

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İÇERİSİNE KANATÇIK YERLEŞTİRİLMİŞ DİKDÖRTGEN
KESİTLİ MİKROKANALDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halime ÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nezaket PARLAK

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

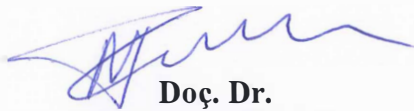
İÇERİSİNE KANATÇIK YERLEŞTİRİLMİŞ DİKDÖRTGEN
KESİTLİ MİKROKANALDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

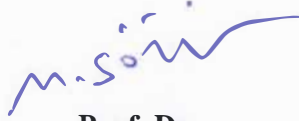
Halime ÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

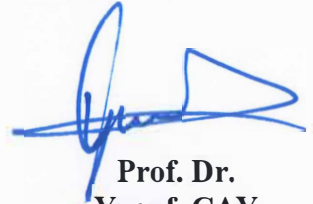
Bu tez 27.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr.
Nezaket PARLAK
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Nedim SÖZBİR
Üye



Prof. Dr.
Yusuf ÇAY
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Halime ÇELİK

27.05.2019

TEŞEKKÜR

Öncelikle Sakarya Üniversitesi’deki eğitim öğretim hayatım boyunca her konuda desteğine başvurduğum, yüksek lisansa başladığım ilk günden beri bana her konuda yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan; yüksek lisans tezimin belirlenmesi, tamamlanması aşamalarında ilgi ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Doç. Dr. Nezaket PARLAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince bilimsel fikirleriyle yardımlarını benden esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya PARLAK’a ve Öğr. Üyesi Ahmet AYDIN’a teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tezim boyunca her türlü fedakârlıklara katlanarak desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak; benim için çok değerli olan, hayatıma anlam katan, bugünlere gelebilmem için tüm imkânlarını seferber eden ve haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ALT İNDİSLER.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	2
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kanatçıklı Mikrokanallarda Akış ve Isı Geçişi	3
2.2. Kanatçıklı Mikrokanallarda Mamoakışkan Akışı ve Isı Geçişi	5
BÖLÜM 3.	
TEORİK ESASLAR	16
3.1. Nanoakışkanlar.....	16
3.2. Nanoakışkan Hacimsel Derişim, Yoğunluk, Özgöl Isı Denklemleri	17
3.2.1. Nanoakışkan hacimsel derişimi.....	17
3.2.2. Nanoakışkanların yoğunluğu.....	17
3.2.3. Nanoakışkanların özgöl ısısı	17
3.2.4. Nanoakışkanların viskozite denklemleri	18
3.2.5. Nanoakışkanların iletkenlik denklemleri.....	19
3.3. Temel Denklemler	20

3.3.1. Süreklilik denklemi	20
3.3.2. Momentum denklemleri	20
3.3.3. Enerji denklemi	22
3.4. Mikrokanallarda Ölçek Etkileri.....	22

BÖLÜM 4.

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ VE

PARAMETRİK OPTİMİZASYON	24
4.1. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD)	24
4.2. Mikrokanal Geometrisi ve Parametreler	25
4.3. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analizleri	28
4.3.1. Al ₂ O ₃ -Su Nanoakışkanının sabit sıcaklıkta HAD analizi: MK(ST)Al ₂ O ₃	28
4.3.2. MK(ST) Al ₂ O ₃ Çözüm ağı bağımsızlığının sağlanması.....	29
4.3.3. MK(ST) Al ₂ O ₃ Optimizasyon sonuçları.....	30
4.4. CuO-Su Nanoakışkanının Sabit Sıcaklıkta MK(ST) CuO HAD Optimizasyonu	32
4.4.1. Mesh analiz sonuçlarının sıcaklık ve basınç düşüşü ile ilişkisi.	32
4.4.2. MK(ST) CuO Optimizasyon sonuçları.....	33
4.5. Al ₂ O ₃ -Su Nanoakışkanının Sabit Isı Akısında MK(SA) Al ₂ O ₃ HAD Optimizasyonu	36
4.5.1. MK(SA) Al ₂ O ₃ Çözüm ağı bağımsızlığı	36
4.5.2. MK(SA) Al ₂ O ₃ Optimizasyon sonuçları.....	37
4.5.3. CuO Nanoakışkanının sabit ısı akısında MK(SA) CuO HAD optimizasyonu	39
4.5.4. MK(SA) CuO Çözüm ağı bağımsızlığı	40
4.5.5. MK(SA) CuO Optimizasyon sonuçları	40

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR.....	45
5.1. MK(ST) Al ₂ O ₃ HAD Analizi Sonuçları	46
5.2. MK(ST) AL ₂ O ₃ Farklı Akış Hızlarında Sıcaklık ve Hız Vektörleri....	49

5.3. MK(ST) Al ₂ O ₃ Kanatçık Açısının Isı Taşınım Katsayısına Etkisi	50
5.4. MK(ST) Al ₂ O ₃ Kanatçık Uzunluğunun Isı Taşınım Katsayısına Etkisi	51
5.5. MK(ST) Al ₂ O ₃ Kanatçık Kalınlığının Isı Taşınım Katsayısına Etkisi .	52
5.6. MK(ST) Al ₂ O ₃ Hacimsel Derişimin Isı Taşınım Katsayısına Etkisi	52
5.7. HAD Analizlerinin Sonuçlarının Karşılaştırılması	53
5.8. HAD Sonuçlarının Literatürdeki Mevcut Veriler ile Karşılaştırılması	54

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE TARTIŞMA	58
-------------------------	----

KAYNAKLAR.....	60
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	66
---------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Nu	: Nusselt sayısı
Re	: Reynolds sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
k	: Isı iletim katsayısı ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
c_p	: Özgül ısı ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
ϕ	: hacimsel derişim
ρ	: Yoğunluk ($kg.m^{-3}$)
D_h	: Hidrolik çap (m)
d	: Çap (m)
V	: Hacim (m^3)
m	: Kütle (kg)
r	: Nanopartikül yarıçapı (m)

ALT İNDİSLER

f	: Akışkan
s	: katı
p	: Partikül
nf	: Nanoakışkan
np	: Nanopartikül
bf	: Baz akışkan
x,y,z	: Kartezyen koordinatlar (m)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Nanoakışkanın sentezlenmesi için yaygın baz akışkanlar, nanopartiküller ve yüzey aktif cisimleri.....	16
Şekil 4.1. Fiziksel model ve ilgili geometrik parametreler: a) mikrokanal, b) kanatçıklı mikrokanal.....	26
Şekil 4.2. Kanatçık için belirlenen parametreler	27
Şekil 4.3. Al_2O_3 Nanoakışkan Sabit Sıcaklıkta Çözüm Ağı	29
Şekil 4.4. MK(ST) Al_2O_3 Çözüm ağı bağımsızlığı	29
Şekil 4.5. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi.....	30
Şekil 4.6. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi.....	31
Şekil 4.7. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi	31
Şekil 4.8. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi	32
Şekil 4.9. MK(ST) CuO Çözüm ağı bağımsızlığı	33
Şekil 4.10. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi.....	34
Şekil 4.11. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi.....	34
Şekil 4.12. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi	35
Şekil 4.13. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi	35
Şekil 4.14. MK(SA) Al_2O_3 Çözüm ağı bağımsızlığı.....	36
Şekil 4.15. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi.....	37
Şekil 4.16. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi.....	38
Şekil 4.17. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi	38
Şekil 4.18. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi	39
Şekil 4.19. MK(SA) CuO Çözüm ağı bağımsızlığı	40
Şekil 4.20. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi.....	41
Şekil 4.21. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi.....	42
Şekil 4.22. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi	42
Şekil 4.23. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi	43
Şekil 5.1. MK(ST) Al_2O_3 HAD Analizi; Hız bölgeleri.....	46

Şekil 5. 2 MK(ST) Al_2O_3 HAD Analizi; Kanatçık çevresinde sıcaklık bölgeleri	47
Şekil 5.3. MK(ST) Al_2O_3 HAD Analizi; Isı taşınım katsayılarının reynolds sayısı ile değişimi	48
Şekil 5.4. MK(ST) Al_2O_3 HAD Analizi; Isı taşınım katsayılarının basın düşüşü ile değişimi	48
Şekil 5.5. Farklı akış hızlarında hız vektörleri	49
Şekil 5.6. Farklı akış hızlarında sıcaklık değişimleri	50
Şekil 5.7. Kanatçık açısının ısı taşınım katsayısına etkisi.....	51
Şekil 5.8. Kanatçık uzunluğunun ısı taşınım katsayısına etkisi	51
Şekil 5.9. Kanatçık kalınlığının ısı taşınım katsayısına etkisi.....	52
Şekil 5.10. Hacimsel derişimin ısı taşınım katsayısına etkisi	53
Şekil 5.11. Reynolds sayısının ısı taşınım katsayısına etkisi	54
Şekil 5.12. Reynols sayısının basınç düşüşüne etkisi	54
Şekil 5.13. HAD analizi sonuçları; Nusselt değişiminin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması	55
Şekil 5.14. HAD analizi sonuçları; Nusselt değişiminin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması	55
Şekil 5.15. Hız ile $N_{artış}$ arasındaki ilişki.....	56
Şekil 5.16. Hız ile $N_{artış}$ arasındaki ilişki.....	56
Şekil 5.17. Hız ile $N_{artış}$ arasındaki ilişki.....	57

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Literatürde yapılan sayısal çalışmaların özeti.....	13
Tablo 2.2. Literatürde yapılan sayısal çalışmaların özeti.....	14
Tablo 4.1. Yapılan HAD analizlerinin özeti	25
Tablo 4.2. Mikrokanal geometrisi ile parametreleri.....	26
Tablo 4.3. Suyun (H ₂ O) ve nano partiküllerin özellikleri	28
Tablo 4.4. MK(ST) Al ₂ O ₃ için optimizasyon sonuçları	30
Tablo 4.5. MK(ST) CuO için optimizasyon sonuçları.....	33
Tablo 4.6. MK(SA) Al ₂ O ₃ için optimizasyon sonuçları	37
Tablo 4.7. MK(SA) CuO için optimizasyon sonuçları	41
Tablo 5.1. HAD Tabanlı optimizasyon sonuçları	45

ÖZET

Anahtar kelimeler: Mikrokanal, Nano akışkan, Kanatçık, HAD analizi

Bu çalışmada, mikrokanal içerisine yerleştirilen kanatçıkların akış ve ısı geçişine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Dikdörtgen kesite sahip tek bir mikrokanal içerisine, farklı yerleşim düzenlerinde 6 çift dikdörtgen kanatçık yerleştirilmiştir. Mikrokanalın hidrolik çapı sabit tutularak, içerisine yerleştirilen kanatçıkların uzunluğu, genişliği ve yatay eksen ile oluşturduğu kanatçık açısı parametre olarak belirlenmiştir. Temel akışkan su seçilerek farklı oranlarda nanopartikül içeren (Al_2O_3 (%0 ile %0,4) ve CuO (%0 ile %0,4)) nanoakışkanın hacimsel derişikliğinin akış ve ısı geçişine özellikleri incelenmiştir. Hesaplama sonucunda farklı parametreler için girilen değerler Response Surface Optimization (Cevap Yüzey Optimizasyonu) metodu ile optimizasyon yapılarak optimum geometri ile hacimsel derişiklikler belirlenmiş ve farklı akış hızlarında analizleri yapılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi, Ansys Fluent 18.1 ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

NUMERICAL INVESTIGATION OF NANOFLUID FLOW IN RECTANGULAR MICROCHANNEL WITH FINS

SUMMARY

Keywords: Micro Channel, Nano Fluid, Flap, CFD Analysis

In this study, the effect of the fins placed in the microchannel on the flow and heat transfer was investigated, numerically. In a single microchannel with rectangular cross section, six dual rectangular fins were placed in different layouts. The hydraulic diameter of the microchannel was kept constant and the length, width of the fins placed inside and the angle between the horizontal axis were determined as parameters. The water were selected as basic fluid and the effect of volumetric concentration of nanofluids (Al_2O_3 (0% to 0,4%)) and CuO (0% and 0,4%)) on fluid flow and heat transfer were investigated. As a result of the calculation, optimum volumetric concentrations and geometrhy were optimized with Response Surface Optimization method for the levels of different parameters and Computational fluid dynamics (CFD) analysis was performed at different flow rates. CFD analysis was performed with Ansys Fluent 18.1 commercial software.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu bölümde mikrokanal, kanatçık, nanoakışkan tanımlamaları ve uygulamalarına yer verilmiştir.

Günümüzde boyutları milimetre ve daha altı ölçeğe sahip cihazlar üzerine hem akademik hem de endüstriyel alanlarda çalışmalar giderek artış göstermiştir. Akış uygulamalarında mikro boyuttaki sistemlerin kullanılması, küçük hacimde daha büyük yüzey alanı oluşturmaları, küçük alanda çalışma imkânı sağlaması gibi birçok avantaj sağlamışlardır. 1980'lerden günümüze kadar olan süreçte mikro ölçek üzerine yapılan çalışmalar, genel olarak akış ve ısı geçişi özelliklerinin sayısal ve deneysel çalışmalarla incelenmesi şeklinde olmuştur. Bu araştırmalar makro sistemler için kullanılan geleneksel teorilerin mikro kanallara uygulanıp uygulanamayacağı sorusuna cevap aramış, özellikle 0,1 mm ve altı hidrolik çapa sahip kanalların mikrokanal olarak adlandırılabilirliğini vurgulamışlardır.

Mikrokanallarda tek fazlı zorlanmış akış etkin bir soğutma mekanizması olarak elektronik cihazlardan reaktör soğutma sistemlerine kadar çok geniş uygulama alanına sahiptir. Ayrıca içerisinde mikrokannallar bulunan bu minyatür cihazlar çevre, otomotiv, proses kontrolü, metroloji, savunma, havacılık, uzay, ecza, kimya, tıp ve biyoloji gibi çok çeşitli alanlarda kullanım alanına sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle elektronik cihazların soğutulmasına yönelik çalışmalar, mikrokannallarda çift fazlı akış sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Fakat çift fazlı akış sistemlerinde ortaya çıkan akış kararsızlıkları endüstriyellemenin önüne engel olmuştur. Bu nedenle 40 yılı aşkın süredir mikro ölçekli cihazlar konusu üzerine yapılan çalışmalar önemini yitirmeden devam etmektedir.

Isı transferini iyileştirme yöntemlerine bakıldığında nanoakışkanlar üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Nano akışkanlar, su, etilen ve propilen glikol gibi temel akışkan içerisine nanometre boyutundaki (<100 nm) bakır, alüminyum, gümüş, altın, silisyumdioksit katı parçacıklar katılarak oluşturulmuş süspansiyonlardır. Amaç geleneksel akışkanlardan daha iyi ısı özelliklere sahip akışkan elde ederek, ısı geçişini pasif olarak artırmaktır. Bir diğer pasif ısı iyileştirme yöntemi ise ısı geçiş yüzeyini kanat, çubuk, çıkıntı gibi araçlarla artırmaktır. Genişletilmiş veya uzantılı yüzeyler ısı geçişinin olduğu uzay araçları, uçaklar, soğutma, ısıtma, iklimlendirme, kimya ve petrokimya endüstrisi, elektronik, endüstriyel fırınlar, nükleer, güneş enerjisi ve geleneksel enerji santralleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genişletilmiş yüzeyler çeşitli geometrik biçimlerde, kanat ve çıkıntılar halinde ana yüzey ile birlikte dökülebilir veya ayrı olarak geçme, vidalama, kaynak gibi metodlarla ana gövdeye bağlanabilirler. Uygulamada en çok dikdörtgen kesitli ve dairesel (boru) kesitli kanatların kullanıldığı görülmektedir [1].

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde kanatçıklı, kanatçıksız mikrokanallarda nanoakışkan akışı ve ısı geçişi konularında yapılmış çalışmaların özeti bulunmaktadır.

2.1. Kanatçıklı Mikrokanallarda Akış ve Isı Geçişi

Isı transferi pasif teknikler olarak bilinen sınır tabaka kalınlığının azaltılması, ısı geçişi yüzey alanının artırılması ve türbülans artırma metotları ile iyileştirilebilmektedir. Makro ölçekli bir kanal içerisindeki ısı geçişi artırmak için kanalın içerisine üçgen, kare ve daire kesitli kanatçıklar yerleştirilmektedir. Bu kanatçıklar hem yüzey alanını artırarak ısı akısının daha hızlı dağıtılmasını sağlarken hem de akış içerisinde girdap üretici olarak görev yapmaktadır. Bu engeller veya kanatçıklar kanaldaki sürüklenme katsayısını arttırarak basınç düşümünde ise olumsuz etki yapmaktadır. Mikro ölçekli kanallarda tek fazlı akış ve ısı geçişi, sınır tabaka kalınlığının küçük olması sebebiyle elektronik ve benzeri cihazların soğutulması için ilgi görmekte, fakat basınç düşümünün fazla olması verimli bir soğutma yöntemi olarak kullanılmasının önünde bir engel teşkil etmektedir. Bu sebeple mikro ölçekte yapılan çalışmalar belli bir çalışma basıncı aralığında optimum geometrinin bulunmasına yönelmiştir.

Ma ve ark. [2] yaptıkları çalışmada aynı hidrolik çapa sahip dört dikdörtgen kanal içerisine boyuna yerleştirilmiş kanatçıkların akış ve ısı geçişine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Laminer akış koşullarında ($310 < Re < 4220$) basınç düşümünde %11,4 artışa karşılık ısı geçişinde % 101 oranında artış gözlemlemişlerdir.

Liu ve ark. [3] dikdörtgen bir kanal içerisinde yine boyuna yerleştirilmiş kanatçıkların akış ve ısı geçişine olan etkisini $170 < Re < 1200$ aralığında deneysel

olarak incelemişlerdir. Isı geçişinin kanal içerisine yerleştirilen kanatçıklar ile, laminar akış bölgesinde % 21 oranında, türbülanslı akış bölgesinde %90 oranında artırılabilceğini göstermişlerdir. Buna karşılık basınç düşümünde laminar akış koşullarında %83, türbülanslı koşullarda ise %169 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Uğurlubilek [4] yaptıkları çalışmada sabit duvar sıcaklığı koşullarında içerisine iki adet yarı dairesel engel yerleştirilmiş bir kanal içerisinde ısı geçişi ve akışı sayısal olarak araştırılmıştır. Akışkan olarak su kullanarak Reynolds sayısının 10000 ila 40000 aralığında türbülanslı akış için analiz yapmışlardır. Kanal yüksekliği ve boyu engel çapının (D) sırasıyla 4 ve 32 katı alınmıştır. Korunum denklemleri Fluent programıyla çözülmüş, ortalama Nusselt sayıları ve sürtünme katsayıları, içinde engel olan ve olmayan kanal için karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Isı geçişinde %47 'e varan iyileşme olduğunu göstermişlerdir.

Chen ve ark. [5] kanatçıklı dikdörtgen mikrokanallarda akış ve ısı geçişini incelemek için akışkan olarak su kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyler 350 ila 1500 aralığında değişen Reynolds sayıları için üç tarafı sabit duvar sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen mikrokanalların hidrolik çapları 160 μm ve 188 μm ile bunlara karşılık en-boy oranları 0,25 ve 0,0667 olduğu bildirilmiştir. Basınç kayıplarının kanatçıklı kanallarda sırasıyla % 40 oranında, ısı transfer performansının % 12.3 oranında arttığı bulunmuştur.

Abdollahi ve Shams [6] kanat tipi girdap oluşturunucularının şekli ve açısının, akışkanın akış ve ısı geçişi özelliklerine olan etkisi sayısal olarak araştırmışlardır. Kütle, momentum ve enerji denklemleri, kararlı, laminar ve sıkıştırılamaz akışkan akışını dikkate alarak sonlu hacim yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Ortalama Nusselt sayısı ve basınç düşümü, girdap üreticilerin değişik şekil ve açılardaki durumu araştırılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri, çok amaçlı genetik algoritma ve yapay sinir ağları bir araya getirilerek optimizasyon çalışması gerçekleştirmişler ve incelenen parametrelerin optimal değerleri sunulmuştur .

Ebrahimi ve ark. [7] girdap üreticilerine (kanatçık) sahip dikdörtgen mikrokanallarda tek fazlı laminar akış ve ısı geçişini sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, mevcut deneysel veriler ile karşılaştırılmış, %10 aralıkta uyum sağladığını rapor

etmişlerdir. Ayrıca kanatçık olan kanallarda Reynolds sayısının 100 ila 1100 aralığı için Nusselt sayısının %25 oranında artarken, buna karşılık sürtünme faktörünün %30 civarında yükseldiğini belirtmişlerdir.

Can [8] dikdörtgen kesitli geleneksel bir kanalda, akışa dik bir konumda yerleştirilen farklı çaplardaki dairesel olmayan engellerin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiş, analiz için Ansys CFX yazılımı kullanılmıştır. Kanal içindeki hava akışını, k- ϵ türbülans modeli kullanarak üç boyutlu modellemişlerdir. Kanal içerisinde altı farklı engel (dikey çubuk, yatay çubuk, kare, üçgen ve altıgen) için ortalama Nusselt sayıları araştırılmış, Nusselt sayısındaki en büyük artış, kanalın içine dikey çubuk yerleştirildiği zaman gerçekleştiğini rapor etmiştir.

Literatürde mikro ölçekte kanal içerisine yerleştirilen kanatçıkların ısı geçişini artırdığını buna karşılık basınç düşümünde arttığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Optimum basınç düşümü ve ısı geçişini sağlayacak geometrik çalışmalara ihtiyaç olduğu göze çarpmaktadır. Bu sebeple mikro ölçekte geometrik bir optimizasyon çalışması yapılarak, tek fazlı akış ve ısı geçişi karakteristiğinin ortaya konulması büyük önem arz etmektedir.

