
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YAMUK KESİTLİ MİKRO ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE NANOAKIŞKANLARIN (Al_2O_3-SU ve CuO-SU) AKIŞ ve ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Faraz KHASTAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2016

Faraz KHASTAR tarafından hazırlanan "YAMUK KESİTLİ MİKRO ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE NANOAKIŞKANLARIN (Al_2O_3-SU ve CuO-SU) AKIŞ ve ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Oğuz TURGUT

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Başkan: Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Üye: Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ

Makina Mühendisliği, TOBB ETU Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Tez Savunma Tarihi: ...../……./……

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dökümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Faraz KHASTAR

22.06.2016

YAMUK KESİTLİ MİKRO ISI DEĞİŞTİRİCİLERDE NANOAKIŞKANLARIN (Al_2O_3-SU ve CuO-SU) AKIŞ ve ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Faraz KHASTAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2016

ÖZET

Gerçekleştirilen bu çalışmada, içerisinde nanoakışkanın geçtiği yamuk kesitli mikrokanal içerisinde akış alanı ve mikrokanalın dış kısmındaki katı kısım, akış ve ısı transferi için sayısal olarak incelenmiştir. Isı transferi ve akış, Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanı için laminar akış şartlarında sabit yüzey ısı akısı sınır şartında gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmada, Reynolds sayısının $200 \leq Re \leq 1500$, nanoakışkanın tipinin Al_2O_3-su ve CuO-su, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının $\%0 \leq voc \leq \%4$ ve mikro ısı değiştiricideki kanal sayısının n=3-5 akış ve ısı transferine etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışma ANSYS FLUENT 15.1 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isı değiştiricisinde kanal sayısı arttıkça nanoakışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı ve Nusselt sayısı (Nu) azalmıştır, fakat ısı transfer katsayısı (h) ve basınç düşümü artmıştır. Isı değiştiricisinin aynı mikrokanal sayısında olması durumunda yüksek hacimsel yüzde oranları için Al_2O_3-su nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının ve Nusselt sayısının (Nu) CuO-su nanoakışkanına göre düşük olduğu, fakat ısı transfer katsayısının (h) ve basınç düşümünün yüksek olduğu görülmüştür. Nanoakışkan tipinin sürtünme faktörü üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir.

Bilim Kodu : 91424

Anahtar Kelimeler : Isı transferi, nanoakışkan, mikrokanal, mikro ısı değiştiricisi, FLUENT

Sayfa Adedi : 142

Danışman : Doç. Dr. Oğuz TURGUT

NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN TRAPEZOIDAL CROSS-SECTIONED MICROCHANNELS USING (Al_2O_3/WATER and CuO/SU) NANOFLUIDS

(M. Sc. Thesis)

Faraz KHASTAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2016

ABSTRACT

A numerical study is performed to investigate the effect of nanofluids application on heat transfer and fluid flow characteristics in a trapezoidal shaped microchannel heat sink (MCHS) for different Reynolds numbers 200-1500. In this study, the MCHS performance using Al_2O_3/water and CuO/water nanofluids with volume fraction ranges from 0% to 4% was utilized as coolant. Considering constant Reynolds number and constant total cross section area, the study is conducted for 3,4, and 5 aligned microchannel. The heat transfer governing equations are solved for a three-dimensional, single phase, incompressible, steady, laminar flow, with constant surface heat flux boundary condition by applying finite volume method. The MCHS performance is evaluated in terms of temperature profile, heat transfer coefficient, pressure drop, friction factor, Nusselt number, and velocity and temperature counters. The results indicated that by increasing the number of microchannel for a constant heat flux, both Nusselt number and external temperature of fluid are decreased while the heat transfer coefficient and pressure drop of the MCHS are increased. However, for the nanofluid with high volume concentration in a constant number of microchannel, external temperature and Nusselt number of Al_2O_3/water nanofluid is lower than CuO/water nanofluid while the heat transfer coefficient and pressure drop is higher than that of CuO/water. Also, the results showed that the type of nanofluid has no effect on friction factor.

