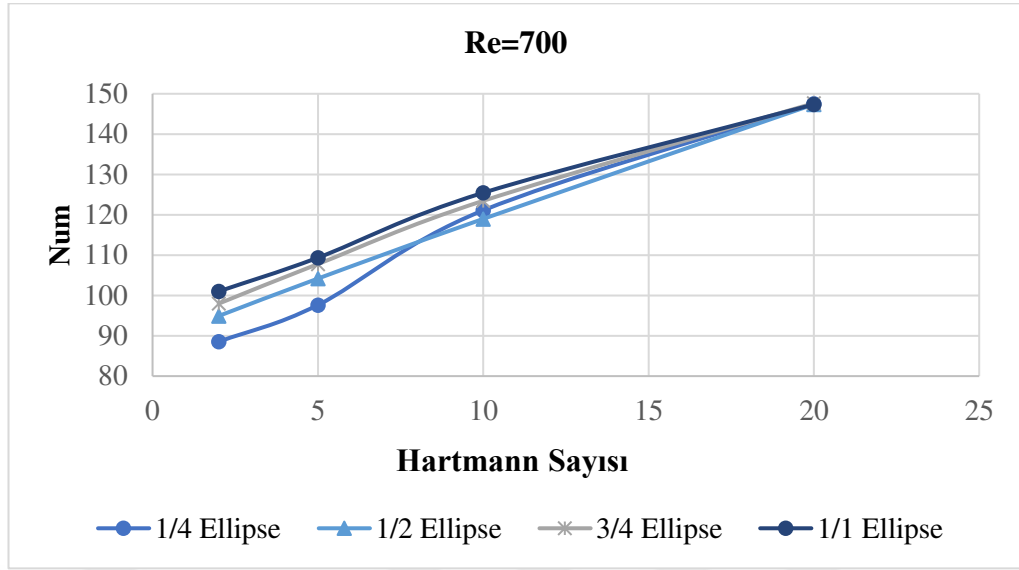
Şekil 5.10. $Ha=2$ 'de Çeşitli eğriler için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları

Tablo 5.7.'de yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.7. $Ha = 2$, $\phi = 0.05$ için ortalama Nusselt sayıları ve Reynolds sayılarına bağlı olarak duvarlardaki eğrilik etkisi

Reynolds Sayısı	1/4 Eğrilik	1/2 Eğrilik	3/4 Eğrilik	1/1 Eğrilik
100	38.085	37.749	37.935	38.144
300	59.226	61.631	63.977	65.222
500	74.734	79.540	82.784	84.559
700	88.510	94.905	97.966	101.000

Şekil 5.11.'de $Re=700$, $\phi = 0.05$ için ortalama Nusselt sayıları ve Hartmann sayılarına bağlı olarak duvarlardaki eğrilik etkisi incelendi. Eğrilik etkisinin tüm modeller için Hartmann sayısına bağlı olarak neredeyse doğrusal biçimde arttığı görüldü. Yüksek Hartmann sayılarında, eğrilik etkisinin neredeyse ortadan kalktığı tespit edildi.



Şekil 5.11. Re=700'de Çeşitli eğriler için duvarlarda ortalama Nusselt sayıları

Tablo 5.8.'de yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

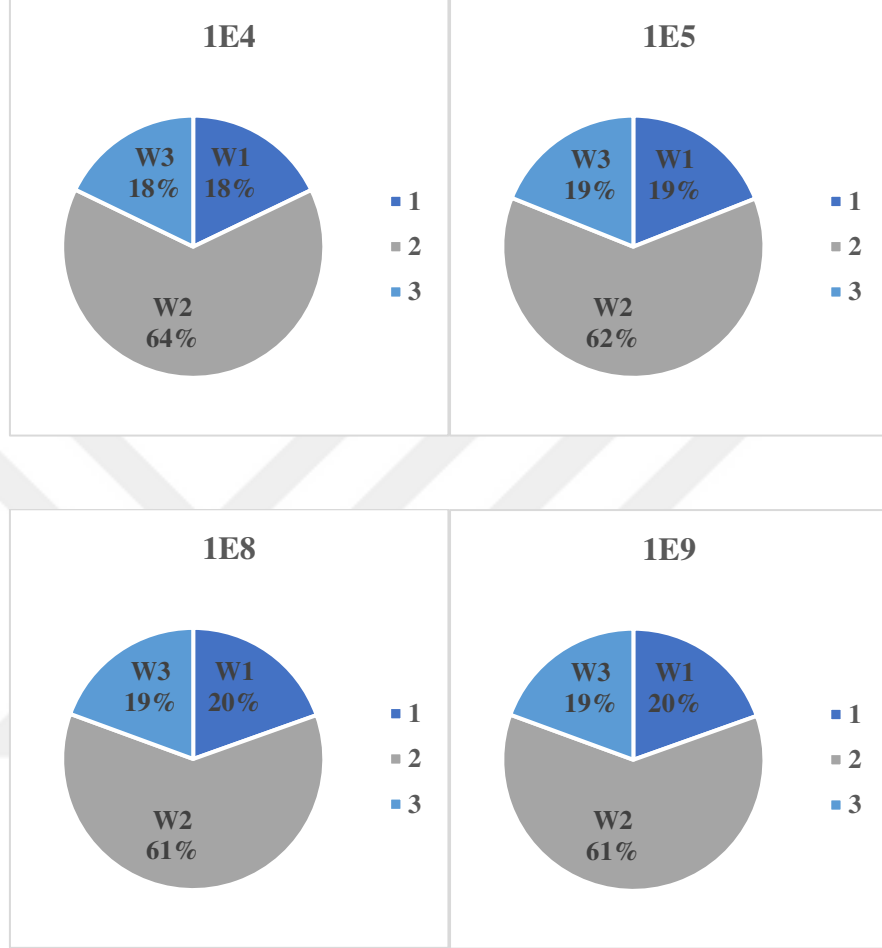
Tablo 5.8. Re = 700, $\phi = 0.05$ için ortalama Nusselt sayıları ve Hartmann sayılarına bağlı olarak duvarlardaki eğrilik etkisi

Hartmann Sayısı	1/4 Eğrilik	1/2 Eğrilik	3/4 Eğrilik	1/1 Eğrilik
2	88.510	94.905	97.966	101.000
5	97.623	104.180	107.780	109.360
10	121.090	118.980	123.460	125.450
20	147.510	147.380	147.660	147.360

5.1.4 Elastisite Etkisi

Sabit değerler için ($\phi = 0.03$, $Ha = 2$, $Re = 700$) Young modülünün (10^4 'ten 10^9 'a) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre etkisi Şekil 5.12.'de gösterilmektedir. Elastik etki altında duvarlarda ortalama Nusselt değerini değiştirmek mümkündür. Duvar 1, duvar 2 ve duvar 3'ün ortalama Nusselt değerleri toplandığında

10^4 için 466.602 ve 10^9 için 479.678'dir. Duvar 1 ve duvar 3'ün ortalama Nusselt değeri 10^4 'ten 10^9 'a artma eğilimindeyken, bu etki duvar 2 için tam tersi yani azalma eğilimindedir.