2.2. Kanatçıklı Mikrokanallarda Mamoakışkan Akışı ve Isı Geçişi

Günümüzde teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak gelişen ve minyatürleşen cihazlarda yeni soğutma yöntemlerine ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Mikro ölçekli kanallarda akış elektronik ve benzeri cihazlar için ilgi çekmekte, fakat basınç düşümünün fazla olması verimli bir soğutma yöntemi olarak kullanılmasının önünde bir engel teşkil etmektedir. Laminer akış koşullarında ısı geçişi özelliklerinin artırılması kanal içerisine kanatçık kullanımı ile mümkün olmakta, kanatçıklar hem yüzey alanını artırarak ısı akışının dağıtılmasına hem de akış içerisinde girdap üretici olmaktadır.

Xuan ve Roetzel [9] nanoakışkanın ısı transferini arttırma mekanizması incelemişlerdir. Nano-akışkanın, geleneksel bir katı-sıvı karışımından ziyade bir tek fazlı bir sıvı gibi davrandığı varsayımına dayanarak taşınım özellikleri ile termal dağılımın etkileri dahil edildiği iki farklı yaklaşım önermişlerdir. Nusselt sayısının,

baz akışkanın ve nanoparçacıkların ısı kapasitesine ve ısı iletkenliğine, nanoakışkanın viskozitesine, hacimsel parçacık oranına, akış türü kadar nanoparçacık boyutu ve şekli gibi aşağıdaki faktörlere bağlı olduğu belirtmişlerdir.

$$Nu_{nf} = f\left(Re, Pr, \frac{k_p}{k_f}, \frac{(\rho c_p)_p}{(\rho c_p)_f}, \phi, \text{parçacık şekli ve boyutu, akış yapısı}\right) \quad (2.1)$$

Akbarinia ve Behzadmehr [10] kavisli yatay bir tüpte Al_2O_3 -su' dan oluşan bir nanoakışkanın tam gelişmiş laminar karışık taşınımı sayısal olarak incelenmiştir. Üç boyutlu eliptik ana denklemler kullanılmıştır. Kaldırma kuvveti, merkezkaç kuvveti ve nanopartiküller konsantrasyonunun eşzamanlı etkileri sunulmuştur. Nanoparçacıkların hacimsel derişiminin ikincil akış, aksenel hız ve yüzey sürtünmesi üzerinde doğrudan bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, tüm sıvı sıcaklığı üzerindeki etkisi, kaldırma kuvvetinin büyüklüğünün merkezkaç kuvvetine kıyasla önemli hale gelmesi durumunda hidrodinamik parametreleri etkilediği bildirmişlerdir. Verilen bir Reynolds sayısı için, kaldırma kuvveti Nusselt sayısı üzerinde olumsuz bir etkiye sahipken, nanopartikül konsantrasyonundaki artış ısı transferi iyileştirmesinde olumlu bir etkiye sahiptir.

Li ve Kleinstreuer [11] iki etkili termal iletkenlik modeli, Brownian hareketine dayalı yeni KKL (Koo-Kleinstreuer-Li) modelinin, mevcut deneysel veri setleriyle uyum sağladığını göstermişlerdir. Ticari HAD yazılımı Ansys CFX-10 kullanılarak, trapez (yamuk) mikrokana1 içindeki nanoakışkan akışının termal performansı saf su ve CuO -su (%1 ve %4 hacimsel derişime sahip) kullanılarak analiz etmişlerdir. Sonuçlar, nanoakışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalarda basınç düşümünde artışa karşılık termal performansının ölçülebilir şekilde arttırdığını göstermiştir. Nanoakışkanlı mikrokana1 soğutucuların gelecek nesil soğutma cihazları için iyi bir aday olduğuna vurgu yapmışlardır.

Akbari ve ark. [12] yatay ve eğimli tüplerde Al_2O_3 -su'dan oluşan bir nanoakışkanın tam gelişmiş laminar akışını olarak sayısal incelemişlerdir. Üç boyutlu eliptik ana denklemleri, Grashof ve Reynolds sayılarının geniş bir aralığında akış davranışlarını araştırmak için çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, yatay ve eğimli bir borularda önceden yayınlanmış deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırmalar yapmışlardır.

Nanopartikül hacimsel derişiminin hidrodinamik ve termal parametreler üzerindeki etkileri sunulmuştur. Nanopartikül hacimsel derişiminin hidrodinamik parametreler üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Isı transfer katsayısı Al_2O_3 'te %4 ila %15 arttığı görülmüştür. Ancak ısı transfer katsayısı, 45'lik eğim açısında maksimuma ulaştığı rapor edilmiştir.

Akbarinia ve Laur [13] tarafından, %1 hacimsel derişimli Al_2O_3 -su nanoakışkanlı dairesel bir kavisli bir boruda laminar ısı transferi üzerine sayısal çalışma yapılmıştır. Akış alanını incelemek için iki fazlı akış modeli ve kontrol hacmi tekniği uygulanmıştır. Parçacık çapının hidrodinamik ve ısı parametreler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Katı partikül çapının artırılması Nusselt sayısını azaltırken, eksenel hızı artırmıştır. Parçacıklar, nanometre cinsinden olduğu için, parçacıkların çapını arttırmak, akış davranışlarını değiştirmedeği belirtilmiştir.

Namburu ve ark. [14] etilen glikol temel akışkanlı üç farklı nanoakışkanın (CuO , Al_2O_3 ve SiO_2) sabit ısı akısı koşulunda dairesel bir tüpten türbülanslı akış ve ısı transferi sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmadaki nanoakışkanların viskozite değerleri için hacimsel derişim %10'a kadar deneylerden yeni korelasyonlar geliştirilmiştir. Nanoakışkanların tüm termofiziksel özellikleri sıcaklığa bağımlı olup, hesaplanan sonuçlar mevcut korelasyonlarla doğrulanmıştır. Nanoakışkanlar için Nusselt sayı tahmini Gnielinski korelasyon ile uyumlu olduğu görülmüştür. Daha küçük çaplı nanopartiküller içeren nanoakışkanların daha yüksek viskoziteye ve Nusselt sayısına sahip olduğu bulunmuştur. CuO , Al_2O_3 ve SiO_2 nanoakışkanların konvektif ısı transfer katsayısının karşılaştırılması yapılmıştır. Reynolds sayısı sabit kalırken, %6 hacimsel derişikli CuO -su nanoakışkanı için Nusselt sayısında %35 oranında artış görülmüştür.

Abu-Nada ve Oztop [15] tarafından CuO -su nanoakışkan ile doldurulmuş iki boyutlu bir plakada eğim açısının doğal konveksiyon ısı transferi ve akışı üzerindeki etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Nanoakışkanların performansı, katı parçacık dağılımını dikkate alarak elde edilmiştir. Eğim açısı 0° ile 120° derece arasında değiştirilmiş, akış ve ısı transferi için bir kontrol parametresi olarak kullanılmıştır. Yönetici denklemler $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ Rayleigh aralığı için sonlu hacim tekniği ile

çözölmüştür. Nanopartikölün hacimsel derişiminin artması Nusselt sayısını arttırdığı belirtilmiştir.

Bianco ve ark. [16] çalışmalarında duvarda sabit ve düzgün bir ısı akısına gönderilen dairesel bir tüpte bir Al_2O_3 -su nanoakışkanının laminar zorlanmış taşınım akışının geliştirilmesi sayısal olarak incelemişlerdir. Tek ve iki fazlı bir model (ayrık parçacıklar modeli), sabit ve sıcaklığa bağlı özelliklerle kullanılmıştır. Araştırma, 100 nm'ye eşit boyuttaki partiküller için gerçekleştirilmiştir. Tek ve iki fazlı modeller arasında ortalama ısı transfer katsayısı arasındaki maksimum fark % 11 olduğu belirtilmiştir. Nanoakışkanlar için ısı transfer katsayısı, baz sıvınınkinden daha büyük olduğu, hacimsel derişikliğin artması ile ısı transferinin arttığı görölmüştür. Reynolds sayısı arttıkça ısı transferinin arttığı, bununla birlikte basınç düşümünde artış gözlenmiştir.

Mohammed ve ark. [17] tarafından dikdörtgen şekilli mikrokanal soğutucuda nanoakışkan kullanımının ısı transferi ve akışkan akış özellikleri üzerindeki etkisi 100 ile 1000 Reynolds sayı aralığı için sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada,%1 ile %5 arasında değişen hacimsel derişime sahip Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılarak yapılan mikrokanal soğutucunun performansı üç boyutlu kararlı, laminar akış ve ısı transferi sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Mikrokanal soğutucunun performansı sıcaklık profili, ısı transfer katsayısı, basınç düşüşü, sürtünme faktörü, kayma gerilimi ve ısı direnç açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, nanopartiküllerin hacimsel derişimi yüksek ısı akısı altında arttığında, hem ısı transfer katsayısının hem de kayma gerilmesinin arttığını göstermektedir. Bu nedenle, nanopartiküllerin varlığı, yüksek akı koşulları altında mikrokanal soğutulmasının optimum nanopartiköl değeri ile arttırılabildiği vurgulanmıştır. Saf su soğutmalı mikrokanal ile karşılaştırıldığında, basınç düşüşünde bir artış olduğu da rapor edilmiştir.

Lelea [18] Al_2O_3 -su nanoakışkanın bir mikrokanallı ısı değıştiricisindeki akış ve ısı geçişini sayısal olarak incelemişlerdir. Kare mikrokanal ve hidrolik çapı, D_h , 50 μm olan mikrokanallı soğutucu, ısıtma ve soğutma durumlarında ısı akısı ($35 W/m^2$) sabitlenmiştir. Al_2O_3 -su nanoakışkanı, çeşitli hacimsel derişikliğe sahip ($\phi = \%1$ ile $\%9$) ve partiköl çapı 13,28 ve 47 μm olan Al_2O_3 -su nanoakışkanının hacimsel

derişikliği ve partikül çapının akış ve ısı geçişine olan etkileri incelenmiştir. Analizde viskoz ısınmanın, ısı transferi iyileştirilmesi üzerindeki etkisini vurgulamışlardır. Hacimsel derişim ve Reynolds sayısı arttıkça ısı transferi artmıştır. Daha yüksek pompalama güçleri için, nanoakışkan soğutulursa, ısı transferinde iyileşme daha yüksek olmuştur. Partikül apı arttıkça, ısı transferinin artması azalmıştır.

Mokhtari Moghari ve ark. [19] iki fazlı karışım modeli ve nanoakışkan özelliklerinin kullanılarak sabit ısı akısı koşulunda bir halka içerisinde karışık konveksiyonlu laminer Al_2O_3 -su nanoakışkan akışının ısı transferinin iyileştirilmesini incelemişlerdir. Brownian nanopartiküllerin hareketlerinin, sıcaklığa bağlı olarak etkin termal iletkenliği ve Al_2O_3 -su nanoakışkanın etkin dinamik viskozitesini belirlediği kabul edilmiştir. Üç boyutlu Navier-Stokes, enerji ve hacim kesri denklemleri sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözölmüştür. %0 ile %0.05 arasındaki nanoparçacıkların hacimsel derişimi, Grashof ve Reynolds sayılarının farklı değerleri için nümerik simölasyonlar sunulmuştur. Hesaplanan sonuçlar, belirli bir Re ve Gr'da artan nanopartiküllerin hacim derişiminin, iç ve dış duvarlardaki Nusselt sayısını artırırken, sürtünme faktörü üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Hem Nusselt sayısı hem de iç duvardaki sürtünme katsayısı, dış duvarda karşılık gelen değerlerden daha fazla olduğu görölmüştür.

Hung ve ark. [20] nanoakışkanlar kullanarak bir 3D mikrokana1 soğutucuda ısı transferinin iyileştirilmesi, sayısal bir çalışma ile incelenmiştir. Nanoparçacıkların soğutucu akışkan akışına eklenmesi, termofiziksel özelliklerini (nanoparçacık tipi, baz akışkan, parçacık hacmi derişimi, parçacık büyüklüğü ve pompalama gücü) değiştirir. Bu çalışmada yapılan hesaplamalar, Al_2O_3 -su nanoakışkan soğutmalı bir mikrokana1 soğutucu sistemi kullanılarak ısı transferinde iyileşme elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, daha düşük dinamik viskoziteli (su gibi) baz sıvıların ve yüksek termal iletkenliğe sahip substrat malzemelerin kullanılması, mikrokana1 soğutucunun termal performansını arttırmıştır. Sonuçlar, nanoakışkanın partikül hacimsel derişimi arttıkça, termal direncin önce azaldığı sonra arttığı da göstermiştir. Orta derecede bir partikül ebatları aralığı için, daha küçük nanopartiküllü nanoakışkanlar kullanıldığında daha iyi performans sağlamıştır. Al_2O_3 -su ve elmas-su nanoakışkanlarının ısı transfer performansı, saf sudan % 21.6 daha iyi olduğu görölmüştür.

Kalteh ve ark. [21] Al_2O_3 -su nanoakışkan akışının geniş dikdörtgen bir mikrokanal soğutucu (sırasıyla 94.3 mm, 28.1 mm ve 580 mm; uzunluk, genişlik ve yükseklik) içindeki laminar konvektif ısı transferini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma için, cam tabakalara sahip bir silikon gofret kullanılarak bir mikrokanallar imal edilmiştir. Sayısal çalışmada sonlu hacim yaklaşımı kullanılarak iki fazlı bir Eulerian Eulerian yöntemi tercih edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması, iki fazlı sonuçların deneysel sonuçlarla homojen (tek fazlı) modellemeden daha iyi uyum içinde olduğunu göstermiştir. Homojen ve iki fazlı yöntemler için deneysel sonuçlardan maksimum sapma sırasıyla %12.61 ve % 7.42'dir. Bu bulgular, iki fazlı yöntemin, nanoakışkan ısı transferini simüle etmek için homojen yöntemden daha uygun olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, iki fazlı sonuçlar, fazlar arasındaki hız ve sıcaklık farkının çok küçük ve önemsiz olduğunu göstermektedir. Dahası, ortalama Nusselt sayısı, Reynolds sayısında ve hacimsel derişimde bir artışla artmış, nanoparçacık boyutunda düşmesiyle yükselmiştir.

Ahmed ve ark. [22] girdap üreteçli üçgen bir kanal içinde akan farklı nanoakışkanların iki boyutlu laminar akışı sayısal olarak incelemişlerdir. Kütle, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Nanopartiküllerin tipinin, partikül konsantrasyonlarının ve Reynolds sayısının nanoakışkanların ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Reynolds sayısı 100 ila 800 arasında değişmektedir. Sabit bir yüzey sıcaklığının, üst ve alt ısıtılmış duvarlar için termal koşul olduğu varsayılmaktadır. Bu çalışmada, nanoparçacık konsantrasyonları %1 ila %6 arasında değişen etilen glikolün baz sıvısında süspansiyona alınmış Al_2O_3 , CuO ve SiO_2 olan üç nanoakışkan incelenmiştir. Sonuçlar, SiO_2 -etilen glikol için Reynolds sayısının 800, hacimsel derişim %6 olduğu durumda ortalama Nusselt sayısının % 50.0 daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Wang ve Zhao [23] küçük ölçekli bir dairesel silindir girdap üreteçli dikdörtgen bir kanalın akış karakteristikleri ve ısı transfer performansı, Large Eddy Simulation (LES) ile sayısal olarak incelenmiştir. Dairesel silindir ve alt kanal arasındaki boşluğun dairesel silindir G/D çapına oranı, 0 ila 6 arasında değişmektedir. Küçük ölçekli girdap üreteçinin varlığının akış ve ısı aktarım özellikleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Sonuçlar, küçük ölçekli girdap üreteçli dikdörtgen kanalın ısı performansı belirgin şekilde geliştirilebildiğini göstermiştir.

Wu ve ark. [24] Al_2O_3 -su nanoakışkanın mikrokanallı soğutucunun genel performansını arttırmadaki etkinliği SIMPLEC algoritması kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, soğutucu olarak akışkanın saf su olduğu durumdaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Nanoakışkanın, mikrokanallı soğutucunun ısı kapasitesini iyileştirmedeki etkinliği, elektronik cihazın verilen pompalama gücü ile ilgili olduğuna vurgu yapılmıştır. Soğutucu olarak Al_2O_3 -su nanoakışkanın kullanılarak ısı transferinin artırılabilceği ve pompalama gücünden tasarruf etmek için orta bir giriş hızı tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Izadi ve ark. [25] termal denge modeli kullanılarak, yan gözenekli bir plaka içindeki nanoakışkanın doğal taşınımının sayısal olarak incelemişlerdir. Isı transferi ve nanoakışkan akışının oranları, nanoakışkan akış çizgileri, sıvı ve katı faz izotermeleri ve mikro rotasyonun konturlarını sunmak suretiyle yaygın olarak dikkate alınmıştır. Sayısal sonuçlar önceki referanslarla doğrulanmış ve iyi bir uyum gözlenmiştir. Sonuçlar, gözenekli ortamın termal olmayan denge modelinin, ısı transfer arayüzü parametresinin yanı sıra termal iletkenlik oranı parametresini artırarak termal dengeye yaklaştığını doğrulamaktadır. Bir mikropolar akışkan akışının karakteristik denklemleri, gözenekliliğin ve gözeneklerin boyutunu artırarak klasik Navier-Stokes denklemlerine dönüştürülür. Sonuçlar, termal iletkenlik oranı artmasından dolayı sıvı fazın termal direncinin azaltılmasının, gözenekli ortam yoluyla ısı transfer hızını artırabildiğini göstermektedir.

Naphon ve Wiriyaart [26] tarafından kombine (pasif+aktif) bir ısı transferi iyileştirme teknikleri; titreşimli akış, nanoakışkanlar, mikro kanatçıklı tüpler kullanılarak akış ve ısı geçiş özellikleri incelenmiştir. Deneyler, hacimsel derişimi %0.25 - %0.50 arasında olan nanoakışkan ile 1000 ila 2400 arasında değişen Reynolds sayısı koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada nanoakışkanın giriş sıcaklığı $20^{\circ}C$, duvar ısı akısı 120-160 W iken, nanoakışkanın titreşim hızı 10-20 Hz olarak alınmıştır. Sonuçlar, ısı transferinin nanopartiküün hacimsel derişimindeki artış, manyetik alan kuvveti ve frekans titreşiminin artışı ile arttığını göstermiştir.

Elcioglu ve ark. [27] tarafından Al_2O_3 -su nanoakışkan kullanılarak farklı nanoakışkan derişikliği ve nano partikül çapları için deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel veriler Taguchi deney tasarımına (L8) dayanarak toplanmıştır. Deney özelliklerinin nanoakışkan viskozitesi ve nispi viskozite üzerindeki etkilerini belirlemek için Taguchi Metodu ile istatistiksel analizler yapılmıştır. Nanoakışkanların viskozitesi sıcaklıkla (20° - $50^{\circ}C$) azalma göstermiş nanopartikülün hacimsel derişimi ile artmıştır (hacimsel derişim %1- %3). Ayrıca nanopartikül çapıyla biraz artışı sağlandığı da vurgulanmıştır ($10 \pm 5 \mu m$, $30 \pm 10 \mu m$). Taguchi Analizi, nanoakışkan viskozitesi üzerindeki parametrelerin öneminin, sıcaklık, nanopartikülün hacimsel derişimi ve nanoparçacık çapı olarak düşükten yükseğe doğru sıralanabileceğini ortaya koymuştur. Sonuçlar sıcaklık ve nanopartikül hacimsel derişim etkisinin nanoakışkan viskozitesi üzerinde %5 oranında önemli etkiye sahip olduğunu göstermiş, bu nedenle nanopartikülün hacimsel derişim etkisinin farklı sıcaklıklarda farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca termal ve akış özelliklerinin aynı anda göz önünde bulundurulması gerektiği öne sürülmüştür.

Ebrahimi ve ark. [28] uzunlamasına dikdörtgen girdap oluşturunclar yerleştirilmiş bir mikrokana! soğutucuda nanoakışkan akışını sayısal olarak incelemişlerdir. Üç boyutlu simülasyonlar tek fazlı akış modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, saf suya göre basınç düşüşünün % 3.5 ila 16 arasında arttığını göstermiştir. Ayrıca aşağıdaki formülasyona göre verim hesaplanmış, toplam verimin çalışmada kullanılan nanoakışkanlarla %50 oranında artırılabilceğini göstermişlerdir.

$$\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_{baz}} \right) \left(\frac{f_{baz}}{f} \right)^{1/3} \quad (2.2)$$

Tablo 2.1. Literatürde yapılan sayısal çalışmaların özeti

Referans	Nanoakışkan	Hacim Değişikliği Aralığı %	Geometri	Bulgular
[9]	Al ₂ O ₃ -su	% 0 , %2 ve %4	Kavisli Tüp	Nanopartiküllerin hacimsel derişimi ısı transferini arttırdığı belirtilmiştir.
[10]	CuO-su	% 1 ile %4	Trapez (yamuk)	Nanoakışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalarda basınç düşümünde artışa karşılık termal performansının ölçülebilir şekilde arttırdığını göstermiştir.
[11]	Al ₂ O ₃ -su	%0 ile %0,04	Yatay ve eğimli tüp	Nanoakışkanların ısı iletim katsayısı 45'lik eğim açısında maksimuma ulaştığı sonucuna varılmıştır.
[12]	Al ₂ O ₃ -su	%0 ile %1	Dairesel kavisli tüp	Nanopartikül çapının artırılması, Nusselt sayısını azaltırken eksenel hızı artırmıştır.
[13]	CuO-su, Al ₂ O ₃ ve SiO ₂	%1 ile %10	Dairesel tüp	Daha küçük çaplı nanopartiküller içeren nanoakışkanların daha yüksek viskoziteye ve Nusselt sayısına sahip olduğu bulunmuştur.
[14]	CuO-su	%0 ile %0,1	Dikdörtgen plaka	Nanopartikülün hacimsel derişimi artırıldıkça Nusselt sayısı üzerindeki etkisinin de arttığı görülmüştür.