Science Code : 91424
Key Words : Nanofluid, heat transfer, microchannel, MEMS, FLUENT
Page Number : 142
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Oğuz TURGUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan saygıdeğer hocam, Doç. Dr. Oğuz TURGUT'a ve çalışma süresinde tüm zorlukları benimle taşıyan ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli Anneme ve Babama teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. MİKROKANAL ISI DEĞİŞTİRİCİLER VE NANOAKIŞKANLAR ... 3

2.1. Mikrokanalların Tanıtımı 3

2.2. Nanoakışkanların Isı Transferine Etkisi 6

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 13

3.1. Giriş 13

4. PROBLEMİN TANITIMI ve MATEMATİKSEL FORMÜLASYON .. 23

4.1. Sayısal Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ve Kullanılan Paket Programın Özellikleri 27

5. SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARI 29

5.1. Kullanılan Çözüm Tekniğinin Doğrulanması 29

5.2. Mevcut Sayısal Çalışma Sonuçları 35

5.2.1. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al_2O_3-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçları 36

5.2.2. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde CuO-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçları 65

5.2.3. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al2O3-su ve CuO-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının kıyaslanması 82

Sayfa

5.2.4. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde farklı ısı akısı olduğu durumunda elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının kıyaslanması 94

6. SONUÇ VE TARTIŞMA..... 99

KAYNAKLAR 101

EKLER..... 105

EK-1. Al_2O_3-su nanoakışkanı için 106

EK-2. CuO-su nanoakışkanı için sonuçlar..... 139

ÖZGEÇMİŞ 142

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Hidrolik çapa göre kanalların sınıflandırılması 3

Çizelge 2.2. Literatürde kullanılmış olan mikrokanalların boyutları ve kullanılan akışkanlar 4

Çizelge 2.3. Çalışmada kullanılan mikro ısı değiştiricilerin boyutları. 5

Çizelge 2.4. Nanoakışkan olarak kullanılan metal ve metal oksit parçacıkların ısıl özellikleri 11

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan temel akışkan (su) ve nanoparçacıkların 293,15K sıcaklıkta fiziksel özellikleri 25

Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların farklı hacimsel oranlarındaki fiziksel özellikleri 26

Çizelge 5.1. Dikdörtgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki parametrelerin değerleri 31

Çizelge 5.2. Hücre sayıları ve sonuçlar 32

Çizelge 5.3. Literatürdeki deneysel çalışmada (Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah, 2012) kullanılan parametre değerleri ve elde edilen çıkış sıcaklık değerleri 33

Çizelge 5.4. Beş kanallı yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde üç farklı çözüm ağı için sonuçlar 38

Çizelge 5.5. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde kanal sayısına göre Re=1000 ve %1 Al2O3-su nanoakışkanı için fiziksel ve ısıl özellikler 39

Çizelge 5.6. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde mikrokanal sayısına göre Re=1000 ve %1 CuO-su nanoakışkanı için fiziksel ve ısıl özellikler 65

Çizelge 6.1. Al2O3-su ve CuO-su nanoakışkanları için 3-5 kanal sayısındaki voc=%4 için ısı transferi katsayısının (h) saf suya göre değişimi 100

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1.	Çalışmada kullanılan mikro ısı değiştiricilerin genel görünümü (a) üç kanallı, (b) dört kanallı, (c) beş kanallı	5
Şekil 3.1.	Mevcut sayısal çalışmada kullanılan yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi	21
Şekil 4.1.	Çalışmada kullanılan ısı değiştiricisi ve kordinat ekseninin görünümü	23
Şekil 5.1.	Dikdörtgen kesitli mikrokanalın (a) üç boyutlu görünümü, (b) önden görünümü ve (c) yandan görünümü	30
Şekil 5.2.	Ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi	33
Şekil 5.3.	Akışkanın kanaldan çıkış sıcaklıklarının Reynolds sayısı ile değişimi	35
Şekil 5.4.	(a) üç, (b) dört ve (c) beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki mikrokanalların görünümü	37
Şekil 5.5.	n=5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarında akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2 ve (f) voc=%4	40
Şekil 5.6.	Al_2O_3-su nanoakışkanı için farklı hacimsel yüzde oranlarında akışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) n=3 (b) n=4 ve (c) n=5	41
Şekil 5.7.	Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi .	42
Şekil 5.8.	Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	43
Şekil 5.9.	Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranlarında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi .	44
Şekil 5.10.	Al_2O_3-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 kanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	46
Şekil 5.11.	Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi	47

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.12. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 için Al_2O_3-su nanoakışkanın çeşitli hacimsel yüzde oranlarında ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi..... 48

Şekil 5.13. Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisi..... 49

Şekil 5.14. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=200 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranında her bir kanal için sıcaklık konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal..... 51

Şekil 5.15. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 5mm kesitinde Re=200 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranında her bir kanal için sıcaklık konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal 52