Şekil 5.12. $Re = 700$, $\phi = 0.03$ ve $Ha=2$ için çeşitli elastisite modül değerleri için duvarlardaki ortalama Nusselt sayıları

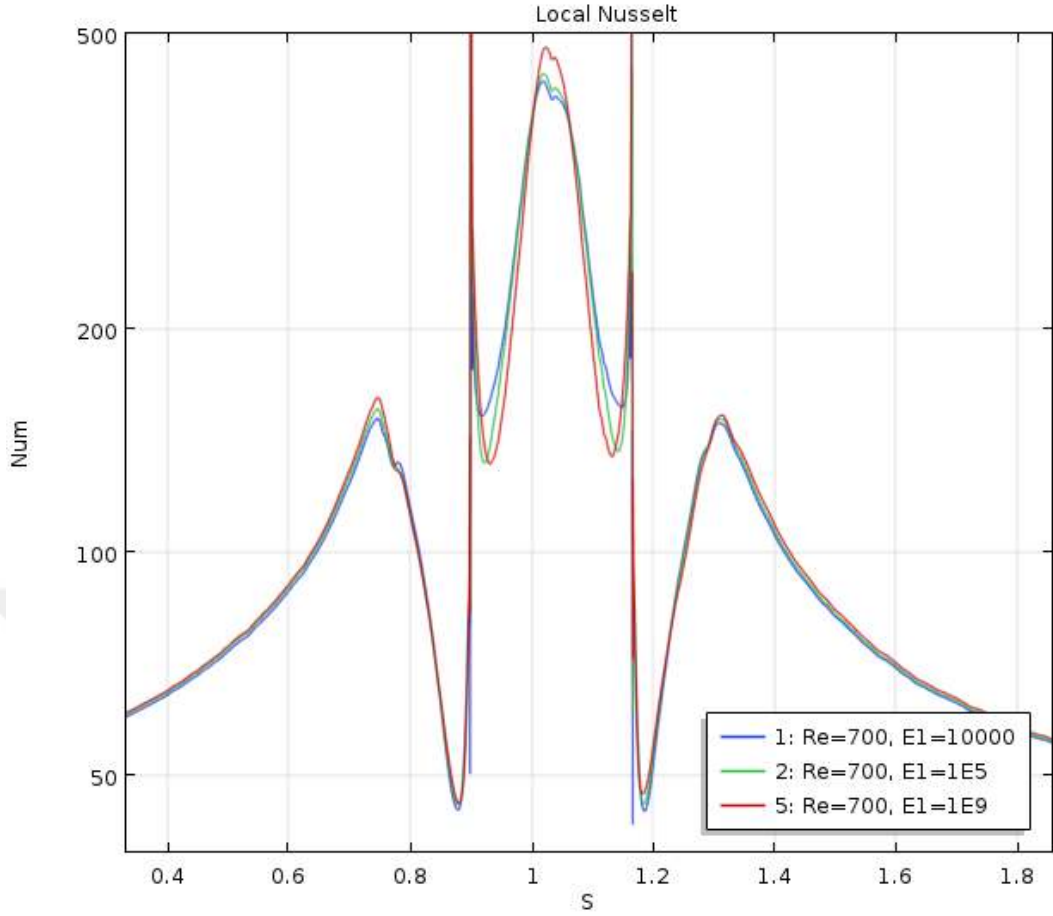
Tablo 5.9.'da yukarıda verilen grafiksel sonuçların sayısal değerlerine ait karşılaştırmalı detaylı tablo sunulmuştur.

Tablo 5.9. Sabit değerler için ($\varphi = 0.03$, $Ha = 2$, $Re = 700$) Young modülünün (10^4 'ten 10^9 'a) duvarlardaki ortalama Nusselt sayısına göre etkisi

	W1	W2	W3
1E4	83.452	300.150	83.227
1E5	89.249	291.300	88.804
1E6	92.039	289.020	91.235
1E8	92.524	288.620	91.812
1E9	92.529	288.620	91.818

Bu alışma, elastisite modülü 10^4 olan duvara göre ortalama Nusselt sayısının 10^9 elastisite modüllüne sahip duvar için %2.80 arttığını göstermektedir. Küçük miktardaki artış, sıvı çarpma yüzeyindeki eğriliğin neden olduğu elastik etkinin sönümlemesinden kaynaklanmaktadır.

şekil 5.13.'de sabit değerler ($\varphi = 0.05$, $Ha = 5$, $Re = 700$) için $10^4, 10^5$ ve 10^9 elastisite modülü için yerel Nusselt sayısı incelemesi gösterildi. Elastisite modülü azaldıkça yerel Nusselt sayısının azaldığı ve duvar jet bölgesinde kademeli olarak azaldığı gözlendi.



Şekil 5.13. $10^4, 10^5$ ve 10^9 arasındaki esneklik modülüne bağlı olarak yerel Nusselt dağılımı

Özetle, sayısal analiz sonuçlarından elde edilen bazı önemli çıkarımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Duvar jet başlangıcındaki girdap boyutu Reynolds sayısı ile artar. Tüm sıcak duvarlardaki ortalama Nusselt sayısı Reynolds sayısı ile neredeyse doğrusal olarak değişir.

- Manyetik alanın akış alanı ve konvektif ısı transferi üzerindeki etkisi Reynolds sayısının değerine bağlıdır. Manyetik alan, akışı kontrol etmede ve vorteksleri kontrol etmede etkilidir. Manyetik alanın etkisi altında, ortalama Nusselt değeri artırılabilir. Manyetik alan etkisi eğrilik etkisini azaltır.

- Manyetik alanın yokluğunda ve mevcudiyetinde nanopartikül ilavesiyle ortalama Nusselt sayısı artırılabilir.

- Eğrilik etkisi özellikle yüksek Reynolds sayılarında ortalama Nusselt değerinin artmasında etkilidir.

- Young modülüne bağlı olarak yerel ve ortalama Nusselt değerleri artırılabilir.

5.2 Tartışma

Bu tez çalışmasında, manyetik alan etkisinde kısmen elastik ve eğimli izotermal bir yüzeyin nanoakışkan kullanılan çarpan jet ile soğutulması incelenmiş, akış yapıları ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kısımda, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılacaktır. Çarpan jetlerde ısı transferi ve akış yapısı oldukça karmaşık olduğu için birçok çalışmacı tarafından ilginç bulunmuş ve incelenmiştir.

5.2.1 Nanopartikül Etkisi

Çalışmalarda nanopartikül hacim oranındaki artışını ısı transferi üzerine olumlu etkileri literatürde görülmüştür.

Manca ve ark., 2016 [153] nanoakışkanlar ile yapılan çarpan slot jet üzerine laminer olarak çalışmış, sonuçlara göre lokal ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı değerleri durgunluk noktasında en yüksek olup, partikül konsantrasyonu ve Reynolds sayıları arttıkça artmıştır. $H/W = 10$ ve $\phi = \%5$ için ortalama ısı transfer katsayısı açısından maksimum $\%36$ artış gözlenmiştir.

Zeitoun ve ark., 2012 [154] Al_2O_3 -su nanoakışkanlı dairesel bir yüzeye çarpan jet akışını incelediler. Çalışmada, türbülanslı akış için Nusselt sayısındaki artışın sırasıyla $\%6.6$ ve $\%10$ 'luk konsantrasyonlarda $\%40$ ve $\%75$ 'e ulaşabileceğini göstermektedir.