Tablo 2.1. (Devamı)

[15]	Al ₂ O ₃ -su	% 0 ile %4	Dairesel tüp	Isı transferinin artırılması, partikül hacminin konsantrasyonu ile birlikte artırıldığı görülmektedir.
[16]	Al ₂ O ₃ -su	%1 ile %5	Dikdörtgen	Nanopartiküllerin hacimsel derişimi yüksek ısı akısı altında arttığında, hem ısı transfer katsayısının hem de kayma gerilmesinin arttığını, mikrokanal soğutucuda termal direncinin azaldığını göstermektedir.
[17]	Al ₂ O ₃ -su	%1 ile %9	Kare	Nanopartikülün hacimsel derişimi arttıkça, ısı transferi artmıştır. Parçanın çapı arttıkça, ısı transferinin artması azaldığı belirtilmiştir.
[19]	Al ₂ O ₃ -su, Elmas-su	%1 ile %5	Dikdörtgen	Al ₂ O ₃ -su ve elmas-su nano-akışkanlarının ısı transfer performansı, saf sudan % 21.6 daha iyi olduğu görülmüştür.
[20]	Al ₂ O ₃ -su	%0,01 ile %0,05	Dikdörtgen	Nusselt sayısı ve Reynolds sayısı, hacimsel derişimde artış ile nanoparçacık boyutunda ise düşüşle artmaktadır.
[21]	CuO-EG, Al ₂ O ₃ -EG ve SiO ₂ -EG	%1 ile %6	Üçgen	SiO ₂ -EG nanoakışkanı diğerlerine göre en iyi ısı performans göstermiştir.

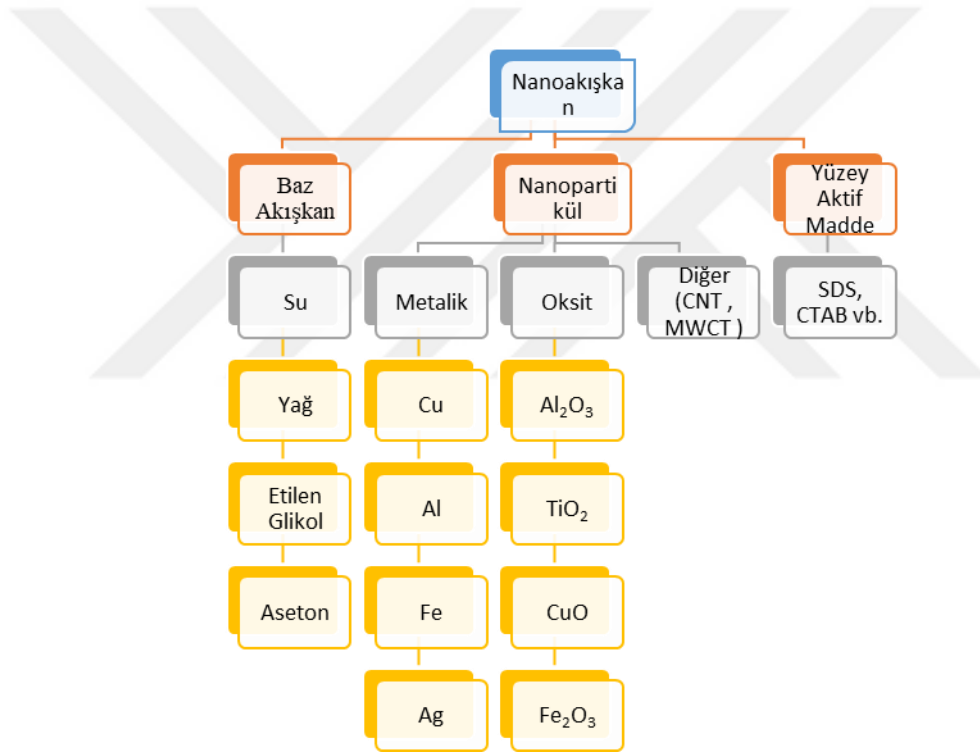
Tablo 2.1. (Devamı)

[23]	Al ₂ O ₃ -su	%1 ile %4,5	Dikdörtgen	Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanın viskozitesi hakkında güvenilir deneysel veriler kullanarak pompalama gücünde çok artış olduğunu göstermiştir.
[24]	CuO-su	%0 ile %0,8	Kare	Termal iletkenlik oranı artmasından dolayı sıvı fazın termal direncinin azaltılmasının, gözenekli ortam yoluyla ısı transfer hızını artırabildiğini göstermektedir.
[27]	Al ₂ O ₃ -su CuO-su	ve %1 ile %5	Dikdörtgen	Tek fazlı akış modeli kullanılmış, baz akışkana oranla basınç düşüşünde maksimum % 16, termal verimde %50 artış rapor edilmiştir.

BÖLÜM 3. TEORİK ESASLAR

3.1. Nanoakışkanlar

Nanoakışkanlar, su, etilen ve propilen glikol gibi ısı transfer akışkanlarında süspansiyon haline getirilmiş nanometre boyutundaki (<100 nm) katı parçacıklardan oluşan yeni bir katı-sıvı kompozit sınıfıdır [29].



Şekil 3.1. Nanoakışkanın sentezlenmesi için yaygın baz akışkanlar, nanopartiküller ve yüzey aktif cisimleri

Nanoakışkanların genel özellikleri aşağıda sıralanmıştır [30].

- Kararlıdır.
- Homojen dağılım gösterirler.
- Nanopartiküllerin kümelenme oluşumunu olabildiğince azaltır.
- İçinden geçtiği kanallarda çökme ve tıkkama oluşturmaz.
- Pompalama kayıplarını ciddi derecede arttırmaması

- f. Termofiziksel özelliklerinin iyileşmesini sağlar.

Nanopartiküllerin katılması ile iş yapan akışkanın ısı transferi performansının önemli derecede iyileşmesine neden olan temel fiziksel olaylar [31].

- Akışkan içerisine süspanse edilen partiküller akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini büyütür.
- Partiküller akışkanın efektif ısı kapasitesini artırır.
- Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar akışkanın ve akış geçitinin yüzeyinin artmasına neden olur.
- Akışkanın çalkantıları ve türbülans şiddeti artar
- Nanopartiküllerin saçılması akışkanın enine sıcaklık eğiminin düzleşmesine neden olur.

3.2. Nanoakışkan Hacimsel Derişim, Yoğunluk, Özgül Isı Denklemleri

Nanoakışkanların hacimsel derişimlerine bağılı olarak literatürde yaygın kullanılan denklemler aşağıda sıralanmıştır [32].

3.2.1. Nanoakışkan hacimsel derişimi

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{nf}} = \frac{\rho_{nf} - \rho_{bf}}{\rho_{np} - \rho_{bf}} \quad (3.1)$$

3.2.2. Nanoakışkanların yoğunluğu

Nanoakışkanların yoğunluğu, denklem genellikle Pak ve Cho'nun önerdiği denkleme dayandırılır.

$$\rho_{nf} = \rho_{np}\phi + \rho_{bf}(1 - \phi) \quad (3.2)$$

3.2.3. Nanoakışkanların özgül ısı

Nanoakışkanların özgül ısı, denklem de genellikle Xuan ve Roetzel'in önerdiği denkleme dayandırılır.

$$\rho_{nf}c_{nf} = \rho_{np}c_{np}\phi + \rho_{bf}c_{bf}(1 - \phi) \quad (3.4)$$

3.2.4. Nanoakışkanların viskozite denklemleri

Bu modelde, parçacıkların küresel olduğu ve aralarında etkileşim olmadığı kabulü vardır [33].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi \quad (3.5)$$

Einstein Modeli'nin orta büyüklükçe ($\phi > \%5$) sahip parçacıkların hacimsel derişime uyarlanmış halidir [34].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 - \phi)^{-2.5} \quad (3.6)$$

Einstein Modeli'nin parçacıkların hacimsel derişime göre Taylor serisi açılımıdır [35].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + 6.25\phi^2 \quad (3.7)$$

Partiküllerin Brownian hareketi etkisini içerir [36].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2 \quad (3.8)$$

Bu ifade, birçok araştırmacının deneysel olarak bulduğu 233 veriye eğri uydurma ile elde edilmiştir Bu denklemin şartları: a. Küresel nanopartiküller, b. 20 – 150 nm çaplı nanopartiküller, c. 20 – 70 °C sıcaklık aralığı, d. %4'ten küçük nanoakışkan hacimsel derişimine sahip olması gerekmektedir [37].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + \phi)^{11.3} \cdot \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{-0.038} \cdot \left(1 + \frac{d_{np}}{170}\right)^{-0.061} \quad (3.9)$$

3.2.5. Nanoakışkanların iletkenlik denklemleri

Çift fazlı karışımlar için verilen ilk denklemdir. küresel partiküller için geçerlidir [38].

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (3.10)$$

Partiküllerin şekil etkilerini de içeren geliştirilmiş Maxwell ifadesidir [39].

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (n-1)(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (3.11)$$

Rasgele dağılmış partiküller arasındaki etkileşimleri içeren Bruggeman'ın modelidir [40].

$$k_{nf} = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_{np} + (2 - 3\phi)k_{bf}] + \frac{k_{bf}}{4}\Delta^{0.5} \quad (3.12)$$

$$\Delta = (3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)$$

Değişken ısı iletkenlikli nanotabaka içeren geliştirilmiş Yu&Choi ifadesidir [42].

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 3\theta\phi_{eq} + \frac{3\theta^2\phi_{eq}^2}{1 - \theta\phi_{eq}}$$

$$\theta = \frac{(1 + \beta)^3 - \beta_{np-nl}/\beta_{bf-nl}}{(1 + \beta)^3 + 2\beta_{nl-bf}\beta_{np-nl}} \cdot \beta_{nl-bf}$$

$$\beta = h/r$$

$$\beta_{np-nl} = \frac{k_{np} - k_{nl}}{k_{np} + 2k_{nl}}, \quad \beta_{bf-nl} = \frac{k_{bf} - k_{nl}}{k_{bf} + 2k_{nl}}, \quad \beta_{nl-bf} = \frac{k_{nl} - k_{bf}}{k_{nl} + 2k_{bf}} \quad (3.14)$$

$$k_{nl} = \frac{M^2}{(M - \beta)\ln(1 + M) + \beta M} \cdot k_{bf}$$

$$M = \sigma(1 + \beta) - 1,$$

$$\sigma = k_{np}/k_{bf},$$

$$\phi_{eq} = \phi(1 + \beta)^3, \quad \beta = h/r$$

3.3. Temel Denklemler

3.3.1. Süreklilik denklemi

Akış temel denklemleri, fiziksel sistemler için üç koruma kanunudur.

- Kütlenin korunumu (süreklilik)
- Momentumun korunumu (Newton'un ikinci yasası)
- Enerjinin korunumu (Termodinamiğin birinci yasası)

Bir akışkanın içinde bulunduğu durumlarda kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Kartezyen kordinatlarda kütlenin korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir. Akış esnasında yoğunluk değişiminin çok küçük olduğu durumlarda akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilmektedir.

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.16)$$

Sıkıştırılmaz akış için gerekli sadeleştirmeler yapıldığında süreklilik denklemi:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.17)$$

Denklemden kullanılan u,v,w sırasıyla x,y ve z yönlerindeki hızları temsil etmektedir [44].

3.3.2. Momentum denklemleri

Bir cismin kütlesi ile hızının çarpımı, cismin doğrusal momentumunu ya da sadece momentumu olarak adlandırılır.

“m kütleli”, V hızıyla hareket eden rijit bir cismin momentumu $m \cdot \vec{V}$ dir.

Bu durumda Newton'un 2. yasası, bir cismin momentumunun değişim hızı, cisme etkiyen kuvvete eşittir şeklinde de ifade edilirken, Newton'un ikinci yasası, akışkanlar mekaniğinde genellikle doğrusal momentum denklemi olarak bilinir.

Böylece Newton'un 2. Yasası için şu tanım yapılabilir; bir sisteme etkiyen dış kuvvetlerin toplamı, sistemin doğrusal momentumunun birim zamandaki değişimine eşittir, şeklinde ifade edilebilir.

Momentum denkleminin genel ifadesi;

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)(\rho \vec{V}) = -\vec{V} P + \mu(\nabla^2 \vec{V}) + \vec{g}(\rho - \rho_0) \quad (3.18)$$

şeklindedir. Burada $\vec{V}, \nabla$ vektörel büyüklükler olup gradyan ve hız vektörlerini, ρ_0 ise referans sıcaklıkta akışkan yoğunluğunu temsil eder. Sürekli şartlarda yukarıdaki varsayımlar da dikkate alınarak bu denklemler aşağıdaki şekilde yazılabilir.

x- yönündeki momentum denklemi

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (3.19)$$

y- yönündeki momentum denklemi

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(u \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \beta g(T - T_0) \quad (3.20)$$

$\beta g(T - T_0)$ ifadesi fiziksel olarak kaldırma kuvveti (buoyancy force) olarak tanımlanır ve akışkanın yoğunluk değişimi etkisiyle ivmelenmesini gösterir. T_0 ise referans sıcaklığını göstermektedir.

z- yönündeki momentum denklemi

$$\left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(u \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (3.21)$$

3.3.3. Enerji denklemi

Enerji denkleminin genel ifadesi,

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)(\rho T) = \frac{k}{c_p} (\nabla^2 T) \quad (3.22)$$

şeklindedir. Burada $\vec{V}, \nabla$ vektörel büyüklükler olup gradyan ve hız vektörlerini temsil eder. Sürekli şartlarda yukarıdaki varsayımlar da dikkate alınarak bu denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = a \left(u \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.23)$$

Burada $a = \frac{k}{\rho c_p}$ ısıl yayılım katsayısıdır

3.4. Mikrokanallarda Ölçek Etkileri

İlk yapılan çalışmalar mikro ölçekli sistemlere ait deney sonuçlarının geleneksel teori ile elde edilen verilerden farklı olduğunu göstermişti. Fakat gelişen ölçme ve görüntüleme yöntemleri 15 mikrometre'den büyük hidrolik çaplara sahip kanallarla yapılan çalışmalar ölçek etkilerinin dâhil edilmesi ile geleneksel teorilerin geçerliliğini koruduğunu göstermiştir [45]. Ölçek etkilerinden kasıt; makro ölçekte genellikle gözardı edilen giriş bölgesi etkisi, viskoz ısınma, eksenel ısı iletimi, ısı kayıpları, pürüzlülük ve seyrelme etkileridir.

Hesaplanamayan ısı kayıpları mikro ölçekli sistemlerde; ısı girişi oldukça küçük olduğundan birkaç “Watt” düzeyinde olsa bile elde edilen sonuçları yanlış yorumlamaya sebebiyet vermektedir. Bu nedenle, sistemden ısı kayıplarını azaltmak ve doğru ölçüm yapmak gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda genellikle bu işlem test bölümünün bir vakum odasına alınmasıyla mümkün olmaktadır. Isı kayıpları akışkanın ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle laminar akışta, ısı kayıplarını göz önünde bulundurmadan değerlendirilen veriler, geleneksel teoriyle

ilgili tahminlerden önemli ölçüde farklıdır. Yine eksenel ısı iletimi makro ölçekli kanallarda özellikle düşük Re sayılarında ihmal edilirken mikro ölçekli kanallarda dikkatle hesaplanması gerekir. Özellikle, düşük ısı girişi ve düşük ısı kapasitesi nedeniyle gaz ortamlarda ihmal edilemez. Kandlikar a göre;

$$\frac{Nu_{k0}}{Nu_{th}} = \frac{1}{1 + 4 \frac{k_w A_{h,s} Nu_{th}}{k_f A_f (RePr)^2}} \quad (3.24)$$

Eksenel iletim etkisinin Reynolds değerinin 1000'den yüksek olduğu için önemsiz olduğu görülmekte, daha büyük değerlerinde ise hesaba katılması gerekmektedir.

Viskoz ısınma etkileri, düşük hızlardan ötürü hem mikro ölçekli hem de makro ölçekli sistemlerde gaz veya sıvı akışlarda ihmal edilebilir. Bununla birlikte yüksek hızlarda viskoz ısınma nedeniyle oluşan termal enerji, sıvıya ilave ısı girişi sağlar, Isıtma, sıvı sıcaklığını artırır ve hesaplanan ısı transferi buna göre değiştirilir. Deneysel ısı transfer katsayısını doğru bir şekilde değerlendirmek için, viskoz ısıtma etkisini dâhil etmek gerekmektedir. Viskoz ısınma;

$$\begin{aligned} \phi = 2\mu \left\{ \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) \right]^2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ \left. \frac{1}{2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.25) \end{aligned}$$

Kararlı ve homojen bir akış olduğunu varsayarak burada;

$$v_\theta \approx 0, \quad \frac{\partial}{\partial \theta} \approx 0, \quad \partial w \approx 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \approx 0$$

$$\phi = 2\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2$$

şeklinde ifade edilir.

BÖLÜM 4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ VE PARAMETRİK OPTİMİZASYON

Bu bölümde, dikdörtgen kesite sahip, içerisine farklı yerleşim düzenlerinde dikdörtgen kanatçıklar yerleştirilmiş bir mikrokanalda newton tipi, tek fazlı laminar nanoakışkan akışının dört farklı HAD analizine yer verilmiştir. Herbir analizde mikrokanal ve kanatçık sayıları aynı olup, kanatçık parametreleri, akışkan tipleri ve ısı şartlar değişkenlik göstermektedir. Analizlerde temel akışkan su seçilmiş, farklı oranlarda alimuna ve bakıroksit nano partiküllü (Al_2O_3 (%0 ila %0,4) ve CuO (%0 ila %0,4)) nanoakışkanlar kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi, Ansys Fluent 18.1 ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Günümüzde akış ve ısı geçişinin olduğu mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizinde, deney yapma ve hesaplama olarak iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) akış alanının ayrıklaştırılmış bir ağı üzerinde alan değişkenlerini miktar olarak hesaplamak üzere konum yasalarının sınır ve başlangıç şartları ile beraber matematiksel olarak ayrıklaştırılmış biçimde uygulanmasıdır [44]. Bu çalışmada gerçekleştirilen HAD tabanlı optimizasyon çalışmaları aşağıdaki adımlar takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

- a) Geometrik Parametrelerin Belirlenmesi
- b) Sınır Şartlarının Belirlenmesi
- c) HAD Analizi Çalışmaları
- d) Optimizasyon Çalışmaları

Öncelikle, kanatçıklı mikrokanalda nanoakışkan akışı ve ısı geçişine etki eden parametreler belirlenmiştir. Ardından sınır şartları belirlenmiş, HAD analizi

çalışmalarına başlanmıştır. Probleme etki eden parametreler ile seviyeleri tanımlanmış, HAD tabanlı optimizasyon hesaplamaları yapılmıştır.

4.2. Mikrokanal Geometrisi ve Parametreler

Tez kapsamında mikrokanal modeli belirlenmeden önce hidrolik çap ve kanatçık sayısı bir ön çalışma yapılarak belirlenmiştir. Ön çalışmada [46] dikdörtgen kesite sahip tek bir kanatçiksız mikrokanal, içerisine farklı düzenlerde konuşmuş 2 ve 6 kanatçıklı mikrokanal ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda 6 kanatçığa sahip mikrokanalda ısı geçişinin daha iyi olduğu görülmüştür. Dolayısı ile tez kapsamında mikrokanal içerisine yarısına 6 kanatçık konulacak şekilde model oluşturulmuştur.

HAD analizlerinde mikrokanal geometrisi içerisine 6 çift kanatçık yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli tek bir mikrokanal olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerin özeti Tablo 4.1.'de görülmektedir.

Çalışmada kullanılan mikrokanal içindeki kanatçık genişliği, kanatçık uzunluğu ve kanatçığın yatay eksen ile oluşturduğu kanat açısı parametre olarak alınmıştır. Şekil 4.1.'de tasarımı yapılmış mikrokanalın fiziksel modeli ve ilgili parametreleri ,Tablo 4.2.'de ölçüleri verilmiştir. Dikdörtgen kesitli mikrokanalın yüksekliği H , genişliği W ile gösterilmiştir, L ise mikrokanalın boyunu temsil etmektedir.

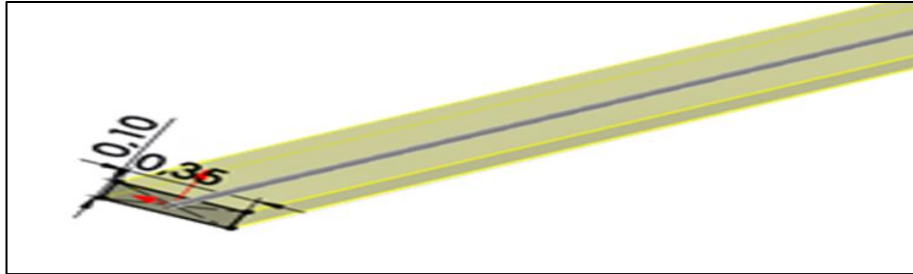
Tablo 4.1. Yapılan HAD analizlerinin özeti

HAD analizi kodu	Termal Koşul (Alt duvar)	Nanoakışkan
MK(ST) Al_2O_3	Sabit Sıcaklık $T=358\text{ K}$	Al_2O_3 -Su
MK(ST) CuO	Sabit Sıcaklık $T=358\text{ K}$	CuO-Su
MK(SA) Al_2O_3	Sabit Isı Akısı $= 2.10^6\text{ W/m}^2$	Al_2O_3 -Su
MK(SA) CuO	Sabit Isı Akısı $= 2.10^6\text{ W/m}^2$	CuO-Su

Tablo 4.2. Mikrokanal geometrisi ile parametreleri

Mikrokanal geometrisi	[mm]	Parametreler	1	2	3
Mikrokanal genişliği, W	0,35	Kanatçık Kalınlığı [mm]	0,03	0,04	0,05
Mikrokanal yüksekliği, H	0,1	Kanatçık Uzunluğu [mm]	0,05	0,1	0,15
Mikrokanal uzunluğu, L	10	Kanat Açısı ($^{\circ}$)	30	45	60

Tablo 4.1.'den de görüldüğü üzere dört farklı HAD tabanlı optimizasyon çalışması yapılmış, en uygun mikrokanal geometrisi parametreleri elde edilmiştir. Ardından en uygun parametrelere göre mikrokanal modelleri kullanılarak farklı akış hızlarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde akış tek fazlı laminar, akışkan sıkıştırılmaz, newton tipi olduğu varsayılmıştır. Akışkan hızı 1 ila 7 m/s arasında değiştirilmiştir.