Şekil 5.16. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 10mm kesitinde Re=200 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranında her bir kanal için sıcaklık konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal 53

Şekil 5.17. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda Re=200 ve %4 hacimsel oranında (a) z=2,5mm, (b) z=5mm ve (c) z=10mm'deki sıcaklık konturları 54

Şekil 5.18. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) Re=200, (b) Re=500 ve (c) Re=1000 55

Şekil 5.19. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 56

Şekil 5.20. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=500 ve voc=%0,5 hacimsel yüzde oranı için her bir kanaldaki hız konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal..... 58

Şekil 5.21. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=500 ve voc=%1 hacimsel yüzde oranı için her bir kanaldaki hız konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal 59

Şekil 5.22. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=500 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranı için her bir kanaldaki hız konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal..... 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.23. n=5 için üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda Re=500 ve %1 hacimsel oranı için kanal girişinden itibaren (a) z=2,5mm (b) z=5mm, (c) z=8mm ve (d) z=10mm'deki hız konturları 62

Şekil 5.24. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=10mm'de %1 hacimsel oranı için hız konturları (a) Re=200, (b) Re=500 ve (c) Re=1000 63

Şekil 5.25. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalın z=5mm'deki hız konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 64

Şekil 5.26. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4 67

Şekil 5.27. CuO-su nanoakışkanı için farklı hacimsel yüzde oranlarında nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 68

Şekil 5.28. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi . 69

Şekil 5.29. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi 70

Şekil 5.30. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranlarında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi . 71

Şekil 5.31. CuO-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi 72

Şekil 5.32. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranlarında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi 73

Şekil 5.33. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 için CuO-su nanoakışkanın çeşitli hacimsel oranlarında ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi 74

Şekil 5.34. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisi 75

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.35. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda Re=200 ve %4 hacimsel oranı için (a) z=2,5mm, (b) z=5mm ve (c) z=10mm'deki sıcaklık konturları 76

Şekil 5.36. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) Re=200, (b) Re=500 ve (c) Re=1000 77

Şekil 5.37. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 78

Şekil 5.38. Beş adet yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalda Re=500 ve %1 hacimsel oranı için kanal girişinden itibaren (a) 2,5mm, (b) 5mm, (c) 8mm ve (d) 10mm'deki hız konturları . 79

Şekil 5.39. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalda z=10mm'de %1 hacimsel oranı için sıcaklık konturları (a) Re=200 (b) Re=500 ve (c) Re=1000 80

Şekil 5.40. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalın z=5mm'deki hız konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 81

Şekil 5.41. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının ve nanoakışkan türünün nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi..... 84

Şekil 5.42. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi..... 86

Şekil 5.43. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi 88

Şekil 5.44. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki nanoakışkan türünün ve mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisi..... 89

Şekil 5.45. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının basınç düşümü üzerindeki etkisi 90

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.46. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a) Re=200 ve (b) Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi..... 91

Şekil 5.47. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a) Re=200 ve (b) Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki Nusselt sayısının nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı ile değişimi 92

Şekil 5.48. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a) Re=200 ve (b) Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki basınç düşümünün nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı ile değişimi 93

Şekil 5.49. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a). Re=200 ve (b). Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki ısı transferi katsayısının yamuk kesitli mikrokanal sayısı ile değişimi 94

Şekil 5.50. Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki farklı ısı akısı için nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi..... 95

Şekil 5.51. Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki farklı ısı akısı için nanoakışkanın ortalama ısı transferi katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi 96

Şekil 5.52. Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki farklı ısı akısı için nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi 97

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{A_c}$	Yamuk kesitli mikrokanalın kesit alanı (m^2)
C	Özgül ısı (cal/g °C)
$\mathbf{D_h}$	Hidrolik çap (m)
k	Isıl iletkenlik (W/m·K)
n	Mikrokanal sayısı
Nu	Nusselt sayısı
P	Boyutsuz basınç ($P/\rho^2 U_1^2$)
Re	Reynolds sayısı
s	Şekil faktörü
T	Sıcaklık (K)
U	Akışkanın X-yönünde boyutsuz hızı
u	Akışkanın x-yönündeki hızı (m/s)
V	Akışkanın Y-yönünde boyutsuz hızı
v	Akışkanın y-yönündeki hızı (m/s)
voc	Nanoakışkanların hacimsel yüzde oranları (%)
W	Akışkanın Z-yönünde boyutsuz hızı
w	Akışkanın z-yönündeki hızı (m/s)
$\dot{\mathbf{Q}}$	Kanal yüzeyinden akışkana aktarılan enerji (W)
$\dot{\mathbf{m}}$	Akışkanın kütlesel debisi (kg/s)
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk (kg/m^3)
$\boldsymbol{\mu}$	Nanoakışkanın dinamik viskozitesi (kg/m·s)
f	Ortalama Fanning sürtünme faktörü (-)
$\boldsymbol{\upsilon}$	Kinematik viskozite (m^2/s)
$\boldsymbol{\theta}$	Akışkanın boyutsuz sıcaklığı ($T_{nf} - T_1/T_w - T_1$)
1	Giriş
2	Çıkış