Nguyen ve ark., 2008 [155], dikey olarak düz dairesel bir yüzeye dikey olarak çarpan sınırlı ve daldırılmış bir nanoakışkan jetinin ısı transfer performansını ve erozyon etkilerini inceledi. Nguyen ve ark., 2009 [156], hem laminar hem de türbülanslı rejimlerde farklı hacim fraksiyonlarında ($\leq 6\%$) değişken aralığını genişleterek araştırmalarını genişletti. En yüksek ısı transferi artışı, $\phi = 2.8\%$ ve $H=5$ mm'de elde edilmiştir. Kısa jet-yüzey mesafelerinde 6% 'lık hacim fraksiyonu için, alümina-su nanoakışkanların sınırlı konfigürasyon altında ısı transferinin belirgin olmadığını bildirdiler.

Qiang ve ark., 2010 [157], 26 nm Cu-su nanoakışkanına sahip daldırılmış ve sınırlı bir çarpma jetindeki davranışı inceledi. Nozul-yüzey mesafesi gibi bazı parametreler ($2 \leq H \leq 6$ mm) ve hacim fraksiyonu ($1.5\% \leq \phi \leq 3\%$) değişen parametreler altında incelemişlerdir. En yüksek iyileştirmenin $H = 4$ mm ve $\phi = 3\%$ 'te elde edildiğini bulmuşlardır. Seyreltik nanoakışkanlarda basınç düşüşünün ihmal edilebilir düzeyde olduğunu bulmuşlardır.

Modak ve ark., 2017 [158], bu çalışmada, sıcak bir yüzey üzerinde CuO-su nanoakışkan jetinin ısı transfer özelliklerini analiz etmek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Nanopartikül konsantrasyonunun ve Reynolds sayısının ısı transfer özelliklerine etkisi incelenmiştir. Reynolds sayısının aralığı ($5000 \leq Re \leq 12,000$), nanopartikül hacim fraksiyonu ($\phi = 0.15\%$ ve 0.6%), nozul plaka mesafesi ($H/D = 6, 12$) için testler yapılmıştır. CuO-su nanoakışkanlar için Nusselt sayısındaki artış saf suya kıyasla, $\phi = 0.15\%$ ve $\phi = 0.60\%$ nanoakışkan konsantrasyonu için sırasıyla 14% ve 90% olarak bulunmuştur.

Barewar ve ark., 2019 [159], ısıtılmış bakır levha yüzeyine ZnO-su nanoakışkanlı çarpan jetin ısı transfer özelliklerini deneysel olarak araştırdı. Nozul jet plaka mesafeleri ($2 \leq H/D \leq 7.5$), Reynolds sayısı ($2192 \leq Re \leq 9241$) ve Nanopartikül hacim fraksiyonu $\phi = 0.02\%$ 'den $\phi = 0.1\%$ 'e yaptıkları çalışmada en yüksek hacim fraksiyonu için HTC'de artışı 54.70% olarak bildirmişlerdir.

Chougule ve ark., 2017 [160], CuO-su nanoakışkanlı çarpan jetlerin ısı transfer performansını analiz etti. $H/D = 4$ ve $Re = 13.000$ 'de, HTC'de sırasıyla 0.6% ve 0.15% nanopartikül hacim fraksiyonu için 75% ve 50% artışlar gözlemlendi.

Sun ve ark., 2016 [161] bir ısı eşanjöründeki Cu-su nanoakışkanlı çarpma jetinin davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma yaptı. Elde ettikleri sonuçlar, nanopartiküllerin ısı transfer performansını önemli ölçüde artırabildiğini ve basınç düşüşü üzerinde önemli bir etkisi olmadığını gösterdi.

Selimefendigil ve ark., [162] CuO-su nanoakışkan ile kısmen eğimli bir yüzeyin darbeli jet soğutmasının sayısal optimizasyonunu inceledi. Optimize edilmiş eğimli duvar ile düz bir duvara kıyasla daha yüksek ısı transferinin elde edilebileceğini gösterdiler. Optimizasyon sonucunda en yüksek nanopartikül hacim fraksiyonunda ($\phi = 0.04$) en yüksek ısı transfer artışı değeri %20'nin üzerinde elde edilmiştir.

Bu çalışmada ve diğer çalışmalarda, ortalama Nusselt değerindeki ve ortalama ısı transfer katsayısındaki artışın nanopartikül konsantrasyonuna bağlı olarak olarak arttığı gözlenmiştir. Hacim partikül konsantrasyon değerleri $\phi = \%0$ ve $\phi = \%5$ ve $Re=300$ ($Ha=0$) için ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 49.569 ve 63.263'tür. $Ha=20$ için benzer karşılaştırma sırasıyla, 79.374 ve 95.674 bulundu. Başka bir deyişle, $Ha=0$ için yüzde artış yüzde 27.626 ve $Ha=20$ için artış yüzde 20.535 olarak gözlenmiştir.

5.2.2 Manyetik Alan Etkisi

Elektrik iletkenliğine sahip akışkanların kullanıldığı akışlarda manyetik alan etkisi (MHD) uygulanmasıyla gerçekleşen ısı transferi etkileri literatürde araştırmacılar tarafından sayısal ve deneysel çalışmaya konu olmuştur.

Lee ve ark., 2005 [163], yaptıkları çalışmada, uygulanan manyetik alan varlığında sınırlı jet akışındaki iki boyutlu sıvı akışını ve ısı transferini Stuart Sayısı (0 ile 0.05) arasında sayısal olarak araştırdılar. Uygulanan manyetik alanın yoğunluğu arttıkça, kanalda oluşan girdapların zayıfladığını ve çarpan jetin salınım genliği azaldığını bildirdiler.

Selimefendigil ve ark., 2018 [164] Al_2O_3 -su nanoakışkanı ile izotermal bir yüzeyin çift jetli çarpma soğutmasının sayısal çalışması manyetik alanın etkisi altında inceledi. Sayısal simülasyonlar Reynolds sayısı (100 ila 400 arasında), katı partikül

hacim fraksiyonu (%0 ile %4 arası), Hartmann sayısı (0 ile 2.5 arasında), yarık plaka arasındaki mesafenin 4 ile 16 arasında değişirken manyetik alanın sıvı akışını geciktirdiği ve yerel ve ortalama ısı transferini düşürdüğünü gözlemlediler.

Nakharintr ve ark. 2017 [165], mini kanallı ısı alıcısında sınırlı bir jet çarpmasının TiO_2 nanoakışkanlı ısı transferinin artırılması üzerindeki manyetik alan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sıvısı olarak hacimce %0.005, %0.010, %0.015 gibi çeşitli konsantrasyonlara sahip TiO_2 parçacıkları 0.084, 0.28 mT'lik iki farklı manyetik alan kuvveti altında incelen çalışmada manyetik alan etkisi ile Nusselt sayısının manyetik alan etkisi olmayanlara göre artma eğiliminde olduğu ve manyetik alan kuvvetinin artmasıyla Nusselt sayısının da arttığı bulunmuştur.

Nimmgadda ve ark. 2019 [166], düzgün/düzensiz manyetik alan ve jet çarpmasının nanoakışkanların hidrodinamik ve ısı transfer performansı üzerindeki etkisi Reynolds sayısının ($Re = 200-600$), nanopartikül tipinin (Cu, Al, TiO_2 ve hibrit (Cu + TiO_2)) ve nanopartikül hacim fraksiyonunda ($\phi = \%1$ ile $\%3$) incelemişlerdir. Özellikle manyetik alanın varlığında duvarların yakınında daha yüksek akış hızı değerleri oluşması ortalama Nusselt sayısının artmasına neden olduğunu bildirdiler.