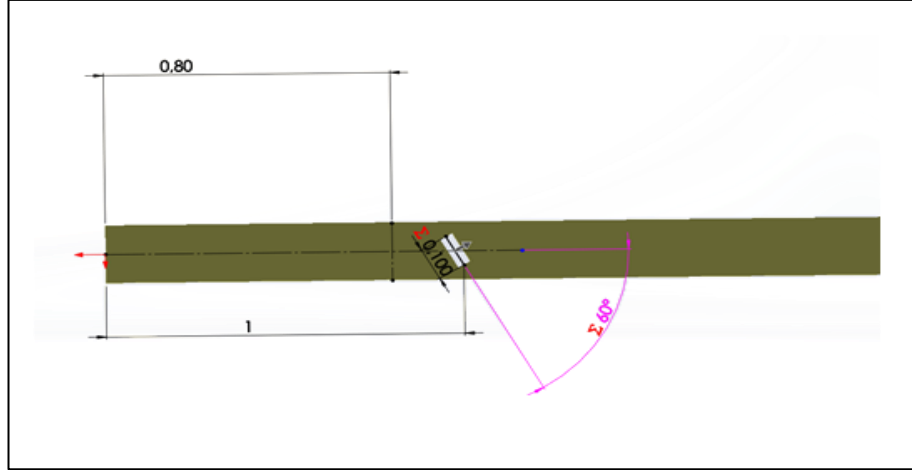


(a)



(b)

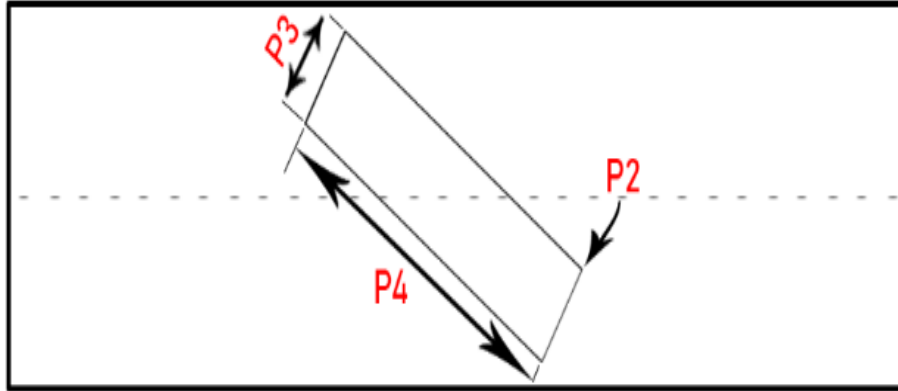
Şekil 4.1. Fiziksel model ve ilgili geometrik parametreler: a) mikrokanal, b) kanatçıklı mikrokanal



(c)

Şekil 4.1. (devamı) Fiziksel model ve ilgili geometrik parametreler: c) kanatçık yerleşimi

Dikdörtgen prizma şeklinde ve geometrik parametreleri birbirine özdeş kanatçıklar alt duvara bitişik şekilde, kanal boyunca karşılıklı olarak konumlandırılmıştır. Kanal içerisinde toplam 12 kanatçık bulunmaktadır. Burada kanatların et kalınlığı [P2], uzunluğu [P4] ve açısı [P3] optimizasyon parametreleri Şekil 4.2.'deki gibi belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Kanatçık için belirlenen parametreler

Yapılan çalışmada temel (baz) akışkan olarak su alınmış, bakıroksit ve alumina partikülleri tercih edilmiştir. Suyun ve nano partiküllerin özellikleri aşağıdaki Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Suyun (H₂O) ve nano partiküllerin özellikleri

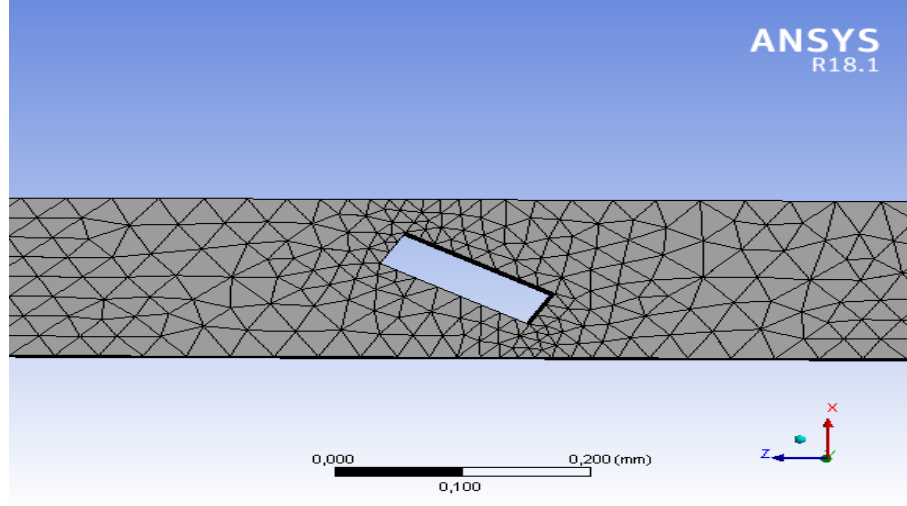
Akışkan ve/veya nanopartiküller	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	k (W/mK)	μ (Pa.s)
H ₂ O	998,2	4175,78	0,601	8,8325.10 ⁻⁴
Al ₂ O ₃	3890	778	46	—
CuO	6500	540	18	—

4.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analizleri

4.3.1. Al₂O₃-Su Nanoakışkanının sabit sıcaklıkta HAD analizi: MK(ST) Al₂O₃

Modelleme ve çözüm ağı Ansys workbench arayüzünde oluşturulmuş; sınır şartları, korunum denklemlerinin çözümü Fluent arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli mikrokanal modelin, dört yüzeyli ve altı yüzeyli ağ yapısı ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağında toplam düğüm noktası sayısı kanatçık sayısına göre değişmektedir ve kanatçık cidarına daha sık düğüm noktaları uygulanmıştır. Şekil 4.3.'de mikrokanala ait çözüm ağı görülmektedir ve çözüm ağı 53782 düğüm ve 12550 eleman sayısına sahiptir. Duvar yüzeylerine 5 katman sınır tabaka ağı atılmıştır (Şekil 4.3.).

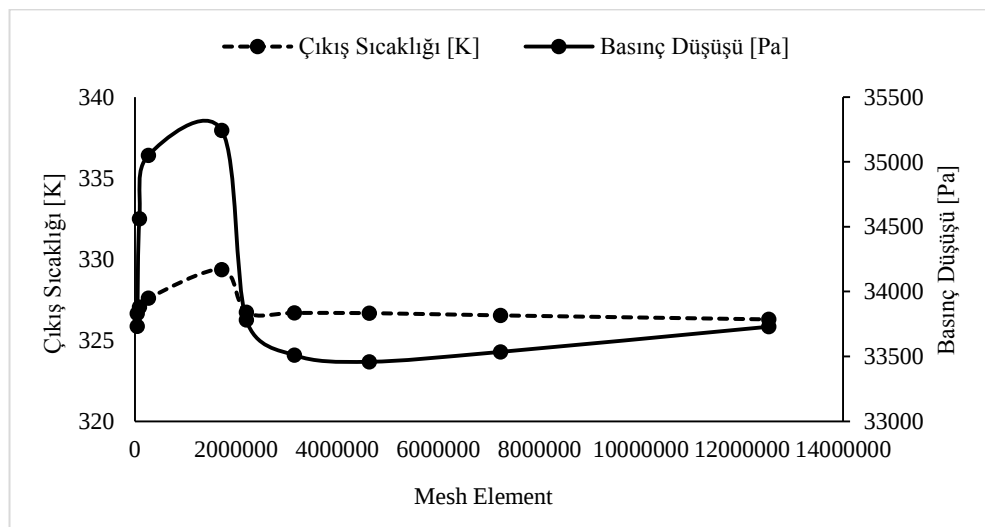
Bu analizde akışkan olarak Al₂O₃-su kullanılmış, sadece mikrokanalın alt yüzeyinin 358 K sıcaklıkta sabit olduğu varsayılmıştır. Nanoakışkan mikrokanala 298 K sıcaklıkta ve 1 m/ s hızla girmektedir. Çıkış basıncı 0 Pa alınarak, giriş basıncı basınç düşümü olarak elde edilmiştir. Nano akışkanın hacimsel derişim değerleri 0 ila 0,4 arasında, diğer parametreler ise Tablo 4.2.'de görüldüğü verilen aralıkta değiştirilmiştir.



Şekil 4.3. Al_2O_3 Nanoakışkan Sabit Sıcaklıkta Çözüm Ağı

4.3.2. MK(ST) Al_2O_3 Çözüm ağı bağımsızlığının sağlanması

Farklı çözüm ağı yoğunluklarında analizler yapılarak çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Eleman sayısı 46.000 ile 12 milyon arası incelenmiştir. Çözüm ağı sayısına bağlı olarak %0.57 sapma ile 12 milyon çözüm ağı kabul edilebilir bulunmuştur. Aynı zamanda sıcaklık değişimi de %0.07 ile sabitlenmiştir. Bundan dolayı 12 milyon çözüm ağı için analizler yapılmıştır. Şekil 4.4.'de farklı eleman sayılarına sahip modellerden elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.4. MK(ST) Al_2O_3 Çözüm ağı bağımsızlığı

4.3.3. MK(ST) Al_2O_3 Optimizasyon sonuçları

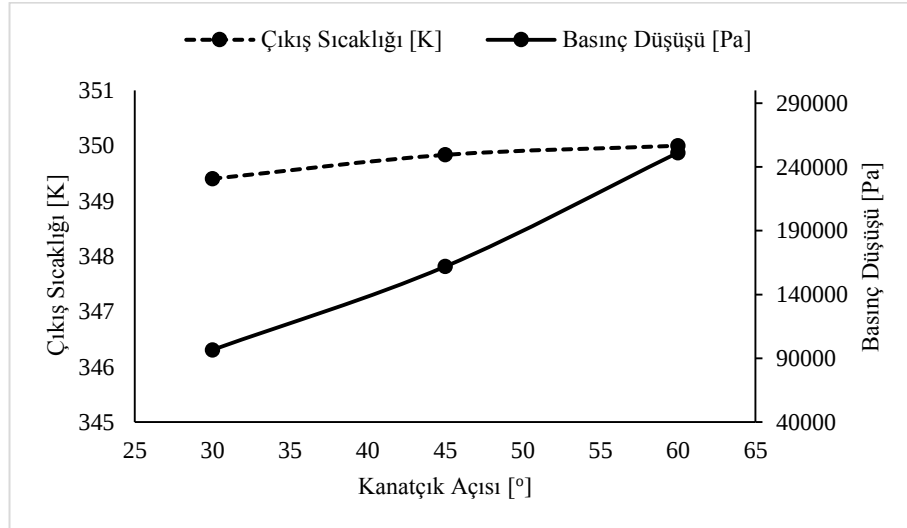
En düşük basınç düşümünü, en yüksek ısı geçişini sağlayan en uygun geometrik parametreler, HAD tabanlı parametrik optimizasyon ile belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen değerler aşağıda Tablo 4.4.'de verilmiştir.

Tablo 4.4. MK(ST) Al_2O_3 için optimizasyon sonuçları

P2 - Kanatçık Açısı	P3 - Kanatçık Kalınlığı	P4 - Kanatçık Uzunluğu	Hacimsel Derişim	Çıkış Sıcaklığı	Basınç Düşüşü	Isı Transferi
[°]	[mm]	[mm]	[%]	[K]	[Pa]	[W]
34,0579688	0,03649	0,0505987	0,39188	349,05	95933	3,2592

Elde edilen parametrelerin çıkış sıcaklığı ve basınç düşüşü sonuçlarına etkisi detaylıca incelenmiştir.

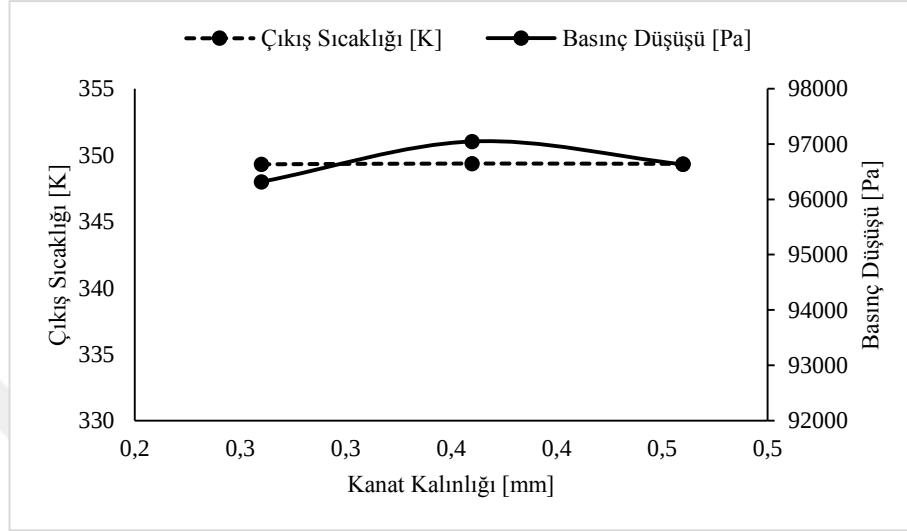
Kanatçık açısı 30, 45 ve 60⁰ değerlerinde değiştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda kanatçık açısı 34⁰ bulunmuştur. Kanatçık açısının artması giriş basıncında ve çıkış sıcaklığında artış sağlanmış, önemli bir değişken olduğu görülmüştür.



Şekil 4.5. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi

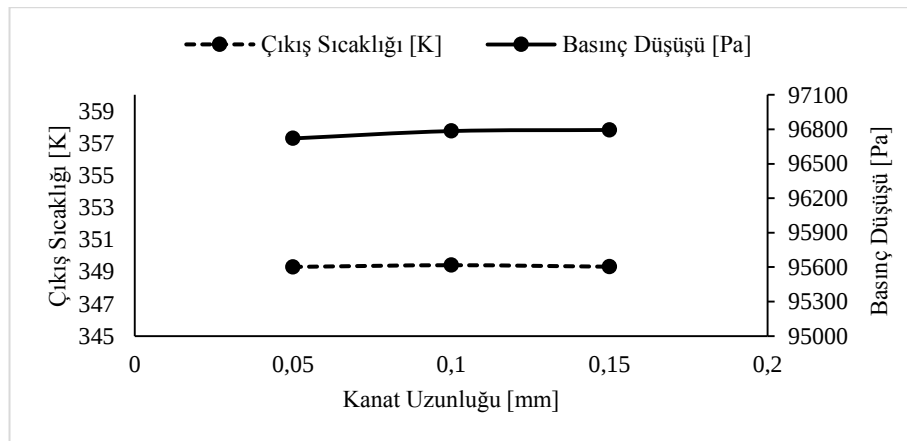
Hesaplamalarda kanatçık kalınlığı 0,03 ila 0,05 mm arasında değiştirilmiştir. MK(ST) Al_2O_3 için en uygun kanatçık kalınlığı 0,03649 mm olarak saptanmıştır. Kanatçık

kalınlığının artması çıkış sıcaklığında %1'in altında değişime sebep olmuştur. Bu nedenle kanatçık kalınlığının çıkış sıcaklığına etkisi olmadığı sonucuna varılabilir. Kanatçık kalınlığı 0,3 değerinden, 0,05'e yaklaşırken giriş basıncında artma meydana gelmiştir.



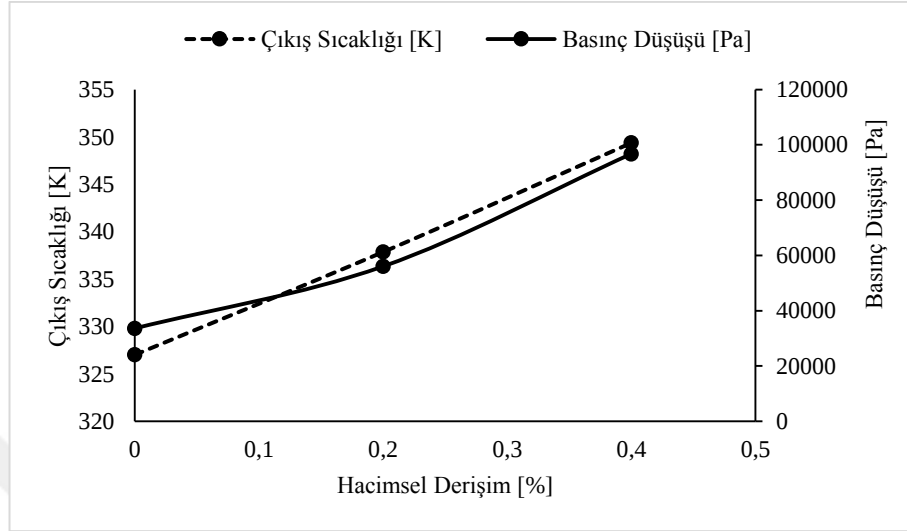
Şekil 4.6. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi

Kanatçık uzunluğu 0,05, 0,1 ve 0,15 mm değerlerinde değiştirilmiştir. Kanatçık uzunluğunun artması giriş basıncını ve çıkış sıcaklığını %1 oranında arttırmıştır. Kanatçık uzunluğunun bu 0,05 ila 0,15 değerleri için sonuçlara etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.7. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi

Al_2O_3 -su nanoakışkanının hacimsel derişimi 0 ile 0,4 % aralığında değiştirilmiştir. En uygun hacimsel derişim değeri 0,39 bulunmuştur. Beklendiği üzere hacimsel derişimin artması giriş basıncının ve çıkış sıcaklığının artmasına neden olmuştur.



Şekil 4.8. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi

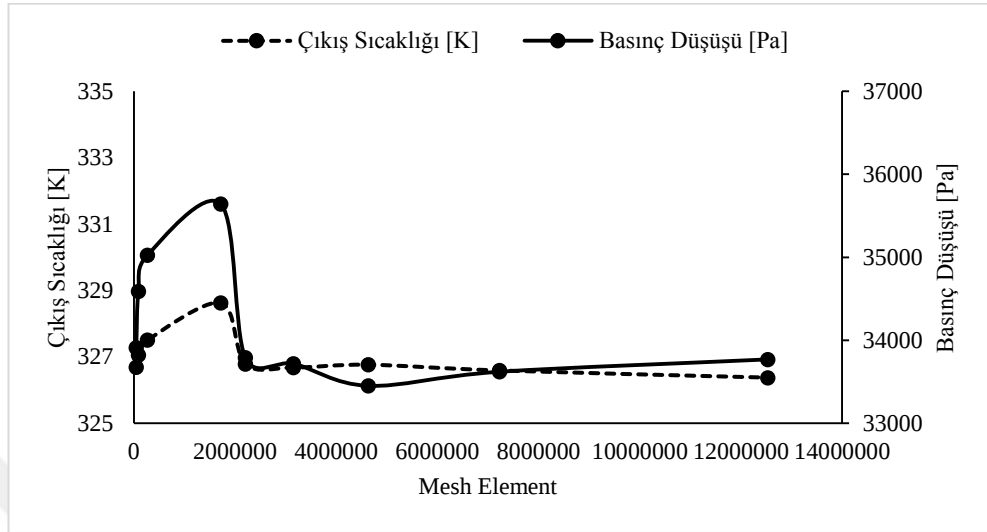
4.4. CuO-Su Nanoakışkanının Sabit Sıcaklıkta MK(ST) CuO HAD Optimizasyonu

Modelleme ve çözüm ağı Ansys workbench arayüzünde oluşturulmuş; sınır şartları, korunum denklemlerinin çözümü Fluent arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli mikrokana modelin, dört yüzeyli ve altı yüzeyli ağ yapısı ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağında toplam düğüm noktası sayısı kanatçık sayısına göre değişmektedir ve kanatçık cidarına daha sık düğüm noktaları uygulanmıştır. Şekil 4.3.'de mikrokana a ait çözüm ağı görölmektedir ve çözüm ağı 53782 düğüm ve 12550 eleman sayısına sahiptir.

4.4.1. Mesh analiz sonuçlarının sıcaklık ve basınç düşüşü ile ilişkisi

Farklı çözüm ağı yoğunluklarında analizler yapılarak çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Benzer şekilde eleman sayısı 46.000 ile 12 milyon arası incelenmiştir. Çözüm ağı sayısına bağlı olarak %0.44 sapma ile 12 milyon çözüm ağı kabul edilebilir bulunmuştur. Aynı zamanda sıcaklık değişimi de %0.06 ile

sabitlenmiştir. Bundan dolayı 12 milyon çözüm ağı için analizler yapılmıştır. Şekil 4.9.'de farklı eleman sayılarına sahip modellerden elde edilen sonuçlar görülmektedir.



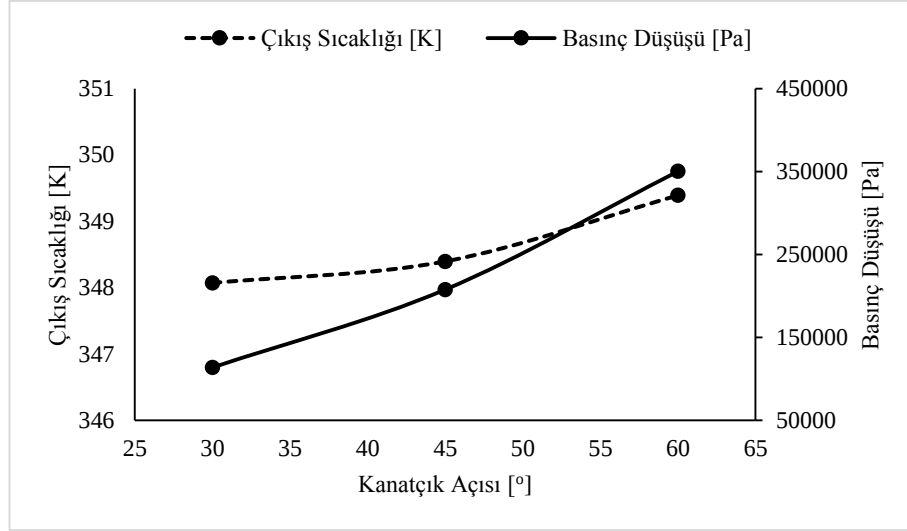
Şekil 4.9. MK(ST) CuO Çözüm ağı bağımsızlığı

4.4.2. MK(ST) CuO Optimizasyon sonuçları

En düşük basınç düşümünü, en yüksek ısı geçişini sağlayan en uygun geometrik parametreler, HAD tabanlı parametrik optimizasyon ile belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen değerler aşağıda Tablo 4.5.'te verilmiştir.