Simgeler	Açıklamalar
f	Temel akışkan
nf	Naono parçacık
w	Duvar

1. GİRİŞ

Tarih boyunca, insanlar yaşam standartlarını iyileştirmek için ısı transferi performansı için ısı transferi konusunda çalışmalar yapmışlardır. Isı pompaları, ısı motorları ve benzeri cihazların gelişmesiyle birlikte ısı transferi daha önemli bir hale gelmiştir. Isı değiştiricisi cihazları, ısı transferi akışkanları ve ısı transferi ile ilgili diğer bileşenler icat edilmiş ve kısa bir zamanda gelişmiştir.

Birçok ısı transferi uygulamalarında saf sıvı akışkanlar dikkate alınmıştır. Halbuki katı maddelerin iletkenliği sıvılardan daha yüksektir (Yang, Tsai, Wang ve Lin, 2014). Bu nedenle ısı transferinin daha iyi performansı için bilim adamları katı parçacıklarını nano boyutlarında (100 nm den küçük) temel (ana) akışkanlara karıştırmayı düşünmüşler ve elde edilen akışkanı ısı transferinde verimli soğutucu akışkan olarak kullanmaya başlamışlardır. Bu yeni akışkanlara ise nanoakışkanlar ismini vermişlerdir.

Nanoakışkanların son yıllarda yeni ısı transferi akışkanları olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu akışkanlar, su ve etilen glikol gibi bir sıvı akışkan ile alüminyum, bakır ve titanyum gibi nano boyutunda parçacıkların karıştırılması ile elde edilmektedir. Bu akışkanlar parçacıkların fiziksel özelliklerinden dolayı ısı transferinin artmasına neden olmaktadır.

Teknolojinin gelişmesi ile elektronik cihazlar küçük boyutlarda üretilmeye başlamıştır. Mikrokanallar bu cihazların soğutulması için tercih edilirler. Mikrokanallar su ve hava gibi akışkanlar kullanılarak üretimde kullanılırlar. Bilim adamları son yıllarda mikrokanalların ısı transferini artırmak amacı ile nanoakışkanları mikrokanallarda kullanmaya başlamışlardır.

Yapılan bu çalışmada, yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferi ve akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada ticari program olan ANSYS FLUENT 15.1 paket programı kullanılmıştır.

2. MİKROKANAL ISI DEĞİŞTİRİCİLER VE NANOAKIŞKANLAR

Bu bölümde mikrokanal ısı değiştiriciler ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Mikrokanalların Tanıtımı

Kanallar hidrolik çapları esas alınarak sınıflandırılırlar. Literatürde kanalların sınıflandırılması ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Kandlikar ve Grande (2003) hidrolik çaplarına göre kanalları Çizelge 2.1'deki gibi sınıflandırmışlardır. Çizelge 2.1'de görüldüğü üzere hidrolik çapın 10 μm ile 200 μm aralığındaki kanallar mikrokanal olarak tanımlanmıştır. Çizelge 2.1'de verilen D_h kanalın hidrolik çapı olup 4A/P olarak ifade edilmiştir (A-kanal kesit alanı ve P-kanal kesiti çevre uzunluğu).

Çizelge 2.1. Hidrolik çapa göre kanalların sınıflandırılması

Makrokanallar	$D_h > 3$ mm
Minikanallar	3 mm $\geq D_h >$ 200 μm
Mikrokanallar	200 μm $\geq D_h >$ 10 μm
Geçiş mikrokanallar	10 μm $\geq D_h >$ 1 μm
Geçiş nanokanallar	1 μm $\geq D_h >$ 0,1 μm
Nanokanallar	0,1 μm $\geq D_h$

Mehendale, Jacobi ve Shah (2000) hidrolik çapı 1-100 μm aralığındaki kanalları mikrokanal olarak ifade etmişlerdir.