Nimmgadda ve ark., 2019 [167] manyetik alan ve nanopartikül şeklinin sabit ve titreşimli plakalar üzerindeki jet çarpmasına etkisi manyetik alan etkisinin, $Ha=80$ ve $Re=900$ 'de sabit bir plaka üzerinde jet çarpma performansını yüzde 36.18 arttırdığı gözlemlenmiştir.

Hartmann sayıları 0 ve 20 için duvar 2'deki ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 192.310 ve 199.720'dir. Ayrıca Şekil 5.5'de Hartmann sayıları 0 ve 20 için duvar 3'teki ortalama Nusselt değerleri sırasıyla 38.055 ve 72.010'dur. Duvar 2 için yüzde 3.85'lik bir artış varken, duvar 3 için yüzde 89.22'lik büyük bir artış vardır. Bu artış Hartmann sayısı ile duvar jet bölgesini oldukça verimli hale getirmenin mümkün olduğunu gösterdi. Manyetik alan etkisi altında, düşük Hartmann sayılarında ortalama Nusselt sayısının arttığını gözlenirken, yüksek Hartmann sayılarında akışın ve girdapların sönmüldüğü, bu sebeple diğer geliştirici parametrelerin etkisini azalttığı görülmüştür. Duvarlardaki ortalama Nusselt sayısının arttığı görülmüştür. Bu noktada literatürdeki çalışmalarla paralellik göstermektedir.

5.2.3 Eğriliğin Etkileri

Gau ve ark., 1991 [46] slot-hava-jet çarpan jetin soğutma akışı ve ısı transferi süreci üzerinde yüzey eğrilik etkisini incelemişlerdir. Dışbükey (konveks) bir yüzey için, durma noktasında üç boyutlu ters dönen girdaplar başladığını, bunun da ısı transfer işleminin artmasıyla sonuçlandığını gözlemlediler. İçbükey (konkav) bir yüzeye için, ısı transferi Nusselt sayısının yüzey eğriliği arttıkça arttığını bildirdiler.

Yang ve ark., 1999 [2] slot çarpan jet ile soğutmasının nozul konfigürasyonu ve eğriliğinin içbükey yüzey etkileri üzerine deneysel bir çalışma yaptılar. Çalışma sonucunda eğriliğin etkisi, düz plaka sonuçlarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir ve önemli olduğu gösterilmiştir. İçbükey yüzey için durma noktasındaki ısı aktarım oranı düz yüzeydekilerle hemen hemen aynı olmasına rağmen ortalama ısı aktarım oranlarının arttığı bildirilmiştir.

Sharif ve ark., 2010 [6] konkav silindirik yüzeylerden türbülanslı çarpan slot-jet ile ısı transferinin parametrik çalışmasını incelediler. Yüzey eğriliği, eğrilik güçlü olduğunda, yani daha düşük D/B değerlerinde yerel ve ortalama Nusselt sayısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu söylediler.

Selimefendigil ve ark. [168] CuO-su nanoakışkan ile kısmen eğimli bir yüzeyin darbeli jet soğutmasının sayısal optimizasyonunu inceledi. Eğimli yüzeyin sıvı akışının dağılımı üzerindeki etkileri, düz bir yüzeye kıyasla, giriş jetinin yakınında iki devir daim çekirdeğinin kurulduğu Reynolds sayısının en yüksek değerinde daha belirgin olduğunu belirttiler. Düz ve optimize edilmiş kavisli konfigürasyonlar için Nusselt sayısının tepe değerleri arasında da önemli farklılıklar varlığını ve optimize edilmiş kavisli duvar ile daha yüksek ısı transfer değerleri elde edilebileceğini gösterdiler.

$Ha = 2$, $\phi = 0.05$ $Re = 700$ için ortalama Nusselt sayıları, çeyrek eğrilikten tam eğrilığe %14.11'lik bir artış görülmüştür. Eğrilik etkisinin yapılan çalışmada yüksek Reynolds sayılarında ortalama Nusselt sayısındaki artışa neden olmuştur. Düşük Reynolds sayılarında bu etki belirgin olarak görülmemektedir. Hartmann sayısının

yüksek değerleri için akışın sönümlenmesi eğrilik etkilerini azaltmaktadır ve $Ha=20$ için bu etkinin neredeyse ortadan kalktığı görülmektedir.

5.2.4 Elastisite Etkisi

Kısmen elastik bir izotermal sıcak yüzeyin soğutulmasına çarpan nano akışkan jetinin sayısal simülasyonu Selimefendigil ve ark. duvar esnekliğinin ortalama Nusselt sayısı ve maksimum Nusselt sayısının değişimi üzerindeki etkisinin daha yüksek Reynolds sayıları için önemli olduğunu bulmuşlardır. Selimefendigil ve ark., 2018 [169] 10^4 elastisite modülüne sahip duvarın ($Re=200$, $d/w=17.5$) boyutlarını ve elastisitesini değiştirerek sırasıyla maksimum Nusselt sayısının %50.58 ve %33 değişmesine karşılık ortalama Nusselt sayısının %9.33 ve %6.21 arttığını göstermektedir.

$\phi = 0.03$, $Ha = 2$, $Re = 700$ için yapılan çalışmada 10^4 elastisite modüllüne ve 10^9 elastisite modüllüne sahip duvar için yapılan ortalama Nusselt sayısının karşılaştırılmasında 10^9 elastisite modülüne sahip duvarda %2.80 arttığını görülmüştür. Ortalama Nusselt sayısı ve yerel Nusselt sayısının elastisite modülünün yükselmesiyle arttığı görülmüştür bu noktada literatürdeki örneklerle uyum göstermektedir.

6. ÖNERİLER

-Basınç kaybı etkileri sistemde göz önünde bulundurularak hesaplamaların daha da gerçeğe yaklaştırılabilmesi konusunda çalışılabilir.

-Sabit ve değişken manyetik alan etkisinin ısı transferi ve akış üzerine etkileri detaylı şekilde karşılaştırılabilir. Ayrıca uygulanan manyetik alanın uygulama açısı vb. gibi parametrelerin etkileri detaylandırılabilir.

-Sistem gerekliliklerine göre akış iki fazlı olarak incelenebilir.

-Nanopartikül maliyeti önemli bir ticari etken olarak göz önünde tutulabilir.