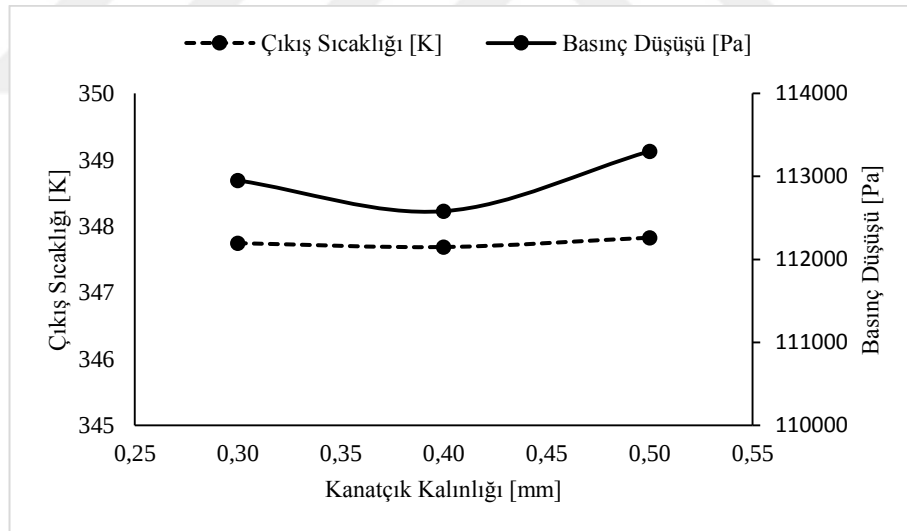
Tablo 4.5. MK(ST) CuO için optimizasyon sonuçları

P2 - Kanatçık Açısı	P3 - Kanatçık Kalınlığı	P4 - Kanatçık Uzunluğu	Hacimsel Derişim	Çıkış Sıcaklığı	Basınç Düşüşü	Isı Transferi
[o]	[mm]	[mm]	[%]	[K]	[Pa]	[W]
42,96421875	0,03749	0,13701845	0,39828	349,51	96746	3,2813



Şekil 4.10. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi

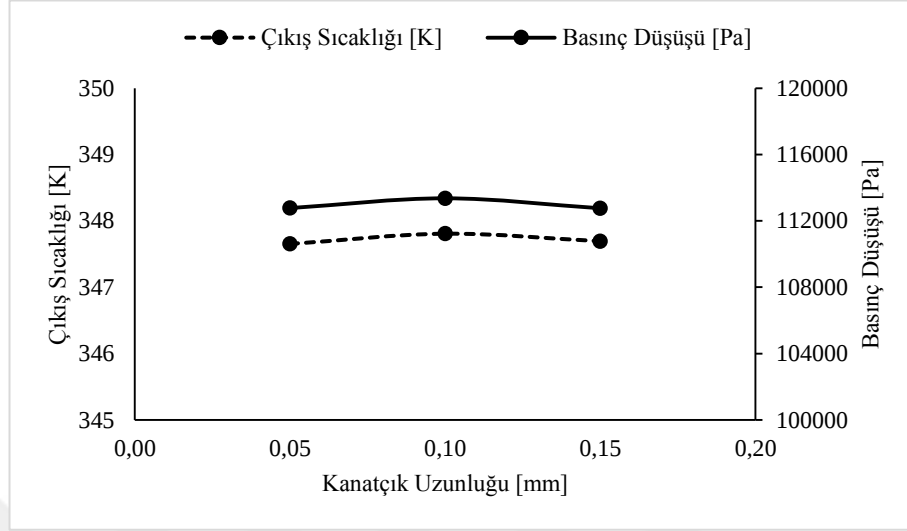
Kanatçık açısı 30, 45 ve 60⁰ değerlerinde optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda kanatçık açısı 43⁰ bulunmuştur. Kanatçık açısının artması giriş basıncında ve çıkış sıcaklığında artış sağlanmış, önemli bir değişken olduğu görülmüştür.



Şekil 4.11. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi

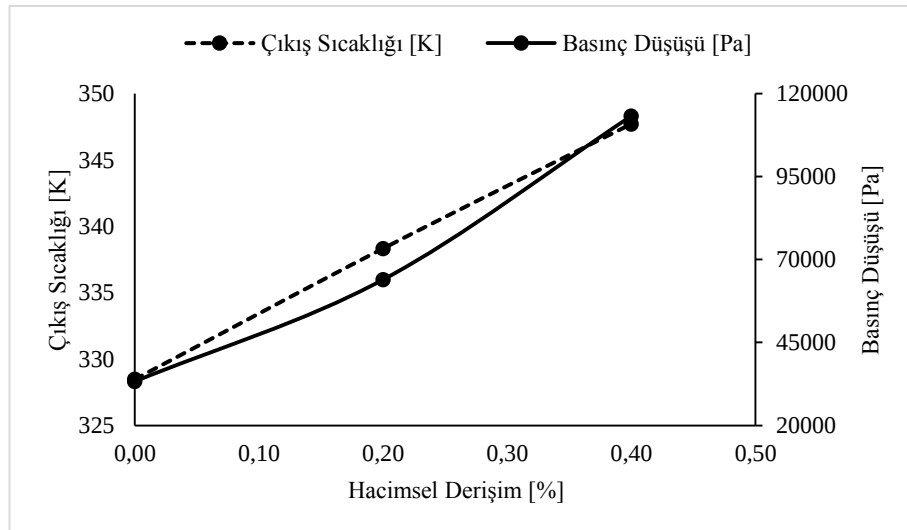
Yapılan optimizasyon çalışmasında kanatçık kalınlığı 0,03 ila 0,05 mm arasında değiştirilmiştir. MK(ST) CuO için en uygun kanatçık kalınlığı 0,03749 mm olarak saptanmıştır. Kanatçık kalınlığının artması çıkış sıcaklığında %1'in altında değişime sebep olmuştur. Bu nedenle kanatçık kalınlığının çıkış sıcaklığına etkisi olmadığı sonucuna

varılabilir. Kanatçık kalınlığı 0,3 değerinden, 0,05'e yaklaşırken giriş basıncında artma meydana gelmiştir.



Şekil 4.12. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi

Kanatçık uzunluğu 0,05, 0,1 ve 0,15 mm değerlerinde değiştirilmiştir. Kanatçık uzunluğunun artması giriş basıncını ve çıkış sıcaklığını %1 oranında arttırmıştır. Kanatçık uzunluğunun bu 0,05 ile 0,15 değerleri için sonuçlara etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.13. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi

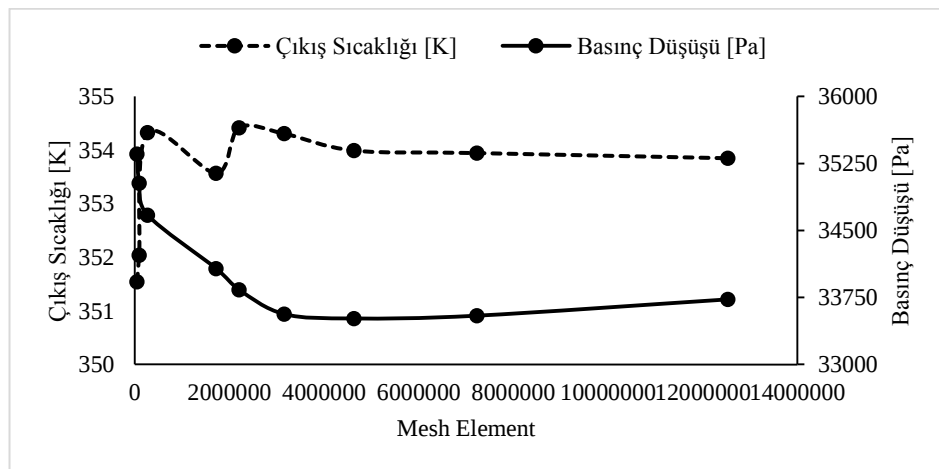
CuO-su nanoakışkanının hacimsel derişimi 0 ile 0,4 % aralığında değiştirilmiştir. En uygun hacimsel derişim değeri 0,39828 bulunmuştur. Beklendiği üzere hacimsel derişimin artması giriş basıncının ve çıkış sıcaklığının artmasına neden olmuştur.

4.5. Al₂O₃-Su Nanoakışkanının Sabit Isı Akısında MK(SA) Al₂O₃ HAD Optimizasyonu

Modelleme ve çözüm ağı Ansys workbench arayüzünde oluşturulmuş; sınır şartları, korunum denklemlerinin çözümü Fluent arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli mikrokana1 modelin, dört yüzeyle ve altı yüzeyle ağ yapısı ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağında toplam düğüm noktası sayısı kanatçık sayısına göre değişmektedir ve kanatçık cidarına daha sık düğüm noktaları uygulanmıştır. Şekil 4.3.'de mikrokana1a ait çözüm ağı görölmektedir ve çözüm ağı 53782 düğüm ve 125550 eleman sayısına sahiptir.

4.5.1. MK(SA) Al₂O₃ Çözüm ağı bağımsızlığı

Farklı çözüm ağı yoğunluklarında analizler yapılarak çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Benzer şekilde eleman sayısı 46.000 ile 12 milyon arası incelenmiştir. Çözüm ağı sayısına bağlı olarak %0.54 sapma ile 12 milyon çözüm ağı kabul edilebilir bulunmuştur. Aynı zamanda sıcaklık değişimi de %0.02 ile sabitlenmiştir. Bundan dolayı 12 milyon çözüm ağı için analizler yapılmıştır. Şekil 4.14.'te farklı eleman sayılarına sahip modellerden elde edilen sonuçlar görölmektedir.



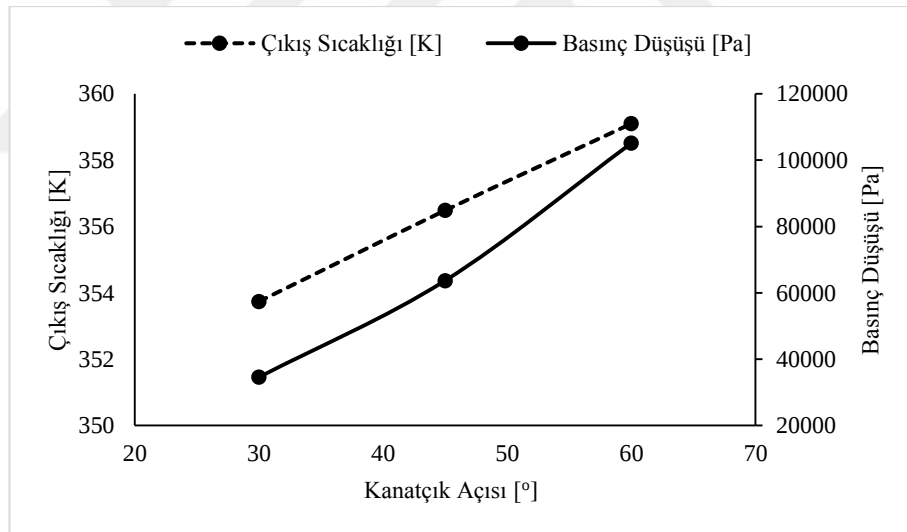
Şekil 4.14. MK(SA) Al₂O₃ Çözüm ağı bağımsızlığı

4.5.2. MK(SA) Al₂O₃ Optimizasyon sonuçları

En düşük basınç düşümünü, en yüksek ısı geçişini sağlayan en uygun geometrik parametreler, HAD tabanlı parametrik optimizasyon ile belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen değerler aşağıda Tablo 4.6.'da verilmiştir.

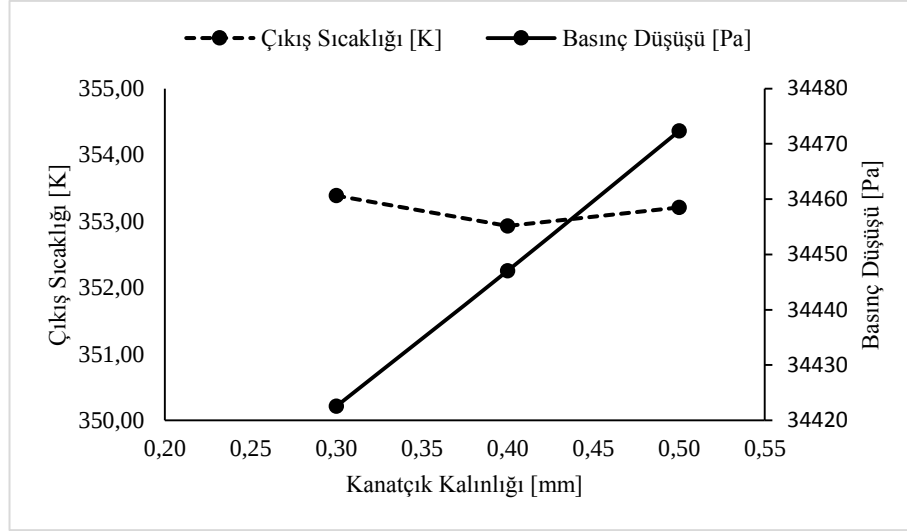
Tablo 4.6. MK(SA) Al₂O₃ için optimizasyon sonuçları

P2 - Kanatçık Açısı [o]	P3 - Kanatçık Kalınlığı [mm]	P4 - Kanatçık Uzunluğu [mm]	Hacimsel Derişim [%]	Çıkış Sıcaklığı [K]	Basınç Düşüşü [Pa]	Isı Transferi [W]
51,7825781	0,04851	0,10770889	0,008008	356,08	60620	3,4352



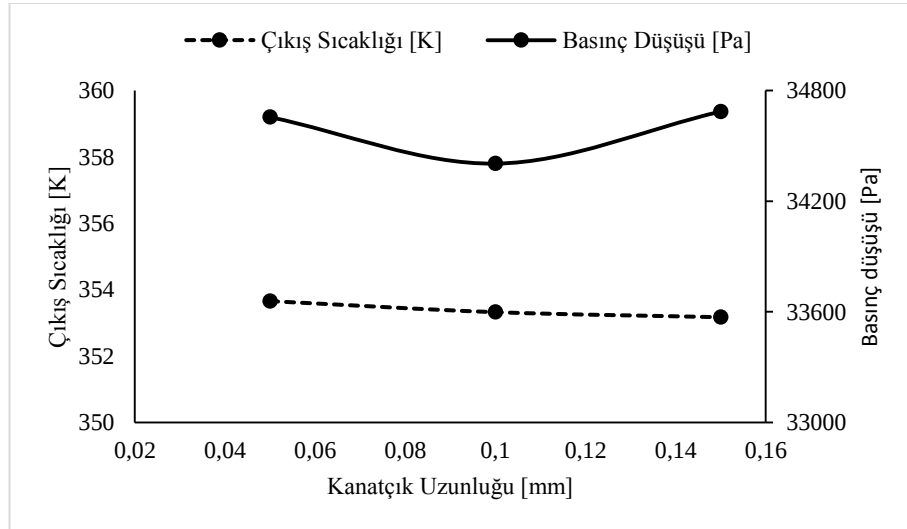
Şekil 4.15. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi

Kanatçık açısı 30, 45 ve 60⁰ değerlerinde optimizasyon yapılmıştır. . Optimizasyon sonucunda kanatçık açısı 51.78⁰ bulunmuştur. Kanatçık açısının artması giriş basıncında ve çıkış sıcaklığında artış sağlanmış, önemli bir değişken olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi

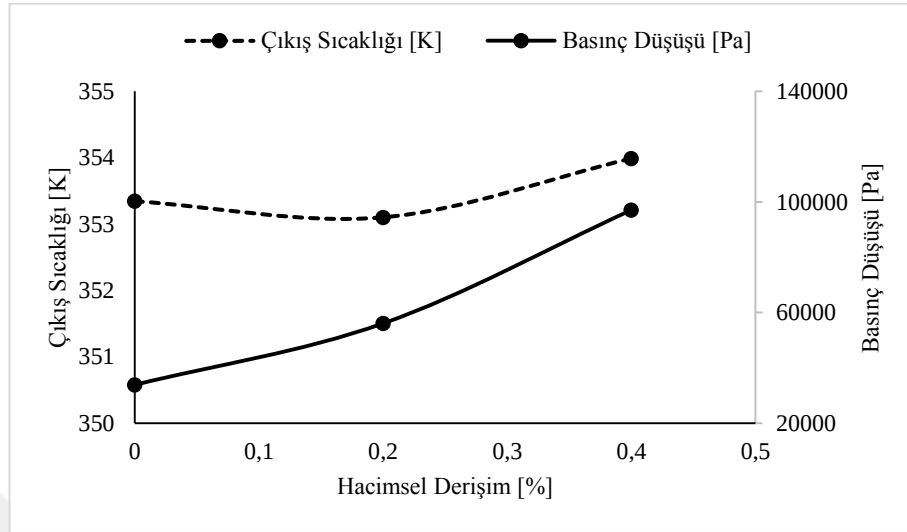
Yapılan optimizasyon çalışmasında kanatçık kalınlığı 0,03 ila 0,05 mm arasında değiştirilmiştir. MK(SA) Al_2O_3 için en uygun kanatçık kalınlığı 0,04851 mm olarak saptanmıştır. Kanatçık kalınlığının artması çıkış sıcaklığında %1'in altında değişime sebep olmuştur. Bu nedenle kanatçık kalınlığının çıkış sıcaklığına etkisi olmadığı sonucuna varılabilir. Kanatçık kalınlığı 0,3 değerinden, 0,05'e yaklaşırken giriş basıncında artma meydana gelmiştir.



Şekil 4.17. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi

Kanatçık uzunluğu 0,05, 0,1 ve 0,15 mm değerlerinde değiştirilmiştir. Kanatçık uzunluğunun artması giriş basıncını ve çıkış sıcaklığını %1 oranında arttırmıştır.

Kanatçık uzunluğunun bu 0,05 ila 0,15 değerleri için sonuçlara etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.18. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi

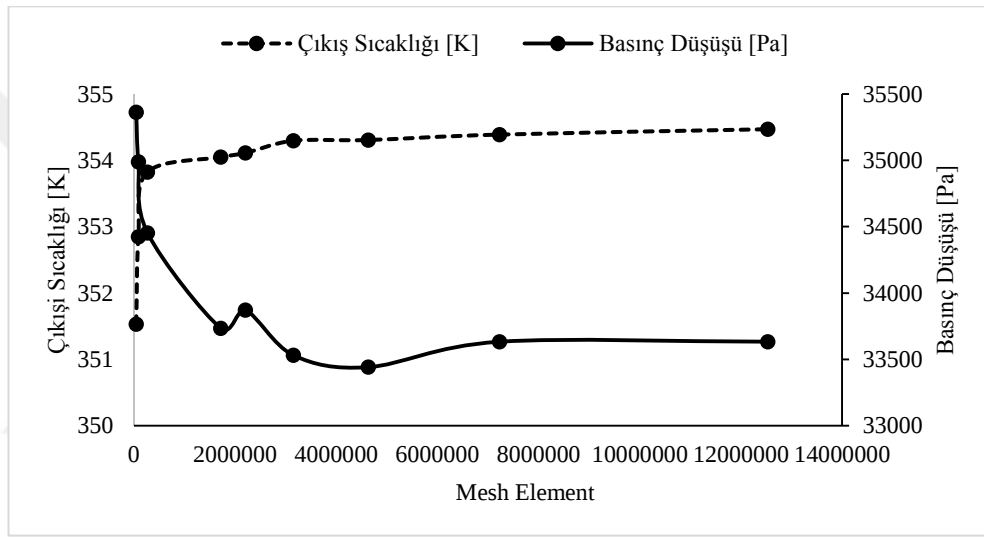
MK(SA) Al_2O_3 hacimsel derişimi 0 ile 0,4 % aralığında değiştirilmiştir. En uygun hacimsel derişim değeri 0,008008 bulunmuştur. Beklendiği üzere hacimsel derişimin artması giriş basıncının ve çıkış sıcaklığının artmasına neden olmuştur.

4.5.3. CuO Nanoakışkanının sabit ısı akısında MK(SA) CuO HAD optimizasyonu

Modelleme ve çözüm ağı Ansys workbench arayüzünde oluşturulmuş; sınır şartları, korunum denklemlerinin çözümü Fluent arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli mikrokanaal modelin, dört yüzeyli ve altı yüzeyli ağ yapısı ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağında toplam düğüm noktası sayısı kanatçık sayısına göre değişmektedir ve kanatçık cidarına daha sık düğüm noktaları uygulanmıştır. Şekil 4.3.'de mikrokanaala ait çözüm ağı görülmektedir ve çözüm ağı 53782 düğüm ve 125550 eleman sayısına sahiptir.

4.5.4. MK(SA) CuO Çözüm ağı bağımsızlığı

Farklı çözüm ağı yoğunluklarında analizler yapılarak çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Benzer şekilde eleman sayısı 46.000 ile 12 milyon arası incelenmiştir. Çözüm ağı sayısına bağlı olarak %57 sapma ile 12 milyon çözüm ağı kabul edilebilir bulunmuştur. Aynı zamanda sıcaklık değişimi de %0.02 ile sabitlenmiştir. Bundan dolayı 12 milyon çözüm ağı için analizler yapılmıştır. Şekil 4.19.'da farklı eleman sayılarına sahip modellerden elde edilen sonuçlar görülmektedir.