Literatürde mikrokanallar ile yapılan bazı çalışmalarda kullanılan mikrokanalların boyutları Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu çalışmalarda mikrokanalların hidrolik çapları 49-950 μm aralığında seçilmiştir.

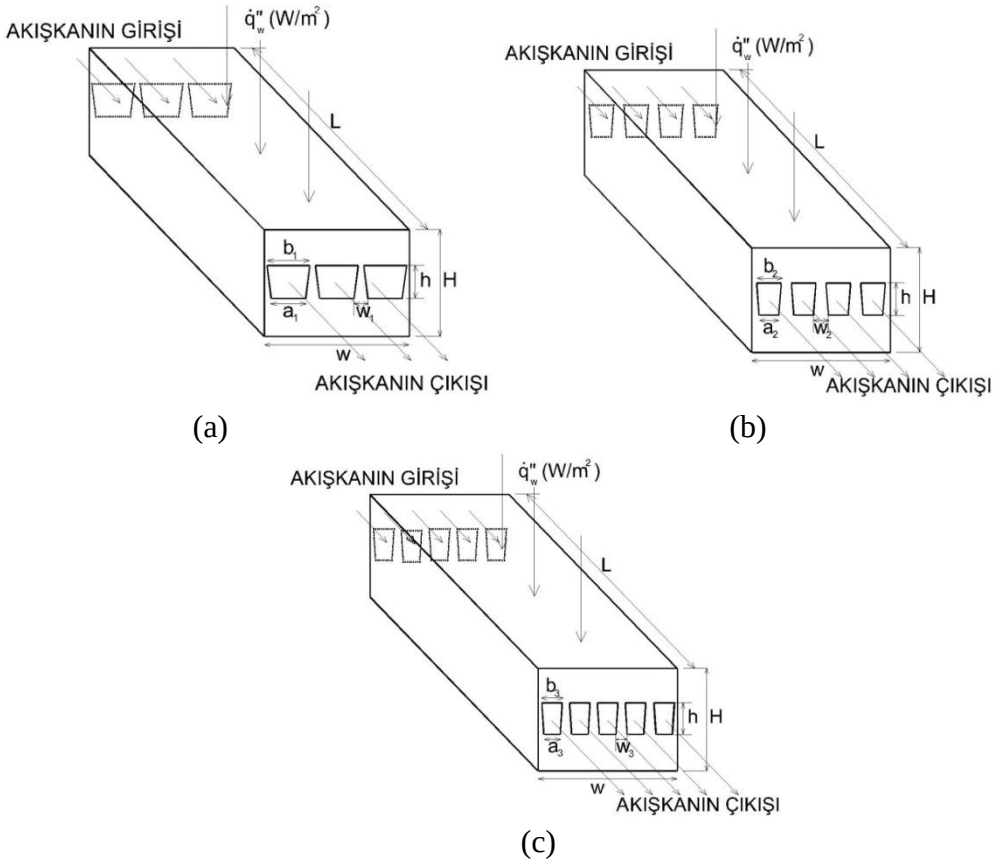
Çizelge 2.2. Literatürde kullanılmış olan mikrokanalların boyutları ve kullanılan akışkanlar

Araştırmacılar, Yıl	Geometri	Kanal boyutları (μm)	Hidrolik çap D_h (μm)	Akışkan
Lee, Garimella ve Liu (2005)	Dikdörtgen	194 x 884 229 x 1250 300 x 1520 339 x 1895 534 x 2910	318 387 501 575 903	Deiyonize su
Hung, Yan, Wang ve Chang (2012)	Dikdörtgen	56 x 44 55 x 45 50 x 50	49 49,5 50	Nanoakışkan
Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib (2010)	Dikdörtgen	430 x 280	339,15	Nanoakışkan
Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib (2011)	Yamuk	280 x 225	318	Nanoakışkan
Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib (2011)	Üçgen	280 x 430 x 452	230	Nanoakışkan
Wu, Wu ve Cheng (2009)	Yamuk	447,1 x 219,6	194,5	Nanoakışkan
Esmaeilnejad, Aminfar ve Neistanak (2014)	Dikdörtgen	56 x 320 55 x 287 50 x 302	95 92 85	Nanoakışkan

Mevcut çalışmada kullanılan mikrokanallar;