KAYNAKLAR

1. Ying, Z., Guinping, L., Xueqin, B., Lizhan, B., Dongsheng, W. Experimental study of curvature effects on jet impingement heat transfer on concave surfaces. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017, 30(2), 586-594.
2. Yang, G., Choi, M., Lee, J.S. An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface effects of nozzle configuration and curvature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999, 42, 2199-2209.
3. Tawfek, A. A. Heat transfer studies of the oblique impingement of round jets upon a curved surface. *Heat and Mass Transfer*. 2002, 38, 467-475.
4. Cornaro, C., Fleischer, A., Goldstein, R. Flow visualization of a round jet impinging on cylindrical surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1999, 20(2), 66–78.
5. Lee, D.H., Chung, Y.S., Kim, D.S. Turbulent flow and heat transfer measurements on a curved surface with a fully developed round impinging jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1997, 18(1), 160–169.
6. Sharif, M.A.R., Mothe, K. K. Parametric study of turbulent slot-jet impingement heat transfer from concave cylindrical surfaces. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010, 49(2), 428–442.
7. Öztekin, E., Aydin, O., Avcı, M. Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013, 44, 77–82.
8. Modak, M., Chougule, S.S., Sahu, S.K. An experimental investigation on heat transfer characteristics of hot surface by using CuO–water nanofluids in circular jet impingement cooling, *Journal of Heat Transfer*. 2017, 140(1), 012401.
9. Kareem, Z.S., Balla, H.H., AbdulWahid, A.F. Heat transfer enhancement in single circular impingement jet by CuO-water nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019, 15, 100508.
10. Buonomo, B., Manca, O., Bondareva, N. S. Thermal and Fluid Dynamic Behaviors of Confined Slot Jets Impinging on an Isothermal Moving Surface with Nanofluids. *Energies*. 2019, 12, 2074.
11. Barewar, S.D., Chougule, S.S. Heat transfer characteristics and boiling heat transfer performance of novel Ag/ZnO hybrid nanofluid using free surface jet

- impingement. *A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*. 2020, DOI: 10.1080/08916152.2020.1792587.
12. Ahmadi, H., Moghari, R. M., Esmailpour, K., Mujumdar, A. S. Numerical investigation of semi-confined turbulent slot jet impingement on a concave surface using an Al_2O_3 –water nanofluid. *Applied Mathematical Modelling*. 2016, 40(2), 1110–1125.
 13. Selimefendigil, F., Öztop, H.F. Effects of Nanoparticle Shape on Slot-Jet Impingement Cooling of a Corrugated Surface with Nanofluids. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2017, 9(2), 021016 .
 14. Selimefendigil, F., Öztop, H. F. Jet impingement cooling and optimization study for a partly curved isothermal surface with CuO-water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017, 89, 211–218.
 15. Datta, A., Jaiswal, A., Halder, P. Heat transfer analysis of slot jet impingement using Nano fluid on convex surface. *Materials Science and Engineering*. 2018, 402, 012098.
 16. Chen, W., Cheng, J. A Numerical analysis on the heat transfer of jet impingement with nanofluid on a concave surface covered with metal porous block. *Heat and Mass Transfer*. 2020, 56, 3071-3083.
 17. Lee, H. G., Ha, M. Y., Yoon, H. S. A. Numerical study on the fluid flow and heat transfer in the confined jet flow in the presence of magnetic field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005, 48(25-26), 5297–5309.
 18. Nakharintr, L., Naphon, P. Magnetic field effect on the enhancement of nanofluids heat transfer of a confined jet impingement in mini-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 110, 753–759.
 19. Selimefendigil, F., Öztop, H.F. Al_2O_3 -Water Nanofluid Jet Impingement Cooling with Magnetic Field. *Heat Transfer Engineering*. 2018, DOI:10.1080/01457632.2018.1513626.
 20. Nimmagadda, R., Haustein, H. D., Asirvatham, G.L., Wongwises, S. Effect of uniform/non-uniform magnetic field and jet impingement on the hydrodynamic and heat transfer performance of nanofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019, Volume 479, 268-281.
 21. Nimmagadda, R., Lazarus, G.A., Wongwises, S. Effect of magnetic field and nanoparticle shape on jet impingement over stationary and vibrating plates.

International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2019, Vol. 29 No. 12, 4948-4970.

22. Selimefendigil, F., Öztop, H.F. Nanojet impingement cooling of an isothermal surface in a partially porous medium under the impact of an inclined magnetic field. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019, DOI: 10.1007/s10973-019-08839-9.
23. Selimefendigil, F., Oztop, H.F. Cooling of a partially elastic isothermal surface by nanofluids jet impingement. *Journal of Heat Transfer*. 2018, 140(4), 042205.
24. Yakut, R., Yakut, K., Yeşildal, F., Karabey, A. Experimental and Numerical Investigations of Impingement Air Jet for a Heat Sink. *Procedia Engineering*. 2016, 157, 3–12.
25. Örs, Ergun. Kanal içi akış ve çarpan jet kullanımı ile elektronik elemanların soğutulmasının sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2017, 63. (Yüksek Lisans Tezi).
26. Kılıç, M. Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2018, 33(3), 121-132.
27. Cho, H.H., Kim, K.M., Song J. Applications of Impingement Jet Cooling Systems. *Cooling Systems: Energy, Engineering and Applications*, Nova Science Publishers INC., 2011, 37-67.
28. Manca, O. Thermal and fluid dynamic behaviors of confined laminar impinging slot jets with nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, 70, 15–26.
29. Webb, B., Ma, C. Single-phase liquid jet impingement heat transfer. *Advances in Heat Transfer*. 1995, 26, 105–217.
30. Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M., Button, B. A review of heat transfer data for single circular jet impingement. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1992, 13, 106–115.
31. Oztop, H.F., Varol, Y., Koca, A., Firat, M., Turan, B., Metin, I. Experimental investigation of cooling of heated circular disc using inclined circular jet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011, 38, 990–1001.

32. Sharif, M., Banerjee, A. Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate. *Applied Thermal Engineering*. 2009, 29, 532–540.
33. Martin, H. Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces. *Advances in heat transfer*. 1977,13, 1-60.
34. Incropera, F.P., DeWitt, DP. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri. Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2006, 960.
35. Lou, Z.Q., Mujumdar, A.S., Yap, C. Effects of geometric parameters on confined impinging jet heat transfer. *Applied Thermal Engineering*. 2005, 25, 2687-2697.
36. Glynn, C., Murray, B. Jet Impingement Cooling in Mikroscale. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, 25-30 September, 2005, Castelvechio Pascoli.
37. Zeitoun, O. Ali, M. Nanofluid impingement jet heat transfer. *Nanoscale Research Letters*. 2012, 7, 139.
38. Molana, M., Banooni, S. Investigation of heat transfer processes involved liquid impingement jets: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2013, Vol. 30, No. 03, 413 – 435.
39. Shukla, A.K., Dewan, A. Flow and thermal characteristics of jet impingement: comprehensive review. *International journal of heat and technology*. 2017, 35(1), 153-166.
40. Mohammadpour, J., Lee, A. Investigation of nanoparticle effects on jet impingement heat transfer A review. *Journal of Molecular Liquids*. 2020, 316, 113819.
41. Whelan, B.P, Robinson, A.J. Nozzle geometry effects in liquid jet array impingement. *Applied Thermal Engineering*. 2009, 29, 2211–2221.
42. Singh, D., Premachandran, B., Kohli, S. Effect of nozzle shape on jet impingement heat transfer from a circular cylinder. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015, 96, 45-69.
43. Gulati, P., Katti, V., Prabhu, S.V. Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009, 48, 602–617.
44. Lee, J., Lee, S.J. The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000, 43, 3497-3509.