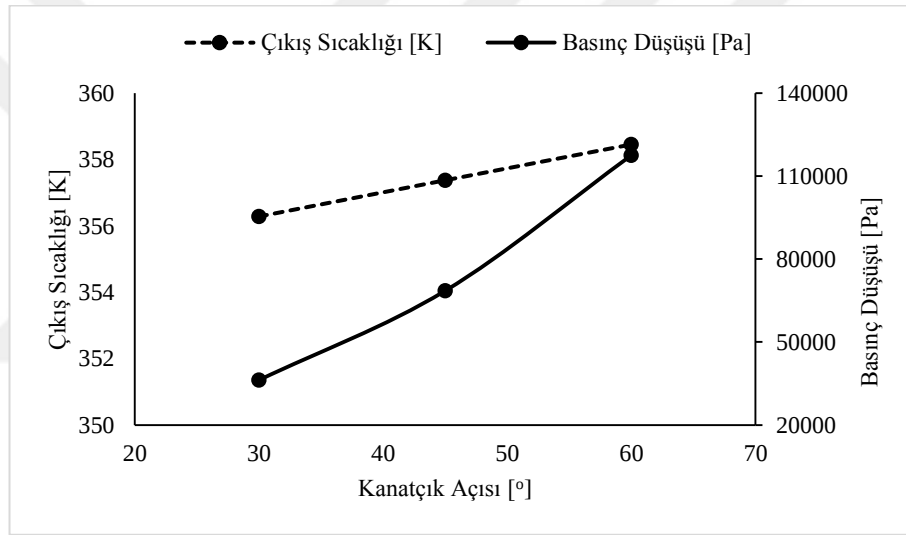
Şekil 4.19. MK(SA) CuO Çözüm ağı bağımsızlığı

4.5.5. MK(SA) CuO Optimizasyon sonuçları

En düşük basınç düşümünü, en yüksek ısı geçişini sağlayan en uygun geometrik parametreler, HAD tabanlı parametrik optimizasyon ile belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen değerler aşağıda Tablo 4.7.'de verilmiştir.

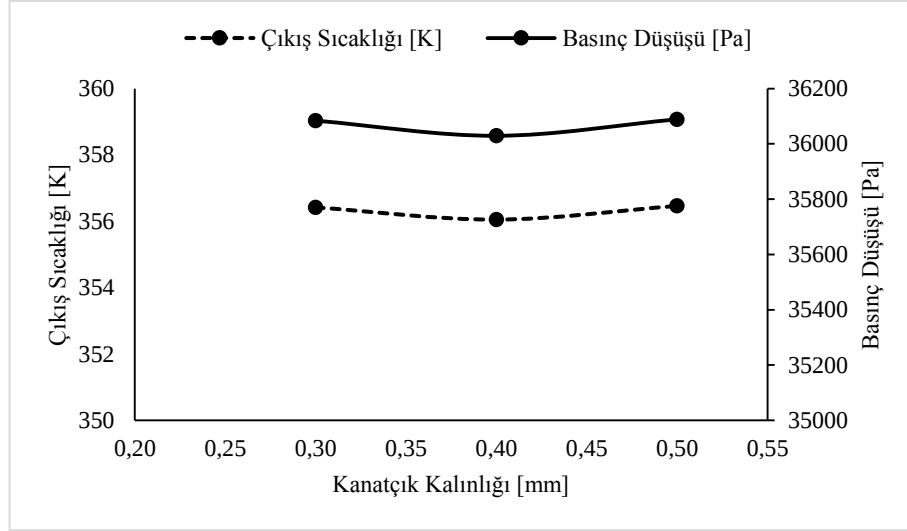
Tablo 4.7. MK(SA) CuO için optimizasyon sonuçları

P2 - Kanatçık Açısı [o]	P3 - Kanatçık Kalınlığı [mm]	P4 - Kanatçık Uzunluğu [mm]	Hacimsel Derişim [%]	Çıkış Sıcaklığı [K]	Basınç Düşüşü [Pa]	Isı Transferi [W]
46,6849219	0,04251	0,09764945	0,000328	357,34	60342	3,4352



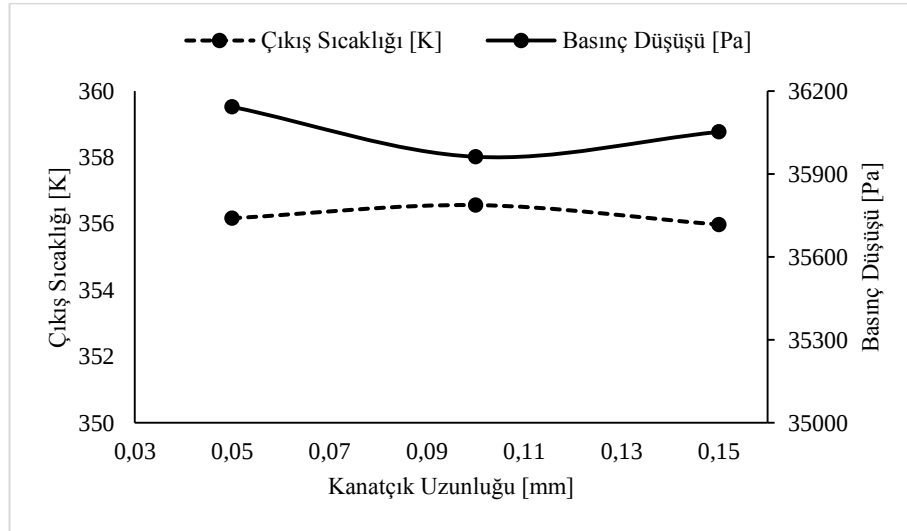
Şekil 4.20. Kanatçık açısının sonuçlara etkisi

Kanatçık açısı 30, 45 ve 60⁰ değerlerinde optimizasyon yapılmıştır. . Optimizasyon sonucunda kanatçık açısı 46,68⁰ bulunmuştur. Kanatçık açısının artması giriş basıncında ve çıkış sıcaklığında artış sağlanmış, önemli bir değişken olduğu görülmüştür.



Şekil 4.21. Kanatçık kalınlığının sonuçlara etkisi

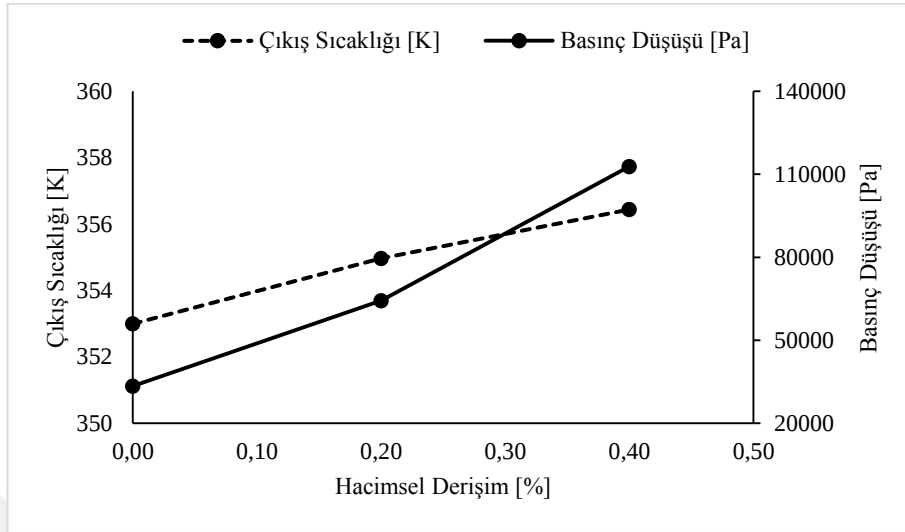
Optimizasyon çalışmasında kanatçık kalınlığı 0,03 ila 0,05 mm arasında değiştirilmiştir. MK(SA) CuO için en uygun kanatçık kalınlığı 0,04851 mm olarak saptanmıştır. Kanatçık kalınlığının artması çıkış sıcaklığında %1'in altında değişime sebep olmuştur. Bu nedenle kanatçık kalınlığının çıkış sıcaklığına etkisi olmadığı sonucuna varılabilir. Kanatçık kalınlığı 0,3 değerinden, 0,05'e yaklaşırken giriş basıncında artma meydana gelmiştir.



Şekil 4.22. Kanatçık uzunluğunun sonuçlara etkisi

Kanatçık uzunluğu 0,05, 0,1 ve 0,15 mm değerlerinde değiştirilmiştir. Kanatçık uzunluğunun artması giriş basıncını ve çıkış sıcaklığını %1 oranında arttırmıştır.

Kanatçık uzunluğunun bu 0,05 ila 0,15 değerleri için sonuçlara etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.23. Hacimsel derişimin sonuçlara etkisi

MK(SA) CuO hacimsel derişimi 0 ile 0,4 % aralığında değıştirilmiştir. En uygun hacimsel derişim değeri 0,000328 bulunmuştur. Beklendiğı üzere hacimsel derişimin artması giriş basıncının ve çıkış sıcaklığının artmasına neden olmuştur.

4.6. Isı Transferi Artırımı

Yapılan HAD analizi sonuçlarının değeriendirilmesi açısından ısı transferindeki artışın belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle optimizasyon sonucunda kanatçık geometrileri belirlenmiş, HAD sonuçları farklı nanoakışkan hızlarında elde edilmiştir. Çalışmanın devamında ısı transferindeki artış, boyutsuz hesaplanan Nusselt sayılarının oranı, $N_{artış}$, şeklinde tanımlanmıştır. Mikrokanal içerisinde sabit ısı akısı ve sabit sıcaklık ısıll koşulları altında nano akışkan akışının sonuçları ile aynı mikrokanal kanatçiksız olduğu durumda ısı geçişinde artış;

$$N_{artış} = \frac{Nu_{kanatçıklı}}{Nu_{kanatçiksız}}$$

Şeklinde Nu sayılarının oranı olarak tanımlanmıştır. Kanatçıkların ısı geçişine olan etkisi sonuçlar kısmında açıkça ortaya konulmuştur.

Ayrıca mikrokanal içerisinde sabit ısı akısı ve sabit sıcaklık ısıl koşulları altında nano akışkan akışının sonuçları ile aynı mikrokanalda akışkanın su olduğu durumda ısı geçişinde artış yine,

$$N_{artış} = \frac{Nu_{nanoakışkan}}{Nu_{su}}$$

Şeklinde tanımlanmıştır. Sonuçlar, bir sonraki kısımda detaylıca sunulmuştur.



BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada en yüksek çıkış sıcaklığı ile en düşük basınç düşümünü veren en uygun mikrokanal geometrisi için optimizasyon çalışması Ansys 18.1 HAD yazılımı ile yapılmıştır. En uygun kanatçık açısı, kalınlığı, uzunluğu ile nanoakışkanın hacimsel derişim değerleri aranmıştır. Aşağıda Tablo 5.1.'de HAD tabanlı optimizasyon sonucunda dört farklı analizden elde edilen optimizasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.1. HAD Tabanlı optimizasyon sonuçları

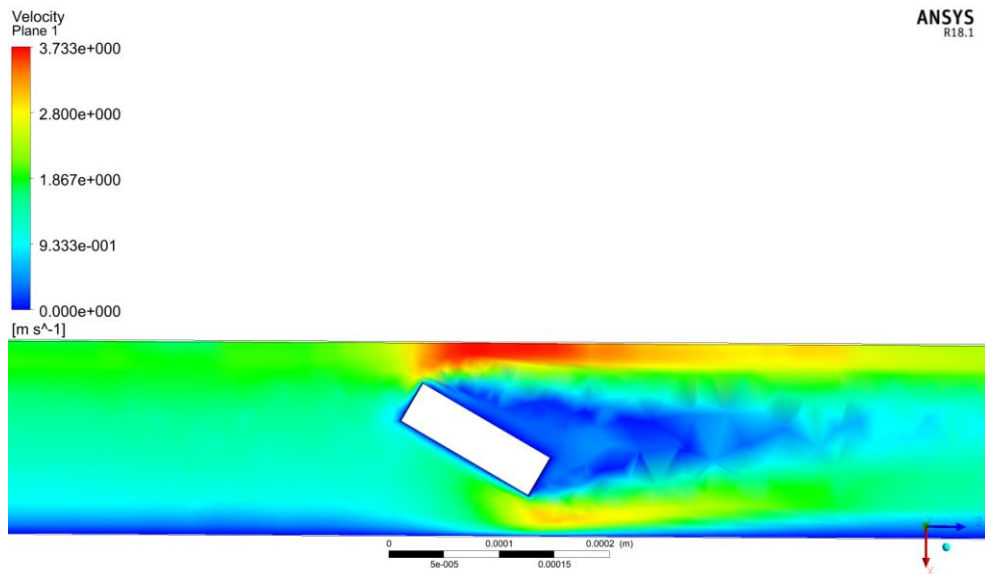
HAD analiz kodu	Kanatçık Açısı [°]	Kanatçık Kalınlığı [mm]	Kanatçık Uzunluğu [mm]	Hacimsel Derişim [%]	Çıkış Sıcaklığı [K]	Basınç Düşüşü [Pa]	Isı Transferi [W]
MK(ST) Al ₂ O ₃	34,0579688	0,03649	0,0505987	0,39188	349,05	95933	3,2592
MK(ST) CuO	42,96421875	0,03749	0,13701845	0,39828	349,51	96746	3,2813
MK(SA) Al ₂ O ₃	51,7825781	0,04851	0,10770889	0,008008	356,08	60620	3,4352
MK(SA)CuO	46,6849219	0,04251	0,09764945	0,000328	357,34	60342	3,4352

Kanatçık kalınlığı ve uzunluğu değerlerinin yapılan analizlerde birbirleri ile uyum sağladığı görülmüştür. Kanatçık açısının ise 34 ila 51⁰ arasında değişen farklı değerler aldığı görülmüştür. Diğer taraftan sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı termal koşullarında hacimsel derişimler için çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Sabit sıcaklık koşulunda nano partikülün hacimsel derişimi yaklaşık 0,39 iken, sabit ısı akısı şartlarında nano partikül neredeyse hiç yok denecek kadar azdır. Nano partikülün az olması basınç düşümü değerlerinin de düşük olmasına sebep olmuştur. Fakat ısı geçişine bakıldığında, beklendiği üzere sabit ısı akısı koşullarında %6 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tablodaki geometrik değerlere göre dört farklı kanatçıklı mikrokannalların bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri kullanılarak, nanoakışkanların 1 ila 7 m/s giriş akış hızlarında HAD analizleri yapılmıştır. Aşağıda bu dört farklı analizden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

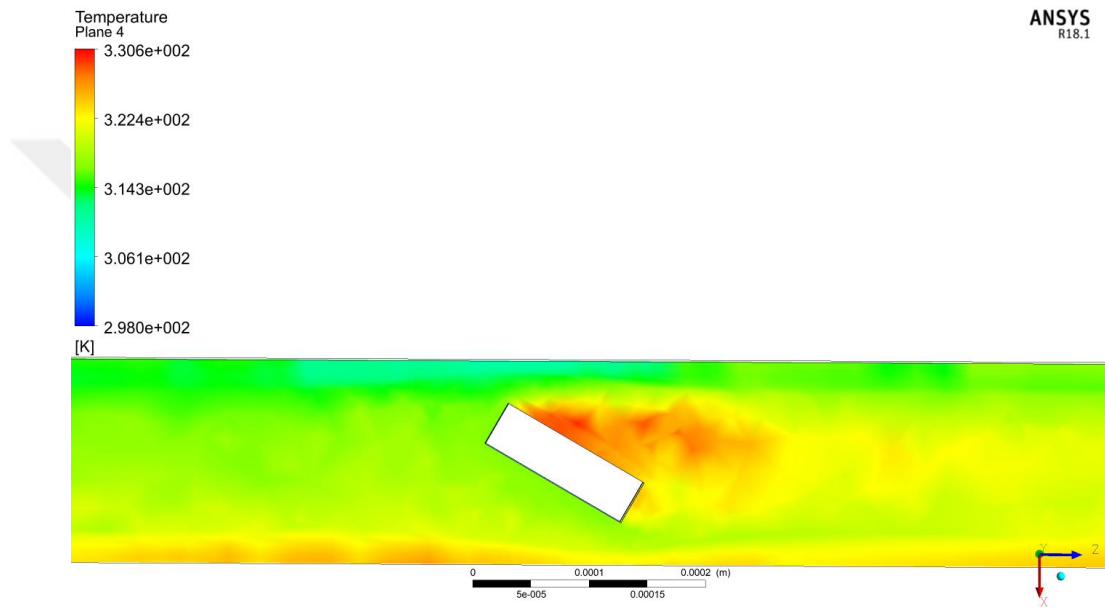
5.1. MK(ST) Al₂O₃ HAD Analizi Sonuçları

MK(ST) Al₂O₃ analizinde kanat açısı 34° olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.1. ve 5.2.'de mikrokanal içerisindeki kanatçık çevresinde hız vektörleri ile sıcaklık değişimleri görülmektedir. Şekil 5.1.'de akışa dik şekilde kanal içerisinde duran kanatçık görülmektedir. Kanatların laminar akış koşullarında çalkantıya sebep olduğu, akış hızlarının 1 ila 3,73 m/s arasında değişmesine yol açtığı görülmektedir. Kanatçıklar akış kesitini daralttığından maksimum akış hızının 3,73 m/s'ye kadar çıktığı tespit edilmiştir. Yüksek Reynolds sayılarında, akışın önüne bir engel konulduğunda akışkan daha uzun mesafeler kat ederek, daha şiddetli karışır. Bu çalışmada da mikrokanal içerisine yerleştirilmiş kanatçıklar kesit alanını daralttığı ve anlık hız artışlarına sebep olduğu gözlenmiştir. Kanatçıkların arkasında art iz bölgelerinin oluştuğu bulunmuştur. Kanatçıkların arasındaki mesafede girdap oluşumu ve kanatçık önünde veya arkasında girdap kopması gözlenmemiştir. Burada akış hızının düşük olmasının da bir etkisi vardır.



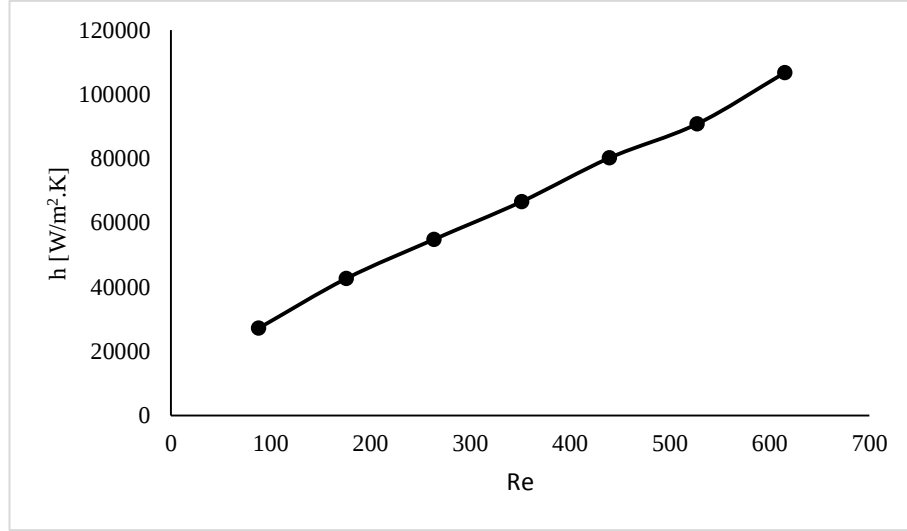
Şekil 5.1. MK(ST) Al₂O₃ HAD Analizi; Hız bölgeleri

Art arda konulmuş kanatçıklar akışkanın mikrokanal içerisinde karışmasını sağlarken aynı zamanda sıcak alt duvardan iletimle ısı geçişine de sebep olur. Bu şekilde akışkan sadece üst duvar yerine akışkandan daha sıcak kanatçık ile temas eder. Böylece akışkan akışı ile alt duvar daha etkin bir biçimde soğutulması sağlanır. Şekil 5.2.'de çıkışa yakın kanat etrafındaki sıcaklık değişimleri görülmektedir. Kanatlar yüzey alanının artmasına ve dolayısıyla ısı taşınımının artmasına sebep olmaktadır. Analizde alt duvar sabit 358 K sıcaklığında kabul edilmiştir.

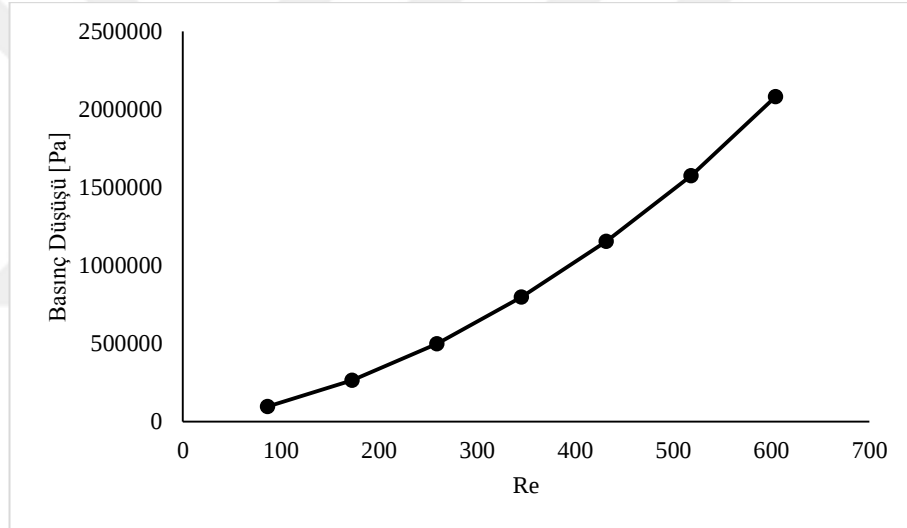


Şekil 5. 2 MK(ST) Al_2O_3 HAD Analizi; Kanatçık çevresinde sıcaklık bölgeleri

Reynolds sayısının $87 < Re < 615$ olduğu aralıkta elde edilen ısı taşınım katsayıları Şekil 5.3.'te verilmiştir. En düşük Reynolds sayısına karşılık gelen ısı taşınım katsayısı 27159, en yüksek Reynolds sayısına karşılık gelen ise $106764 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde bulunmuştur. Bu aralıkta ise doğrusala yakın bir ilişki ile ısı taşınım katsayıları arttığı gözlenmiştir.