Bu çalışmada yamuk kesitli mikro ısı değiştiriciler içerisindeki akış ve ısı transferi özellikleri laminar akışta nanoakışkanlar için sayısal olarak incelenmiştir. Mevcut sayısal çalışmada kullanılan mikrokanal geometrisi Şekil 2.1'de verilmiştir. Çalışma üç farklı kanal sayısı için gerçekleştirilmiştir. Bunlar yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olma durumları olup sırasıyla Şekil 2.1a, 2.1b ve 2.1c'de görüldüğü gibidir. Şekil 2.1'de h yamuk kesitli mikrokanalın yüksekliğidir. H, W ve L sırasıyla mikrokanallı ısı değiştiricisinin yüksekliği, genişliği ve akış yönündeki uzunluğudur. Şekil 2.1'de a_1, a_2 ve a_3 sırasıyla yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde üç, dört ve beş adet yamuk kesitli mikrokanalların kesitteki alt kenar uzunluğudur. b_1, b_2 ve b_3 sırasıyla yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde üç, dört ve beş adet yamuk kesitli mikrokanalların kesitteki üst kenar uzunluğudur. w_1, w_2 ve w_3 sırasıyla üç, dört ve beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki iki mikrokanal arasındaki mesafedir.

Her bir mikrokanallı ısı değiştiricisi için (üç, dört ve beş adet) mikrokanalların toplam kesit alanları (A_c) ve mikrokanalların yüksekliği (h) sabit tutulmuştur. Böylece mikrokanal sayısının, akış debisinin, nanoakışkan tipinin ve nanoakışkanların hacimsel oranlarının akış ve ısı transferi üzerindeki etkisi sabit ısı akısı sınır şartında sayısal olarak incelenmiştir. Kanal sayısı değiştiği zaman D_h değişmekte ve sabit Reynolds sayısında çalışabilmek için hız değiştirilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan mikro ısı değiştiricilerin genel görünümü (a) üç kanallı, (b) dört kanallı, (c) beş kanallı

Çalışmada kullanılan ısı değiştiricilerin boyutları Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Çalışmada kullanılan mikro ısı değiştiricilerin boyutları.

Isı değiştiriciler	(μm)	(μm)	h(μm)	H(μm)	W(μm)	L(μm)	D_h(μm)
Üç kanallı ısı değiştiricisi	a_1=375	b_1=466	430	1500	1900	10 000	424
Dört kanallı ısı değiştiricisi	a_2=290	b_2=350	430	1500	1900	10 000	366
Beş kanallı ısı değiştiricisi	a_3=225	b_3=280	430	1500	1900	10 000	317

2.2. Nanoakışkanların Isı Transferine Etkisi

Tarih boyunca, insanlar ısı transferinin gelişmesi için çalışmalar yapmışlardır. Teknolojinin gelişmesi ile cihazlarda ısı aktarma konusu önemli bir konu olmuştur. Isı değiştiricisi cihazları, ısı transferi akışkanları ve ısı transferi ile ilgili olan diğer cihazlar icat edilmiş ve geliştirilmiştir. Ayrıca, cihazlar daha güçlü sistemlere sahip olmuşlar ve boyutları zamanla küçülmeye başlamıştır. Bundan dolayı ısı transferinin artırılması için gelişen teknoloji ile yeni metotlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu durumda ısı transferinin alanını artırmak artık uygun bir çözüm olarak görülmemektedir.

Bilim adamları bu sorunu gidermek için ısı transferi konusunda iki genel metot kullanmışlardır. Birincisi mikro ve nano ölçekli kanalların kullanılmasını geliştirmişlerdir. İkinci metot olarak ise nanoakışkanların ısı değiştiricilerinde soğutucu akışkan olarak kullanılmasıdır.

Bilindiği üzere su, etilen glikol, motor yağı ve benzeri akışkanların ısıl iletkenlikleri düşüktür. Bundan dolayı; yüksek hacimde ısıyı taşıyan cihazlar için bu akışkanlar uygun değildir. Bu tür cihazların soğutulması ise cihazların performansını etkileyen önemli husustur. Bu nedenle bu cihazların iyi bir şekilde soğutulmasını sağlamak gerekmektedir.

Isıl iletkenliğin, sistemlerin ısı transferinde çok önemli bir görevi vardır. Bu nedenle sistemin iyi soğutulmasını sağlayabilmek için yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan akışkanların kullanılması gerekmektedir.