45. Lee, D.H. Measurements of Local Nusselt Number with a Miniscale Laminar Confined Slot-Jet Impinging on a Flat Plate. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011, 50, 6508–6512.
46. Gau, C., Chung, C. M. Surface Curvature Effect on Slot-Air-Jet Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Process. *Journal of Heat Transfer.* 1991, 113(4), 858-864.
47. Buzzard, W., Ren, Z., Ligrani, P. M., Nakamata, C., Ueguchi, S. Influences of Target Surface Roughness on Impingement Jet Array Heat Transfer: Part 2- Effects of Roughness Shape, and Reynolds Number. *Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2016*, June 13–17, 2016, Seoul, South Korea. (Proceeding Book, 1-11).
48. Metzger, D. E., Korstad, R. J. Effects of Crossflow on Impingement Heat Transfer. *Journal of Engineering for Power.* 1972, 94(1), 35-41.
49. San, J.Y., Shiao, W.Z. Effects of jet plate size and plate spacing on the stagnation Nusselt number for a confined circular air jet impinging on a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2006. 49, 3477–3486.
50. Zuckerman, N., Lior, N. Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling. *Advances in heat transfer.* 2006, 39, 565-631.
51. Hosseinalipour, S.M., Mashaei, P.R., Esmailpour, K. Heat transfer enhancement using nanofluids in laminar impinging jet flows. 13th Annual & 2nd International Fluid Dynamics conference, 26-28 October, 2010, Shiraz Iran.
52. Sun, B., Qu, Y., Yang, D. Heat Transfer of Single Impinging Jet with Cu Nanofluids. *Applied Thermal Engineering.* 2016, 102, 701–707.
53. Nayak, S. K., Mishra, P. C., Parashar, S. K. S. Enhancement of heat transfer by water–Al₂O₃ and water–TiO₂ nanofluids jet impingement in cooling hot steel surface. *Journal of Experimental Nanoscience.* 2016, 11(16), 1253–1273.
54. Nguyen, C.T., Laplante, G., Cury, M., Simon, G. Experimental Investigation of Impinging Jet Heat Transfer and Erosion Effect Using Al₂O₃-Water Nanofluid. *International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics (FMA'08)*, August 20-22, 2008, Rhodes, Greece.
55. Nguyen, C. T., Galanis, N., Polidori, G., Fohanno, S., Popa, C. V., Le Beche, A. An experimental study of a confined and submerged impinging jet heat transfer using Al₂O₃-water nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences.* 2009, 48(2), 401–411.

56. Li, Q., Xuan, Y., Yu, F., Tan, J. Experimental Investigation of Submerged Impinging Jet Using Cu-Water Nanofluid, 14th International Heat Transfer Conference IHTC14, August 8-13, 2010, Washington, USA (Proceeding Book 469–473).
57. Li, Q., Xuan, Y., Yu, F. Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu–water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*. 2012, 36, 426–433.
58. Senkal, C., Tori, S. Investigation on the Multiple Jet Impingement Heat Transfer Using Al_2O_3 -Water Nanofluid. International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems InterPACK2013, July 16-18, 2013, Burlingame, CA, USA.
59. Su, Z.G., Zheng, W., Zhang, Z.D. Study on diesel cylinder-head cooling using nanofluid coolant with jet impingement, *Therm. Science*. 2015, 19 (6), 2025–2037.
60. Hasan, H.A., Sopian, K., Jaaz, A.H., Al-Shamani A.N. Experimental investigation of jet array nanofluids impingement in photovoltaic/thermal collector. *Solar Energy*. 2017, 144, 321–334.
61. Naphon, P., Nakharintr, L. Nanofluid jet impingement heat transfer characteristics in the rectangular mini-fin heat sink. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012. 85(6), 1432–1440.
62. Naphon, P., Nakharintr, L., Wiriyaart, S. Continuous nanofluids jet impingement heat transfer and flow in a micro-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 126: 924–932.
63. Yousefi, T., Shojaeizadeh, E., Mirbagheri, H. R., Farahbaksh, B., Saghir, M. Z. An experimental investigation on the impingement of a planar jet of Al_2O_3 –water nanofluid on a V-shaped plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013, 50, 114–126.
64. Asghari, N., Ebrahimi, B.M., Ashjaee, M. SiO_2 nanofluid planar jet impingement cooling on a convex heated plate, *Heat Mass Transf.* 2016, 52 (12), 2735–2746.
65. Zhou, M., Xia, G., Chai, L. Heat transfer performance of submerged impinging jet using silver nanofluids, *Heat Mass Transf.* 2015, 51 (2), 221–229.
66. Shukla, A.K., Dewan, A. Flow and thermal characteristics of jet impingement: comprehensive review. *International Journal of Heat and Technology*. 2017, 35(1), 153–166.

67. Çalışır, Tamer. Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2011, 188. (Yüksek Lisans Tezi).
68. Dogruoz, Mehmet Barış. Experimental and Numerical Investigation of Turbulent Heat Transfer due to Rectangular Impinging Jets. The University of Arizona, Aerospace and Mechanical Engineering, Arizona, 2005, 354s. (Doktora Tezi).
69. <http://www.thermopedia.com/content/872>
70. Bejan, A., Kraus, A.D. Heat Transfer Handbook. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2003, 1481.
71. Saha, S. K., Ranjan, H., Emani, M.S., Bharti, A.K Insert Devices and Integral Roughness in Heat Transfer Enhancement. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2020, 180.
72. https://www.researchgate.net/figure/Show-displaced-enhancement-devices-tube_fig3_335259626
73. Bergles, A. E. Some Perspectives on Enhanced Heat Transfer-Second-Generation Heat Transfer Technology. Journal of Heat Transfer. 1988, 110, 1082-1096
74. https://www.researchgate.net/figure/Show-swirl-flow-devices-tube_fig4_335259626
75. https://www.researchgate.net/figure/Show-coiled-tubes_fig5_335259626
76. https://www.hoval.com.tr/urunler_ve_cozumler/urunler/isi-geri-kazanimi/rotary-isi-esanjrleri
77. Racabovadioloğlu, Z. Silindirik borularda tek fazlı manyeto hidrodinamik akışın teorik ve deneysel olarak incelenmesi. Teknoloji. 2002, Sayı 1-2, 43-48.
78. Moghadassi, A., Ghomi, E., Parvizian, F. A numerical study of water based Al_2O_3 and Al_2O_3 -Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer. International Journal of Thermal Sciences.2015, 92, 50-57.
79. Arslan, F.M., Günerhan, H. Enerji Uygulamalarında Kullanılan Nanoakışkanların Isıl Özellikleri. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. 19-22 Nisan, 2017, İzmir (TESKON 2017 Bilimsel / Teknolojik Araştırma Bildiriler Kitabı 167-178.)
80. Choi, S.U.S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. The American Society of Mechanical Engineers Fluids Engineering Division (Publication) FED. 1995, 231, 99-105.