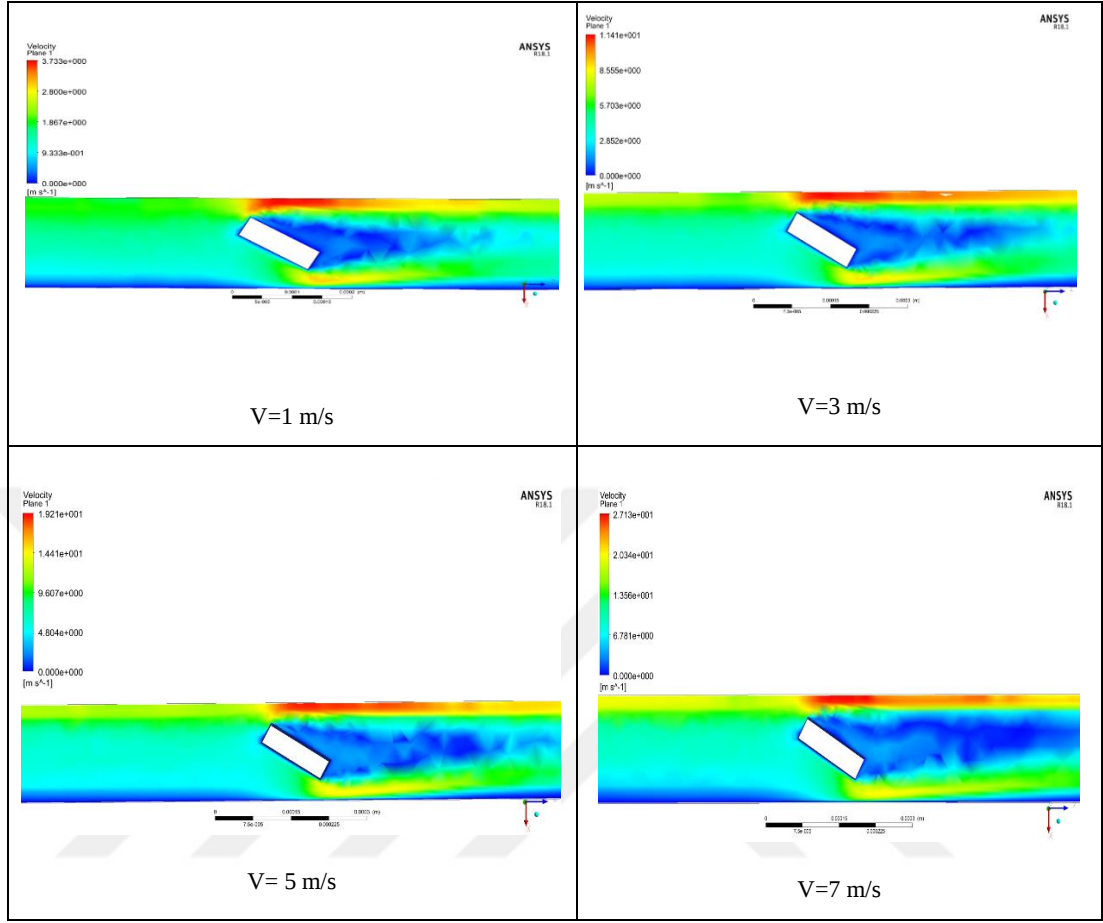
Şekil 5.3. MK(ST) Al₂O₃ HAD Analizi; Isı taşınım katsayılarının reynolds sayısı ile değişimi



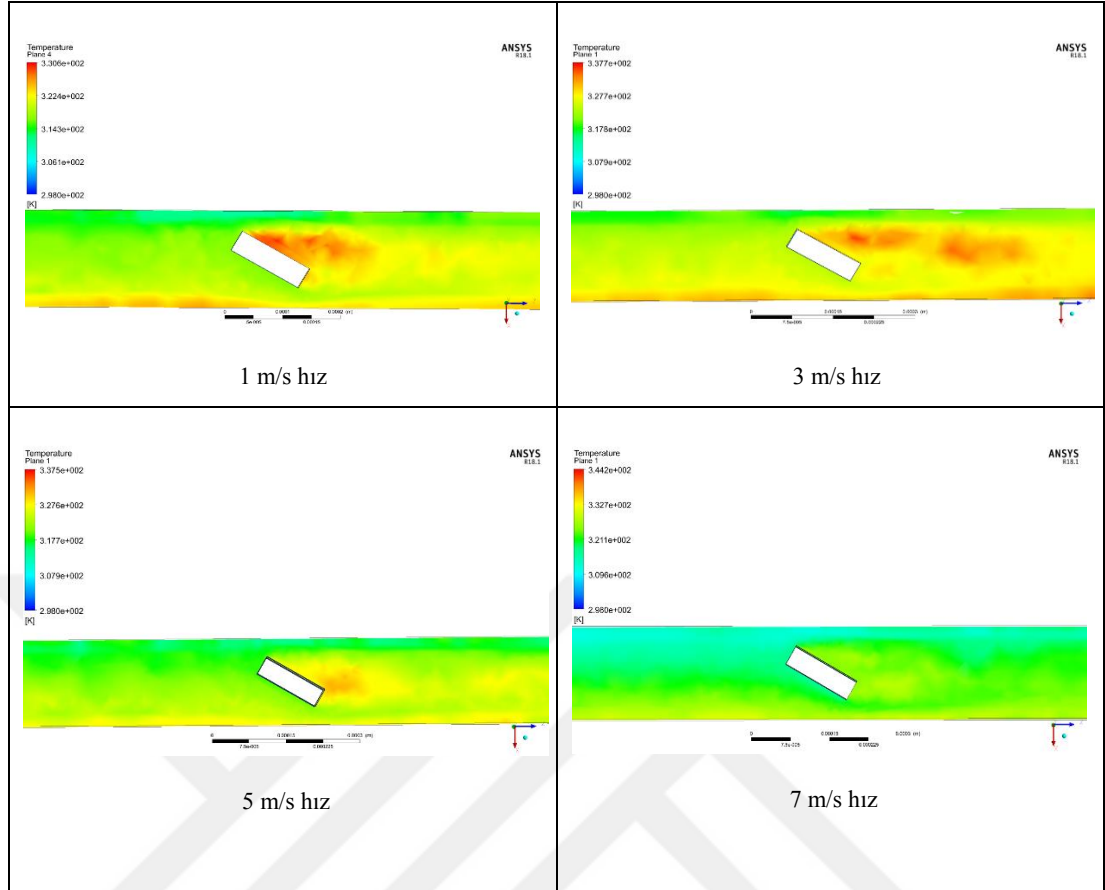
Şekil 5.4. MK(ST) Al₂O₃ HAD Analizi; Isı taşınım katsayılarının basın düşüşü ile değişimi

Şekil 5.4.'de basınç düşüşlerinin Re sayısı ile değişimi görülmektedir. $87 < Re < 615$ aralığında basınç değerlerinin 96628 Pa ile 2082857 Pa arasında artarak değiştiği gözlenmiştir. Yukarıda da bahsedildiği analizde akışkanın giriş hızı 1 ila 7 m/s hızlarında değiştirilmiş, optimizasyon kriteri olarak giriş basıncı değeri 50.000 Pa değeri alınmıştır. Elde edilen basınç düşüşlerine bakıldığında optimum mikrokanal geometrisi için akış hızının 1 m/s'den düşük çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

5.2. MK(ST) Al_2O_3 Farklı Akış Hızlarında Sıcaklık ve Hız Vektörleri



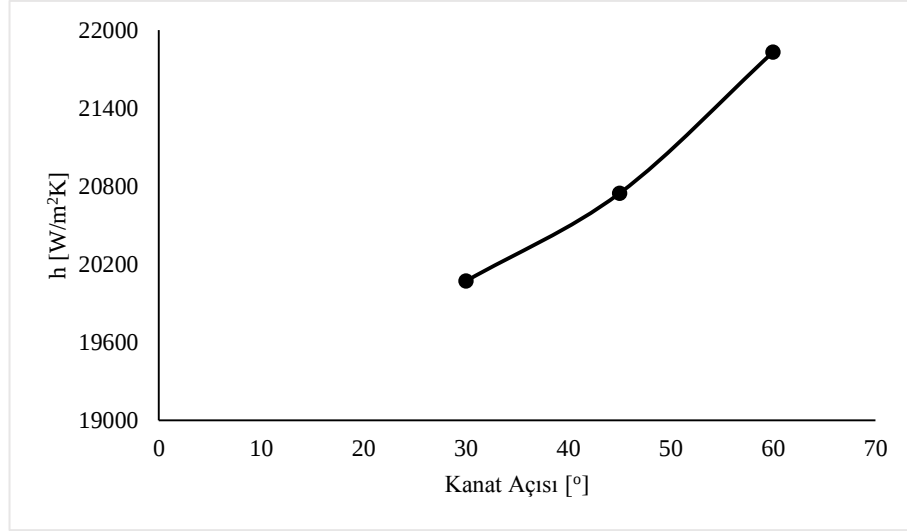
Şekil 5.5. Farklı akış hızlarında hız vektörleri



Şekil 5.6. Farklı akış hızlarında sıcaklık değişimleri

5.3. MK(ST) Al_2O_3 Kanatçık Açısının Isı Taşınım Katsayısına Etkisi

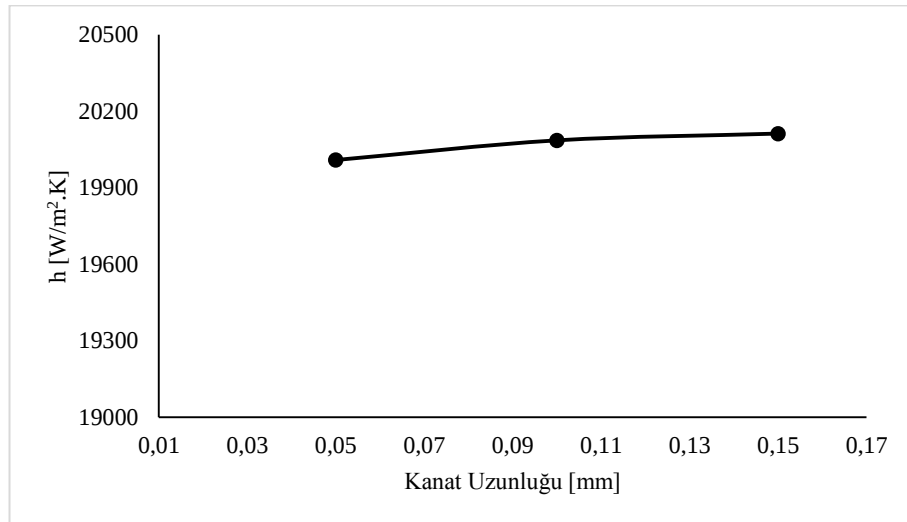
MK(ST) Al_2O_3 için yapılan HAD analizinde kanatçık açısının ısı taşınım katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görüldü. Akış hızının optimum olduğu 1 m/s değeri için kanat açısının 30° 'den 60° 'ye çıkması ile ısı taşınım katsayısında %8 oranında artmıştır. Kanat açısına bağlı olarak ısıtaşınım katsayısının değişimi Şekil 5.7.'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Kanatçık açısının ısı taşınım katsayısına etkisi

5.4. MK(ST) Al₂O₃ Kanatçık Uzunluğunun Isı Taşınım Katsayısına Etkisi

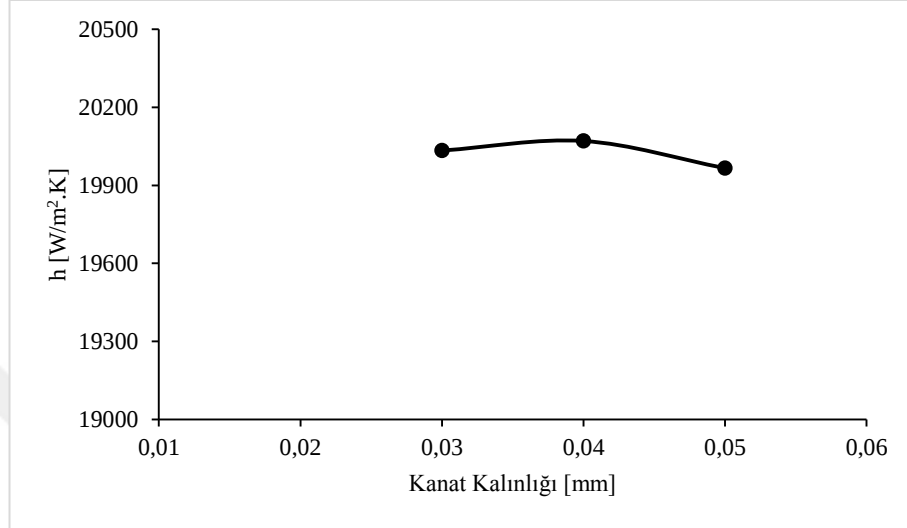
MK(ST) Al₂O₃ için yapılan HAD analizinde kanat uzunluğunun ısı taşınım katsayısı üzerinde etkisinin var olduğu ve minimum kanat uzunluğunda ısı taşınım katsayısının 20008 W/m²K iken maksimum kanat uzunluğunda 20112 W/m²K 'e çıktığı tespit edildi. Fakat bu değişim %1 in altında olduğu için kanat uzunluğunun ısı transfer katsayısına etkisinin önemsiz olduğu sonucuna varıldı. Isı transfer katsayısının kanat uzunluğu ile değişimi aşağıda Şekil 5.8.'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Kanatçık uzunluğunun ısı taşınım katsayısına etkisi

5.5. MK(ST) Al_2O_3 Kanatçık Kalınlığının Isı Taşınım Katsayısına Etkisi

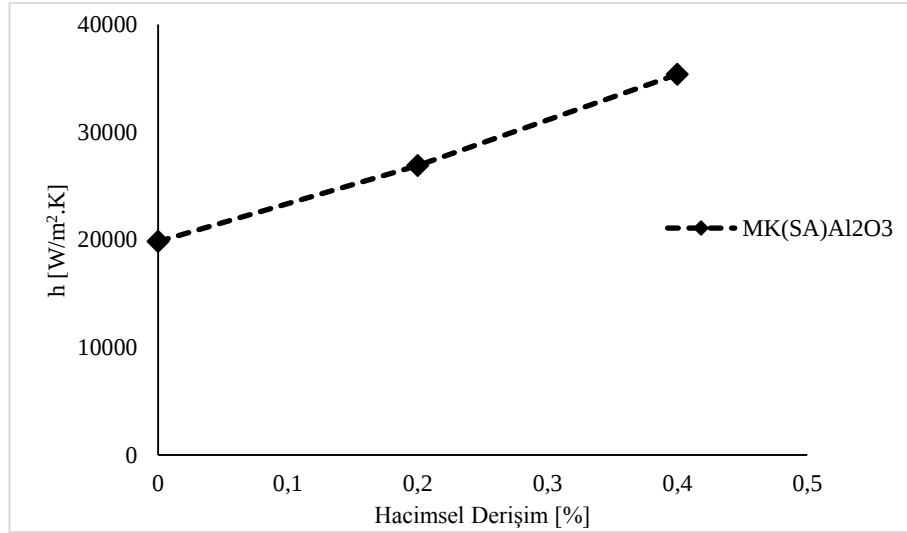
Yine MK(ST) Al_2O_3 için yapılan HAD analizinde kanat kalınlığının etkisi Şekil 5.9.'da verilmiştir. Kanat kalınlığı 0,03 mm değerinden 0,05 mm 'ye çıktığında ısı taşınım katsayısı 20033 'den 19966 $\text{W/m}^2\text{K}$ 'ye düşmüştür. Yine bu değişim %1'in altında kalmıştır.



Şekil 5.9. Kanatçık kalınlığının ısı taşınım katsayısına etkisi

5.6. MK(ST) Al_2O_3 Hacimsel Derişimin Isı Taşınım Katsayısına Etkisi

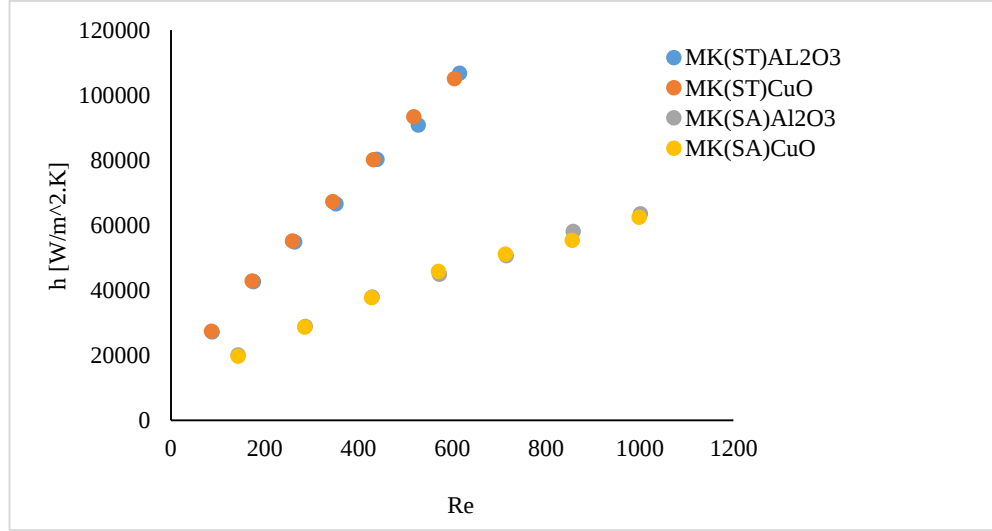
Yapılan HAD analizinde ısı taşınım katsayısı üzerine en büyük etkiye sahip parametre nanoakışkanın hacimsel derişikliğidir. Yüzde hacimsel derişimin artması ile doğrusal biçimde ısı taşınım katsayısında artış görüşmüştür. Hacimsel derişim %0 olduğunda akışkan, içerisinde nano partiküllerin olmadığı su olmaktadır. Hacimsel derişim arttıkça akışkan, Al_2O_3 -su nanoakışkan olmaktadır. Şekil 5.10.'a bakıldığında aynı mikrokanaal içerisinde aynı şartlarda Al_2O_3 -su nanoakışkanının, temel akışkan suya oranla ısı transferinde iyileşme sağladığı sonucuna varılabilir. Hacimsel derişim %0 olduğunda ısı taşınım katsayısı 19830, % 0,4 olduğunda ise 35370 $\text{W/m}^2\text{K}$ 'ne çıkmaktadır. Maksimum hacimsel derişim olduğunda ısı transfer katsayısında %78 oranında iyileşme sağlanmaktadır.



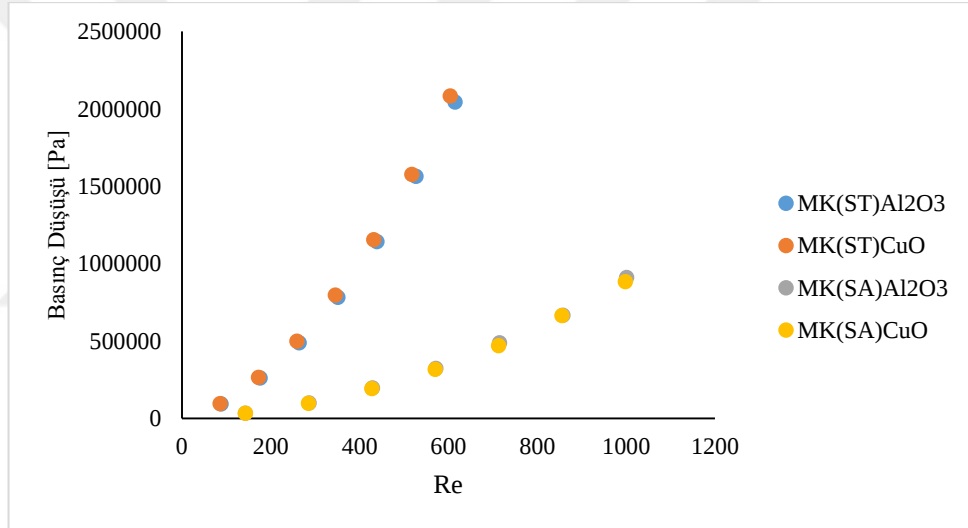
Şekil 5.10. Hacimsel derişimin ısı taşınım katsayısına etkisi

5.7. HAD Analizlerinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma sonucunda dört farklı modelin Tablo 4.1.'de 1 m/s ile 7 m/s akış giriş hızlarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Dört farklı modelden elde edilen ısı taşınım katsayıları ve basınç düşümü sonuçları birbirleri ile Şekil 5.11. ve 5.12.'de karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda beklendiği üzere HAD analizlerinde hacimsel derişimleri yüksek olan MK(ST) Al_2O_3 ve MK(ST) CuO modellerinin ısı taşınım katsayıları diğer analizlere oranla yüksek çıkmıştır. Ayrıca analizlerdeki akışkanların hacimsel derişimleri birbirinden farklı olduğu için akışkan özellikleri de birbirinden farklı olmuş, bu da aynı giriş hızlarında analiz yapılmış olsa bile Reynolds sayıları birbirini tutmamıştır. Analizlere ait basınç düşümü değerleri Şekil 5.12.'de verilmiştir. Basınç düşümü değerleri $87 < \text{Re} < 998$ aralığında hesaplanmış, MK(SA) Al_2O_3 ve MK(SA) CuO modellerine ait $\text{Re} < 200$ için sonuçların kabul edilebilir basınç düşümü sınırları ($\Delta P < 50000$ Pa) içinde olduğu görülmüştür. Diğer taraftan yüksek hacimsel derişime sahip MK(ST) Al_2O_3 ve MK(ST) CuO modellerinin basınç düşümü verileri $\text{Re} > 50$ 'den sonra $\Delta P > 50000$ Pa değerini aşmakta, $2 \cdot 10^6$ Pa değerine ulaşmaktadır. Bu basınç düşümlerine sahip mikrokanailli ısı alıcılarının endüstriyellemesi mümkün değildir. Basınç düşümü grafiğine bakıldığında 0,12 mm hidrolik çapa sahip bir mikrokanailli soğutucunun ısı alıcısı olarak kullanılabilmesi ancak düşük hızlarda ($V < 1$ m/s) mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.