Düşük ısıl iletkenliğe sahip olan etilen glikol, motor yağı gibi temel akışkanlara, yüksek ısıl iletkenliğe sahip küçük parçacıkların eklenmesi, ilk kez Ahuja tarafından ısı transferini artırmak için önerilmiştir (Ahuja, 1975, 1982). Ahuja polistiren parçacıklarını temel akışkan içerisinde kullanmıştır. Fakat, bu parçacıklar kanallarda tıkanma problemi oluşturmuştur. Bunun üzerine bilim adamları daha küçük (nano ölçekli) parçacıkların kullanılmasını önermişlerdir. Bu parçacıklar nanoparçacıklar olarak adlandırılmışlardır. Bu parçacıklar özel yöntemler ile temel akışkanların içinde birleşik ve homojenleştirilmiş bir şekilde dağıtılmıştır. Bu yöntemi Choi (1995) ilk kez ısı transferinde kullanmıştır.

Bu nedenlerden dolayı, nanoakışkanların ısı transferini geliştirmek için kullanılışı önemli bir konu haline gelmiştir.

Nanoakışkanların bileşenleri;

Nanoakışkanlar genellikle nanoparçacıkların temel akışkana karıştırılması ile elde edilirler. Burada asıl amaç ısı transferi uygulamalarında akışkanın ısı transfer katsayısını artırmaktır. Bu nedenle nanoparçacıklar genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan maddelerden yapılırlar. Bu maddeler metal veya metal oksit maddelerden seçilir (Das, Putra, Thiesen ve Roetzel, 2003; Chandrasekar, Suresh ve Bose, 2010; Chon, Kihm, Lee, ve Choi, 2005; Duangthongsuk, Wongwises, 2009; Hong, Yang ve Choi, 2005).

Bakır (Cu), alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum oksit (TiO_2), bakır oksit (CuO), silisyum oksit (SiO), gümüş (Ag) ve gümüş oksit (AgO) yaygın olarak kullanılan metal ve oksit parçacıklarından sayılırlar. Literatürde elmas gibi diğer türlü maddelerinde kullanıldığı ifade edilmiştir (Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib, 2011). Nanoakışkanlarda temel akışkanın seçimi ısı transferinin kullanım amacına bağlıdır.

Nanoakışkanların hazırlanması;

Bilim adamları nanoparçacıkları ve temel akışkanı kullanarak nanoakışkanların hazırlanması için tek ve çift kademe olarak iki yöntem sunmuşlardır. Nanoakışkanların hazırlanması ile ilgili detaylı inceleme Li, Zhou, Tung, Schneider and Shengqi (2009) tarafından yapılmıştır.

Tek kademeli yöntemde, tek kademede nanoparçacıklar temel akışkanın içerisine karıştırılarak nanoakışkan elde edilir. Bu yöntemde metal parçacıkları ısıtılır ve buhar haline getirilir, sonra buharlanmış metal parçacıklar temel akışkan ile birlikte katılaştırılır. Böylece temel akışkanın içinde nano boyutunda parçacıklara dönüştürülür. Bu yöntemde nanoakışkan tam kararlı olarak elde edilir. Bu yöntem yeni bir yöntem olduğundan dolayı bilim adamları tarafından araştırılmaya devam etmektedir.

İki kademeli yöntemde ise, nanoparçacıklar gaz yoğuşturulması, mekanik aşındırma ve kimyasal çöktürme yöntemlerinden biriyle üretilebilmektedir (Li, Zhou, Tung, Schneider and Shengqi, 2009). Bu yöntem ile ilgili literatürde çok sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür.

Fakat, bu yöntemde nanoakışkan kararlı bir akışkan olmayıp, nanoparçacıklar küçük demetçiklere ayrılarak topaklanmalar meydana gelmektedir.

Nanoakışkanların ısıl özellikleri;

Nanoakışkanların ısı transferini iyileştirme teorisi onların yüksek ısıl iletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Isı transferi konusunda nanoakışkanların ısıl özellikleri ve özellikle ısıl iletkenlikleri önemli bir husustur. Temel akışkanın türü, sıcaklık, parçacıkların türü, boyutu, şekli, hacimsel oranı, yapımı ve dağıtım metodu gibi parametreler nanoakışkanların ısıl iletkenliğini değiştirmektedir. Nanokışkanların ısı transferinde kullanılması için gerekli ve önemli olan husus ısıl iletkenliklerinin doğru olarak belirlenmesidir.

Nanoakışkanların yoğunluk ve özgül ısısı ısı transferi performansında etkileyici diğer iki parametredir. Nanoakışkanların ısıl özelliklerini araştırmak için genelde nanoakışkan temel akışkan ile karşılaştırılır.