81. Takabi, B., Shokouhmand, H. Effects of Al_2O_3 –Cu/water hybrid nanofluid on heat transfer and flow characteristics in turbulent regime. *International Journal of Modern Physics C*. 2015, 26(4), 1550047.
82. Choi, S.U.S. Nanofluids: From Vision to Reality Through Research. *The American Society of Mechanical Engineers Journal of Heat Transfer*. 2009, 131(3), 033106.
83. Sarkar, I., Chakraborty, S., Roshan, A., Behera, D.K., Pal, S.K., Chakraborty, S., Application of TiO_2 nanofluid-based coolant for jet impingement quenching of a hot steel plate, *Experimental Heat Transfer*. 2019, 32 (4), 322–336.
84. Özcan Çoban Seda. Manyetik Alanda Nanoakışkanın Geri Basamak Geometrisinde Karışık Taşınım Isı Transferine Etkileri. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Manisa, 2018, 186s. (Yüksek Lisans Tezi)
85. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., Xi, S. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*. 2009, 196, 89–101.
86. Gupta, M., Singha, V., Kumara, R., Said, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 74, 638–670.
87. Suresh, S., Venkataraj, K.P., Selvakumar, P., Chandrasekar, M. Effect of Al_2O_3 –Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012, 38, 54–60.
88. Timofeeva, E.V., Yu, W., France, D.M., Singh, D., Routbort, J.L., Nanofluids for heat transfer: an engineering approach. *Nanoscale Research Letters*. 2011, 6, 182.
89. Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thompson, L.J. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*. 2001, 78(6), 718–720.
90. Patel, H.E., Das, S.K., Sundararagan, T., Nair, A.S., Geoge, B., Pradeep, T. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*. 2003, 83, 2931–2933.
91. Yu, W., Xie, H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms and Applications. *Journal of Nanomaterials*. 2012, DOI:10.1155/2012/435873.

92. Biercuk, M. J., Llaguno, M. C., Radosavljevic, M., Hyun, J. K., Johnson, A. T., Fischer, J. E. Carbon nanotube composites for thermal management. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(15), 2767–2769.
93. Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles, *Netsu Bussei*. 1993, 4 (4), 227–233.
94. Lee, J.H., Hwang, K. S., Jang, S. P., Lee, B. H., Kim, J. H., Choi, S. U. S., Choi, C. J. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008, 51(11-12), 2651–2656.
95. Choi, S. U.S. Nanofluids: From Vision to Reality Through Research. *Journal of Heat Transfer*. 2009, 131, 033106-1-9.
96. Prakash, A., Satsangi, S., Mittal, S., Nigam, B., Mahto, P. K., Swain, B.P. Investigation on Al_2O_3 Nanoparticles for Nanofluid Applications- A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy, 8–10 December, 2017, Sikkim, India.
97. Xie, HQ., Wang, JC., Xi, TG., Liu, Y., Ai, F. Dependence of the thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture on the base fluid. *Journal of Materials Science Letters*. 2002. 21(19), 1469-1471.
98. Gao, L., Zhou, X., Ding, Y. Effective thermal and electrical conductivity of carbon nanotube composites. *Chemical Physics Letters*. 2007, 434(4-6), 297–300.
99. Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C. Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids. *International Journal of Thermal Science*. 2005, 44, 367–373.
100. Das, S. K., Putra, N., Thiesen P., Roetzel, W. J. *Heat Transf.* 2003, 125, 567.
101. Duangthongsuk, W., Wongwises, S. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO_2 -water nanofluids. *Exp Therm Fluid Sci.* 2009, 33(4):706-14.
102. Nguyen, C.T., Roy, G., Galanis, N., Suiro, S. Heat transfer enhancement by using Al_2O_3 -water nanofluid in a liquid cooling system for microprocessors. 4th WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, August 21-23, 2006, Elounda, Greece (Proceedings Book, 103–108).

- 103.** Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particle. *Journal of Applied Physics*. 2002, 91, 4568–4572.
- 104.** Shenoy, U.S., Shetty, A.N. A simple single-step approach towards synthesis of nanofluids containing cuboctahedral cuprous oxide particles using glucose reduction. *Frontiers of Materials Science*. 2018, 12(1), 74–82.
- 105.** Keblinski, P., Eastman, J.A., Cahill, D.G. Nanofluids for thermal transport. *Materials Today*. 2005, 8(6), 36-44.
- 106.** Xuan, Y., Li, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 2000, 21, 58–64.
- 107.** Zhang, X., Gu, H., Fujii, M. Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of Nanofluid. *International Journal of Thermophys*. 2006, 27, 569–580.
- 108.** Putnam, S.A., Cahill, D.G., Braun, P.V. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions, *Journal Applied Physics*. 2006, 99(8), 1–6.
- 109.** Huaqing, X., Jinchang, W., Tonggeng, X., Yan, L. Study on the thermal conductivity of SiC nanofluids, *Journal of Chinese Ceramic Society*. 2001, 29, 361–364.
- 110.** Ganvir, R.B., Walke, P.V., Kriplani, V.M. Heat transfer characteristics in nanofluid A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 75, 451–460.
- 111.** Ilyas, S.U., Pendyala, R., Marneni, N. Stability of Nanofluids. *Engineering Applications of Nanotechnology. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*. Ed: Korada V.S., Hamid N.HB. Springer Nature, 2017, 338.
- 112.** Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *American Society of Mechanical Engineering Journal of Heat Transfer*. 1999, 121(2), 280-289.
- 113.** Akoh, H., Tsukasaki, Y., Yatsuya, S., Tasaki, A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*. 1978, 45, 495–500.
- 114.** Wagener, M., Murty, B. S., Gunther, B. Preparation of metal nanosuspensions by high pressure DC sputtering on running liquids. *Nanocrystalline and Nanocomposite Materials*. 1997, 457, 149–154.

115. Eastman, J. A., Choi, U.S., Li, S., Thompson, L. J., Lee, S. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. Materials Research Society Symposium, 1997, 457, 3–11.
116. Zhu, H., Lin, Y., Yin, Y.A. Novel one step chemical method for preparation of copper nanofluids. Journal of Colloid and Interface Science. 2004, 227, 100–103.
117. Lo, C.H., Tsung, T.T., Chen, L.C. Shape controlled synthesis of Cu based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). Journal of Crystal Growth. 2005, 277, 636–642.
118. Lo, C.H., Tsung, T.T., Chen, L.C. Ni nano-magnetic fluid prepared by submerged arc nano synthesis system (SANSS). The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series B. 2006, 48, 750–755.
119. Okonkwo, E.C., Osho, I.F., Almanassra, I., Abdulatif, Y., Ansari, T. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020, DOI: 10.1007/s10973-020-09760-2.
120. Ghadimi, A., Saidur, R., Metselaar, H.S.C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011, 54, 4051–4068.
121. Chakraborty, S., Panigrahi, P.K. Stability of nanofluid: A review. Applied Thermal Engineering. 2020, 174, 115259.
122. Ali, N., Teixeira, J.A., Addali, A. A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties, Journal of Nanomater. 2018, DOI: 10.1155/2018/6978130.
123. Chang, H., Jwo, C., Fan, P., Pai, S. Process optimization and material properties for nanofluid manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007, 34(3), 300–306.
124. Zhu, H.T., Lin, Y.S., Yin, Y.S. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids, Journal of Colloid Interface Science. 2004, 277(1), 100–103.
125. Sridhara, V., Satapathy, L.N. Al₂O₃-based nanofluids: a review. Nanoscale Research Letters. 2011, 6, 456–472.
126. Maxwell, J.C.A. Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon Press. Oxford, UK, 1881, 500.