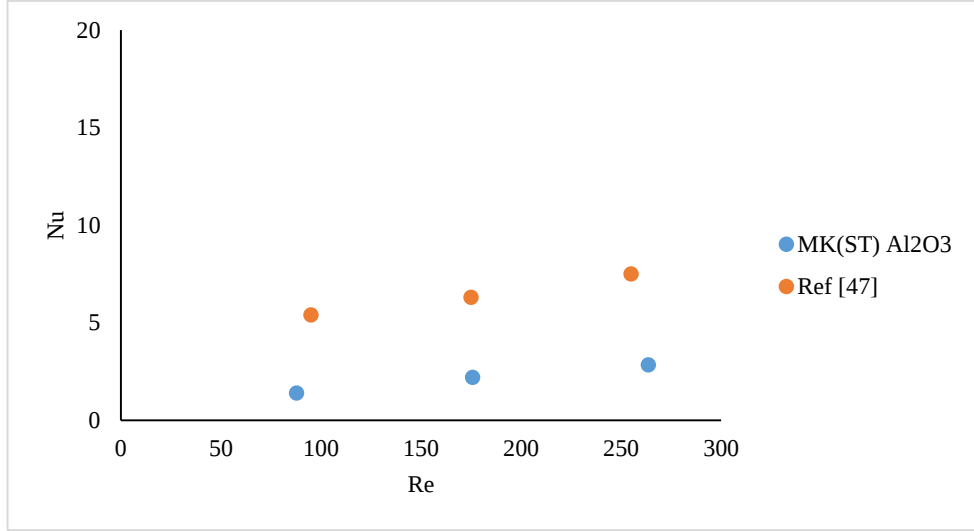
Şekil 5.11. Reynolds sayısının ısı taşınım katsayısına etkisi



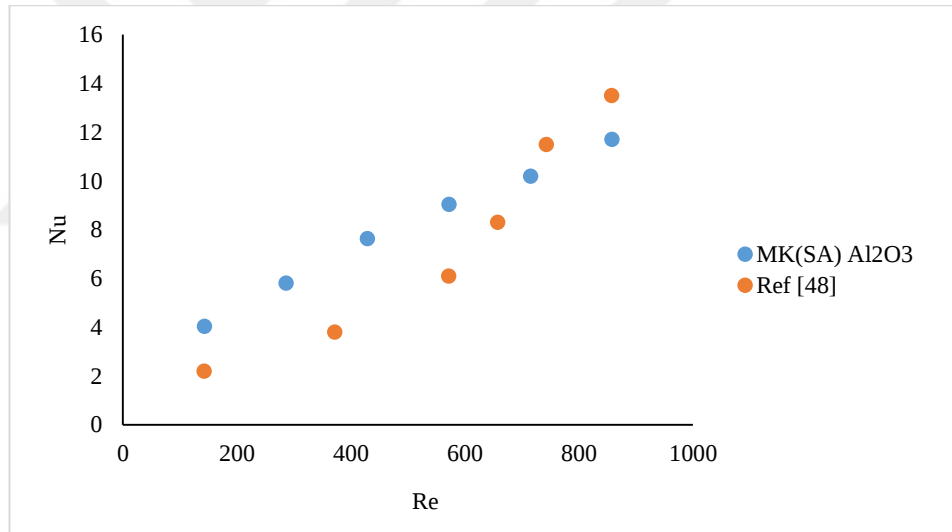
Şekil 5.12. Reynolds sayısının basınç düşüşüne etkisi

5.8. HAD Sonuçlarının Literatürdeki Mevcut Veriler ile Karşılaştırılması

Şekil 5.13. ve 5.14.'de Nusselt değişiminin literatürdeki veriler ile karşılaştırıldığında da görüldüğü üzere yapılan sayısal çalışmaların sonucu literatürdeki sayısal verilerle doğrulanmıştır.



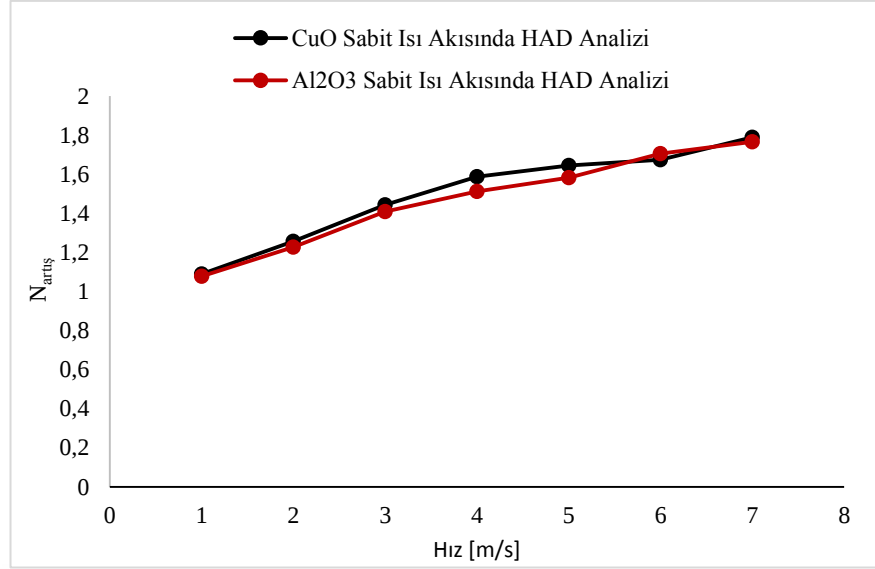
Şekil 5.13. HAD analizi sonuçları; Nusselt değişiminin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması



Şekil 5.14. HAD analizi sonuçları; Nusselt değişiminin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması

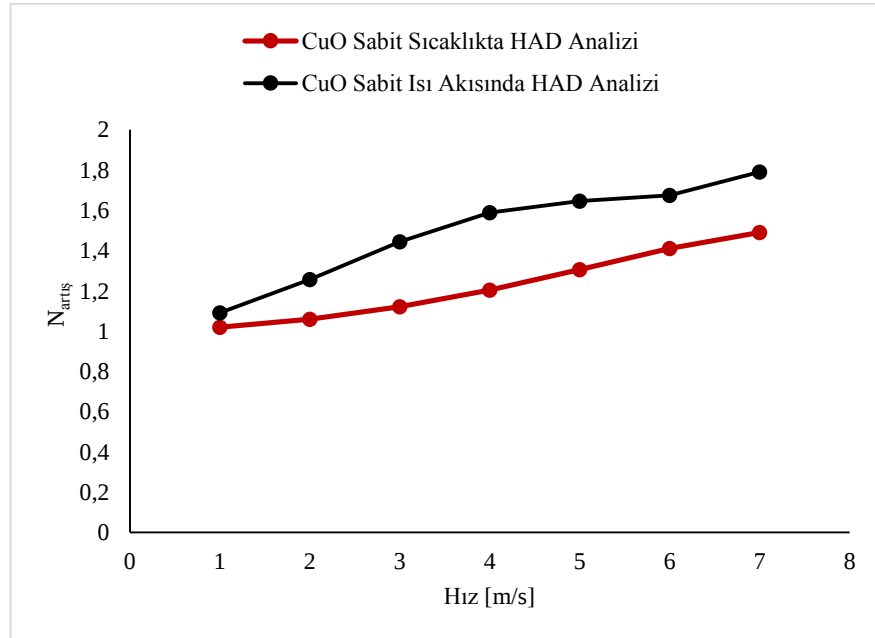
5.9. Isı Geçişinde Artırım

Kanatçıklı Mikrokanal içerisinde sabit ısı akısı ısıl koşulları altında nano akışkan akışının sonuçları ile kanatçıksız mikrokanalda akışkanın su olduğu durumda ısı geçişinde artış Şekil 5.15.'de verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere mikrokanalın içerisine kanatçık ve nanoakışkan eklenmesi durumunda ısı artırımını ($N_{artış}$) gerçekleşmektedir.

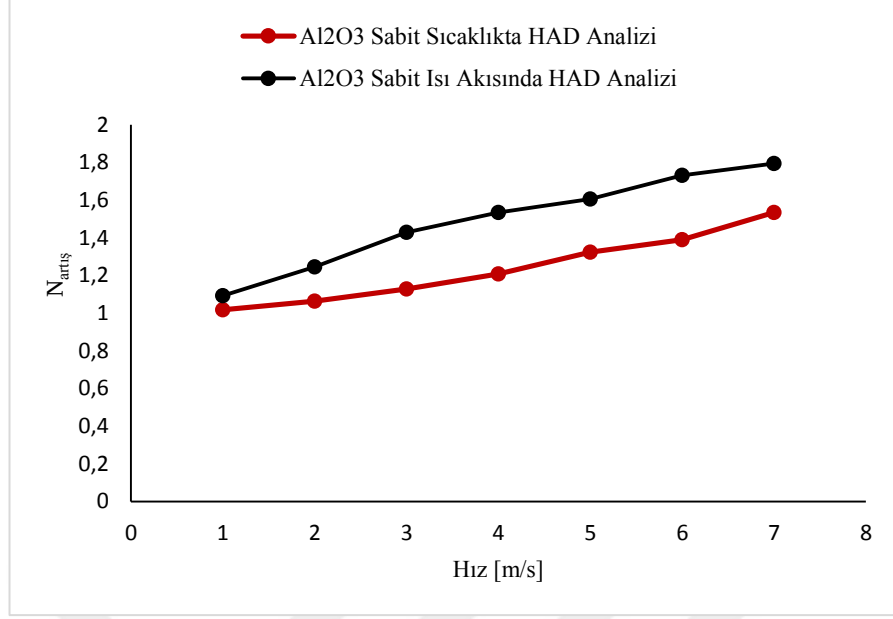


Şekil 5.15. Hız ile $N_{artış}$ arasındaki ilişki

Mikrokanal içerisinde sabit ısı akısı ve sabit sıcaklık ısı koşulları altında nano akışkan akışının sonuçları ile aynı mikrokanal kanatçıksız olduğu durumda ısı geçişinde artış Şekil 5.16.'de ve Şekil 5.17.'de verilmiştir. Sabit ısı akısında ve sabit sıcaklıkta yapılan analizlerde her iki analizde de nanoakışkan kullanılmış fakat kanatçıklı ve kanatçıksız durumlar incelenmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere kanatçıklı durumda ısı atılımının ($N_{artış}$) gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 5.16. Hız ile $N_{artış}$ arasındaki ilişki



Şekil 5.17. Hız ile $N_{artış}$ arasındaki ilişki

BÖLÜM 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Mikrokanallı ısı alıcıları etkin bir soğutma mekanizması olarak elektronik cihazlardan reaktör soğutma sistemlerine kadar çok geniş uygulama alanına sahip olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan elektronik cihazların ısı yüklerindeki artışlar çalışmaları ısı transferini iyileştirme yöntemlerine yöneltmiş, son 10 yılı aşkın bir süredir nano akışkanlar üzerine birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında ısı iyileştirme yöntemleri olarak bilinen kanatlı yüzeyler ile nano akışkan akışı birlikte incelenmiştir. Bu çalışmada dikdörtgen kesite sahip tek bir mikrokanal içerisine, farklı yerleşim düzenlerinde 6 çift dikdörtgen kanatçık yerleştirilmiştir. Mikrokanalın hidrolik çapı sabit tutularak, içerisine yerleştirilen kanatçıkların uzunluğu, genişliği ve yatay eksen ile oluşturduğu kanatçık açısı parametre olarak belirlenmiştir. Temel akışkan su seçilerek farklı oranlarda nanopartikül içeren (Al_2O_3 (%0 ile %0,4) ve CuO (%0 ile %0,4)) nanoakışkanın hacimsel derişikliğinin akış ve ısı geçişine özellikleri incelenmiştir. Hesaplama sonucunda farklı parametreler için girilen değerler Response Surface Optimization (Cevap Yüzey Optimizasyonu) metodu ile optimizasyon yapılarak optimum geometri ile hacimsel derişiklikler belirlenmiş ve farklı akış hızlarında analizleri yapılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi, Ansys Fluent 18.1 ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Kanatçıklı bir mikrokanalda nano akışkan akışı, sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı termal koşullarında olmak üzere dört farklı HAD analizi ile incelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- a. Tablo 5.1.'deki geometrik değerlere göre dört farklı kanatçıklı mikrokanalların bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri kullanılarak, nanoakışkanların 1 ila 7 m/s giriş akış hızlarında HAD analizleri yapılmıştır.

- b. Kanatçık kalınlığı ve uzunluğu değerlerinin yapılan analizlerde birbirleri ile uyum sağladığı görülerek, sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı termal koşullarında hacimsel derişimler için çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 5.1.'de görülen veriler doğrultusunda Nano partikülün az olması basınç düşümünün ve ısı transferi değerlerinin de düşük olmasına sebep olmuştur.
- c. Termal şartın etkisine bakıldığında, sabit ısı akısı ile yapılan optimizasyon çalışmalarına göre Nu sayısının değişimindeki artış oranı sabit sıcaklıkta yapılan optimizasyon çalışmalarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- d. Şekil 5.13. ve 5.14.'de Nusselt değişiminin literatürdeki veriler ile karşılaştırılmasında da görüldüğü üzere yapılan sayısal çalışmaların sonucu literatürdeki sayısal verilerle doğrulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Çiğdemoğlu, M., Isı İletimi Prensipleri, D.M.S Doruk Maybaacılık Sanayi, 1980.
- [2] Ma, J., Y.P. Huang, J. Huang, Y.L. Wang, Q.W. Wang. Experimental Investigations on Single-Phase Heat Transfer Enhancement with Longitudinal Vortices in Narrow Rectangular Channel, Nuclear Engineering and Design, vol: 240, 2010.
- [3] Chao Liu, J.T. Teng, J.C. Chu, Y.L. Chiu, S. Huang, S. Jin, T. Dang, R. Greif and H.H. Pan. Experimental Investigations on Liquid Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannel with Longitudinal Vortex Generators. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol:54, 2011.
- [4] Ugurlubilek, N., Numerical Investigation of Convective Heat Transfer and Fluid Flow in a Channel With Two Semi -Circular Shaped Obstacles. Suleyman Demirel University, Journal of Engineering Sciences and Design, 2 (2), 85-89, 2014.
- [5] Chen C., J.T. Teng, C.H. Cheng, S. Jin, S. Huang, C. Liu, M.T. Lee, H.H. Pan and R. Greif., A Study on Fluid Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannels with Various Longitudinal Vortex Generators. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol:69, 2014.
- [6] Abdollahi, A., Shams, M., Optimization of heat transfer enhancement of nanofluid in a channel with winglet vortex generator. Applied Thermal Engineering 91 (2015) 1116-1126.
- [7] Ebrahimi, A., E. Roohi and S. Kheradmand., Numerical Study of Liquid Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannel with Longitudinal Vortex Generators. Applied Thermal Engineering, vol: 78, 2015.

- [8] Can, O.F., Fluid Flow and Heat Transfer in a Channel with Noncircular Obstacles *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 11, 4291–4302, 2016.
- [9] Xuana, Y., Roetzelb, W., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 3701-3707.
- [10] Akbarinia, A., Behzadmehr, A., Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1327-1337.
- [11] Li, J., Kleinstreuer, C., Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 29 (2008) 1221-1232.
- [12] Akbari, M., Behzadmehr, A., Shahraki, F., Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 29 (2008) 545-556.
- [13] Akbarinia, A., Laur, R., Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 706-714.
- [14] Namburu, P.K., Das, D.K., Tanguturi, Krishna M., Vajjha, R.S., Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 290-302.
- [15] AbuNada, E., Oztop, H.F., Effects of inclination angle on natural convection in enclosures filled with Cu–water nanofluid. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 669-678.
- [16] Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., Nardini, S., Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 3632-3642.
- [17] Mohammed, H.A., Gunnasegaran, P., Shuaib, N.H., Heat transfer in rectangular microchannels heat sink using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 1496-1503.

- [18] Lelea, D., The performance evaluation of Al₂O₃/water nanofluid flow and heat transfer in microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 3891-3899.
- [19] Moghari, M., R., Akbarinia, A., Shariat, M., Talebi, F., Laur, R., Two phase mixed convection Al₂O₃–water nanofluid flow in an annulus. *International Journal of Multiphase Flow* 37 (2011) 585-595.
- [20] Hung, T.C., Yan, W.M., Wangc, X.D., Chang, C.Y., Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 2559-2570.
- [21] Kalteh, M., Abbassi, A., Avval, M.S., Frijns, A., Darhuber, A., Harting, J. Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering* 36 (2012) 260-268.
- [22] Ahmed, H.E., Mohammed, H.A., Yusoff, M.Z., Heat transfer enhancement of laminar nanofluids flow in a triangular duct using vortex generator. *Superlattices and Microstructures* 52 (2012) 398-415.
- [23] Wang, J., Zhao, Y., Heat and fluid flow characteristics of a rectangular channel with a small diameter circular cylinder as vortex generator. *International Journal of Thermal Sciences* 92 (2015) 1-13.
- [24] Wu, J., Zhao, J., Lei, J., Liu, Bo., Effectiveness of nanofluid on improving the performance of microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering* 101 (2016) 402-412.
- [25] Izadi, M., Mehryan, S.A.M., Sheremet, M.A., Natural convection of CuO-water micropolar nanofluids inside a porous enclosure using local thermal non-equilibrium condition. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 000 (2018) 1-15.
- [26] Naphon, P., Wiriyaart, S., Experimental study on laminar pulsating flow and heat transfer of nanofluids in micro-fins tube with magnetic fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 118 (2018) 297-303.

- [27] Elcioglu, E.B., Yazicioglu, A.G., Turgut, A., Anagun, A.S., Experimental study and Taguchi Analysis on alumina-water nanofluid viscosity. *Applied Thermal Engineering* 128 (2018) 973-981.
- [28] Ebrahimi, A., Rikhtegar, F., Sabaghan, A., Roohi, E., Heat transfer and entropy generation in a microchannel with longitudinal vortex generators using nanofluids, *Energy* 101 (2016) 190e201.
- [29] Kulkarni, D.P., Vajjha, R.S., Das, D.K., Oliva, D., Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 1774-1781.
- [30] Behi, M., Mirmohammadi, S.A., Investigation on Thermal Conductivity, Viscosity and Stability of Nanofluids. Master of Science Thesis EGI-2012.
- [31] Şahin, B., Çomaklı, K., Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Nanoakışkanlar ile Isı Transferinin İyileştirilmesi. *Mühendis ve Makine Cilt: 47 Sayı: 559*.
- [32] Mert, S., Otomobil Radyatörlerinde Nanoakışkan Kullanımı Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ocak 2017.
- [33] Einstein, A., 1906, A New Determination of Molecular Dimensions, *Annalen der Physik*, Vol. 19, No. 4, p. 289-306. Corrections, *ibid.*, Vol. 34, 1911, 591-592.
- [34] Brinkman, H. C., 1952, The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *J. Chemistry Phy*, 20, 571-581.
- [35] Lundgren, T. S., 1972, Slow Flow Through Stationary Random Beds and Suspensions of Spheres, *J. Fluid Mechanics*, 51, 847-853.
- [36] Batchelor G.K., Effect of Brownian-Motion on Bulk Stress in a Suspension of Spherical-Particles. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 83, Issue 1, 1977, Pg.97-117.
- [37] Sharma K.V., Sarma P.K., Azmi W.H., Mamat R., Kadirgama K., Correlations to Predict Friction and Forced Convection Heat Transfer Coefficients of Water Based Nanofluids for Turbulent Flow in a Tube, *IJMNTFTP* (2012), Volume 3, Number 4, Eq.5.

- [38] Maxwell J.C., A Treatise on Electricity & Magnetism, Volume 1, 3rd Edition, Dover Publications Inc, New York, 1891, Pg.440, Eq.17.
- [39] Hamilton R.L., Crosser O.K., Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems, Division of Industrial and Engineering Chemistry, 140th Meeting, ACS, Chicago, Volume 1, Number 3, 1962, 187-191, Eq.4.
- [40] 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, Annalen Der Physik, Volume 416, Issue 7, Pg.636-664, 1935.
- [41] Yu W., Choi S.U.S., The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model, Journal of Nanoparticle Research 5: 167-171, 2003, Eq.2-4.
- [42] Xie H., Fujii M., Zhang X., Effect of Interfacial Nanolayer on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005), 2926–2932, Eq.5,6,10b,11.
- [43] Sharma K.V., Sarma P.K., Azmi W.H., Mamat R., Kadirgama K., Correlations to Predict Friction and Forced Convection Heat Transfer Coefficients of Water Based Nanofluids for Turbulent Flow in a Tube, IJMNTFTP (2012), Volume 3, Number 4, Eq.4.
- [44] Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., Akışkanlar Mekaniği: Temelleri Ve Uygulamaları, Çeviri: Tahsin Engin, Güven Bilimsel Kitabevi 2008.
- [45] Lin, T.Y., Kandlikar, S.G., Heat Transfer Investigation of Air Flow in Microtubes—Part I: Effects of Heat Loss, Viscous Heating, and Axial Conduction J. Heat Transfer 135(3), 031703 (Feb 11, 2013) (9 pages) Paper No: HT-11-1434; doi: 10.1115/1.4007876 History: Received September 07, 2011; Revised May 25, 2012.
- [46] Parlak, N., Çelik, H., Mikrokanal İçerisine Yerleştirilmiş Kanatçıkların Akış Ve Isı Geçişine Etkisinin İncelenmesi, First International Conference on Energy Systems Engineering November 2-4, 2017.
- [47] Ebrahimi, A., Rikhtegar, F., Sabaghan, A., Roohi E., Heat transfer and entropy generation in a microchannel with longitudinal vortex generators using nanofluids, Energy 101 (2016) 190e201.

- [48] Yari Ghale, Z., Haghshenasfard, M., Nasr Esfahany, M., Investigation of nanofluids heat transfer in a ribbed microchannel heat sink using single-phase and multiphase CFD models, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 68 (2015) 122–129.



ÖZGEÇMİŞ

Halime ÇELİK, 01.12.1992’de İzmir’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İzmir’de tamamladı. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü 2016 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansını devam ettirmektedir.