127. Bruggeman, D.A.G. The calculation of various physical constants of heterogeneous substances I. The dielectric constants and conductivities of mixtures composed of isotropic substances. *Annual. Physics.* 1935, 24, 636-664.
128. Hamilton, R.L., Crosser, O.K. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals.* 1962, 1, 187–191.
129. Jeffrey, D.J., Conduction through a random suspension of spheres. *Proceedings of Royal Society.* 1973, 335, 355-367.
130. Yu, W., Choi, S.U.S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research.* 2003, 5(1–2), 167–171.
131. Chandrasekar, M., Suresh, S., Chandra, B.A. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/ water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2010, 34(2), 210–216.
132. Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M.A., Razi, P. Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2012, 39, 152–159.
133. Li, J.M., Li, Z.L., Wang, B.X. Experimental viscosity measurements for copper oxide nanoparticle suspensions. *Tsinghua Science and Techniques.* 2002, 7(2), 198–201.
134. Yu., W., Huaqing, X., Chen, L., Li, Y. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. *International Journal Thermochimica Acta.* 2009, 491, 92–96.
135. Said, Z., Saidur, R. *Nanofluid Heat and Mass Transfer in Engineering Problems.* Ed: Mohsen Sheikholeslami Kandelousu, In Tech, Rijeka, Croatia, 2017, 274.
136. Xuan, Y., Li, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 2000, 21(1), 58–64.
137. Shahrul, I.M., Mahbubul, I.M., Khaleduzzaman, S.S., Saidur, R., Sabri, M.F.M. A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2014, 38, 88–98.
138. Kumar, P., Dey, D., Samantaray, S. A Recent Review on Thermo-Physical Properties of Nanofluid. *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT).* 2016, 3555-3560.

139. Estelle, P., Cabaleiro, D., Zyla, G., Lugo, L., Murshed, S.M.S. Current trends in surface tension and wetting behavior of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, 94, 931–944.
140. Chinnam, J., Das, D.K., Vajjha, R.S., Satti, J.R. Measurements of the surface tension of nanofluids and development of a new correlation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015, 98, 68-80.
141. Kumar, R., Milanova, D. Effect of surface tension on nanotube nanofluids. *Applied Physics Letters*. 2009, 94(7), 073107.
142. Hartmann, J. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field. *Mathematisk Fysiske Meddelelser*. 1937, 15(6), 1 28.
143. Landau, L.D., Lifshitz, E.M. *Electrodynamics of continuous Media in course of theoretical physics*. Robert Maxwell. 1984, 8, 460.
144. Abdou, M. Introduction to MHD and Applications to Thermofluids of Fusion Blankets, One of a number of lectures given at the Institute For Plasma Research (IPR) at Gandhinagar, India, January 2007, University of California, Los Angeles (UCLA).
145. Gregory, T.S., Cheng, R., Tang, G., Mao, L., Tse, Z.T.H. The Magnetohydrodynamic Effect and its Associated Material Designs for Biomedical Applications: A State-of-the-Art Review. *Advanced Functional Material*. 2016, 26(22), 3942–3952.
146. Alfven, H. Magnetohydrodynamics and the Thermonuclear Problem. Department of Electronics. Royal Institute of Technology. 145-148.
147. Ganji, D.D., Malvandi, A. Heat Transfer Enhancement Using Nanofluid Flow in Microchannels. Elsevier, Cambridge, USA, 2016, 361.
148. Racabovadiloğlu, Z. Silindirik borularda tek fazlı manyeto hidrodinamik akışın teorik ve deneysel incelenmesi. *Teknoloji*. 2002, 1(2), 43-48.
149. Farrokhi, H., Otuya, D. O., Kimchenko, A., Dong, J. Magnetohydrodynamics in Biomedical Applications. Nanofluid flow in porous media. Ed: Mohsen Sheikholeslami, IntechOpen, London, UK, 2019.
150. Selimefendigil, F., Öztop, H.F. Cooling of a partially elastic isothermal surface by nanofluids jet impingement. *Journal of Heat Transfer*. 2018, 13. 140(4), 042205.

151. Selimefendigil, F., Öztop, H.F., Chamkha, A.J. Fluid–structure-magnetic field interaction in a nanofluid filled lid-driven cavity with flexible side wall. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2017, 61, 77–85.
152. <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method?parent=physics-pdes-numerical-042-62>
153. Manca, O., Ricci, D., Nardini, S., Di Lorenzo, G. Thermal and fluid dynamic behaviors of confined laminar impinging slot jets with nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, 70, 15–26.
154. Zeitoun, O., Ali, M. Nanofluid impingement jet heat transfer. *Nanoscale Research Letters*. 2012, 7(1), 139.
155. Nguyen, C.T., Laplante, G., Cury, M., Simon, G. Experimental Investigation of Impinging Jet Heat Transfer and Erosion Effect Using Al_2O_3 -Water Nanofluid. *International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics (FMA'08)*, August 20-22, 2008, Rhodes, Greece.
156. Nguyen, C.T., Galanis, N., Polidori, G., Fohanno, S., Popa, C.V., Le Beche, A. An experimental study of a confined and submerged impinging jet heat transfer using Al_2O_3 -water nanofluid. *International Journal of Thermal Science*. 2009, 48(2), 401–411.
157. Li, Q., Xuan, Y., Yu, F., Tan, J. Experimental Investigation of Submerged Impinging Jet Using Cu-Water Nanofluid, *International Heat Transfer Conference Proceedings Paper*. 2010, 469–473.
158. Modak, M., Chougule, S.S., Sahu, S.K. An experimental investigation on heat transfer characteristics of hot surface by using CuO–water nanofluids in circular jet impingement cooling, *Journal of Heat Transfer*. 2017, 140(1).
159. Barewar, S.D., Tawri, S., Chougule, S.S. Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: an experimental investigation, *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*. 2019, 136, 1–10.
160. Modak, M., Chougule, S.S., Sahu, S.K. An experimental investigation on heat transfer characteristics of hot surface by using CuO–water nanofluids in circular jet impingement cooling. *Journal of Heat Transfer*. 2017, 140(1), 012401.
161. Sun, B., Qu, Y., Yang, D. Heat transfer of Single Impinging Jet with Cu Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 102, 701–707.

- 162.** Selimefendigil, F., Öztop, H.F. Jet impingement cooling and optimization study for a partly curved isothermal surface with CuO-water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017, 89, 211–218.
- 163.** Lee, H.G., Ha, M.Y., Yoon, H.S.A. Numerical study on the fluid flow and heat transfer in the confined jet flow in the presence of magnetic field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005, 48(25-26), 5297–5309.
- 164.** Selimefendigil F., Öztop H. F. Al₂O₃-water nanofluid jet impingement cooling with magnetic field. *Heat Transfer Engineering*. 2018, DOI: 10.1080/01457632.2018.1513626.
- 165.** Nakharintr, L., Naphon, P. Magnetic field effect on the enhancement of nanofluids heat transfer of a confined jet impingement in mini-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 110, 753–759.
- 166.** Nimmagadda, R., Haustein H. D., Godson Asirvatham, L., Wongwises S. Effect of uniform/non-uniform magnetic field and jet impingement on the hydrodynamic and heat transfer performance of nanofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019, 479, 268-281.
- 167.** Nimmagadda, R., Lazarus, G.A. Wongwises, S. Effect of magnetic field and nanoparticle shape on jet impingement over stationary and vibrating plates. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2019, 29(12), 4948-4970.
- 168.** Selimefendigil, F., Öztop, H. F. Jet impingement cooling and optimization study for a partly curved isothermal surface with CuO-water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017, 89, 211–218.
- 169.** Selimefendigil, F., Oztop, H.F. Cooling of a partially elastic isothermal surface by nanofluids jet impingement. *Journal of Heat Transfer*. 2018, 140(4), 042205.