Nanoakışkanların yoğunluğu ile ilgili ilk eşitlik Pak ve Cho (1998) tarafından Eş. 2.1'deki gibi verilmiştir.

$$\rho_{nf} = voc \cdot \rho_p + (1- voc)\, \rho_f \qquad (2.1)$$

Burada ρ yoğunluk (kg/m^3) ve voc nanoakışkanın içindeki nanoparçacıkların hacimsel oranının yüzdesini ifade etmektedir. İndis p nanoparçacıkları, f temel akışkanı ve nf ise nanoakışkanı ifade etmektedir. Eş. 2.1 Al_2O_3 ve Ti_2O nanoakışkanlarının %4,5 hacimsel oranına kadar, 25 ºC sıcaklığında gerçekleştirilen deneysel çalışma ile elde edilmiştir. Pak ve Cho yaptıkları deneysel sonuçlar ile bu denklemin sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir (Pak ve Cho, 1998). Nanoakışkanların yoğunluğu ile ilgili diğer bir deneysel çalışma Vajiha, Das ve Mahagaonkar (2009) tarafından yapılmıştır. Nanoakışkanların çeşitli hacimsel oranlarında ve sıcaklıklarda yoğunlukları bulunmuştur ve sonuçlar Eş. 2.1 ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların bu denklem ile uyum içerisinde olduğu ifade edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan sayısal çalışmada nanoakışkanın yoğunluğu için bu eşitlik kullanılmıştır.

Isı transferi uygulamalarında, akışkanın özgül ısı değerinin yüksek olması arzu edilir. Nanoakışkanların özgül ısı değeri için literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar incelendiğinde Eş. 2.2'nin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür (Pak ve Cho, 1998).

$$\rho_{nf} = v\circ c \cdot \rho_p + (1 - v\circ c)\rho_f \tag{2.2}$$

Fakat bu eşitliğin kullanılması zamanla araştırmacılar arasında çelişki yaratmıştır. Bu denklemden çıkan sonuç (J/kg·K) cinsinden değildir. Genellikle özgül ısı ağırlık cinsinden olması gerekir ve bu sabit değeri ağırlığa göre ifade etmek gerekmektedir. Bundan dolayı Eş. 2.3 özgül ısı değeri için daha uygun bir denklem olarak ifade edilmektedir (Zhou ve Ni, 2008).

$$C_{nf} = \frac{v\circ c \cdot (\rho C)_p + (1 - v\circ c)(\rho C)_f}{\rho_{nf}} \tag{2.3}$$

Bu denklemin doğruluğu Zhou ve Ni (2008) tarafından deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Bu tez kapsamında yapılan sayısal çalışmada nanoakışkanın özgül ısı değeri için Eş. 2.3 kullanılmıştır.

Akışkanların ısıl iletkenlikleri ısı transferini en fazla etkileyen ısıl özelliklerdendir. Amaç, uzun vadeli ısı transferi uygulamalarında bu değeri yüksek tutmaktır. Fakat, uzun vadeli uygulamalarda nanoakışkanların çökelme ve topaklanma sorunları oluşmaktadır (Prasher, Phelan ve Bhattacharya 2006). Nanoakışkanların ısıl iletkenliği, araştırmacılar tarafından ilgi konusu olmuştur. Genel olarak, araştırmacılar ısıl iletkenliğini etkileyen parametrelerin üzerinde odaklanmış olup teorik ve deneysel çalışmalar ile bu değeri ifade edebilen denklemler bulmuşlardır. Maxwell (1873) nano ölçeğinde olmayan parçacıklar için bir model sunmuştur. Bu modelde parçacıklar arasında birbirini etkileyen güç yok sayılmıştır. Ayrıca parçacıkların şekil ve formu dikkate alınmamıştır. Model şu şekilde ifade edilmiştir;

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\cdot v\circ c}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\cdot v\circ c} \tag{2.4}$$

Nanoakışkanların öncü araştırmacılarından olan Choi ve Eastman (1995) ısıl iletkenlik ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmacılar, Hamilton ve Crosser (1962)'e ait olan modeli nanoakışkanların ısıl iletkenliğini hesaplamak için önermişlerdir. Bu model nanoparçacıklardan büyük süspansiyonlar için yapılmıştır. Ayrıca, bu model ısıl iletkenliğin ilk tahminlerinden sayılmakta ve nanoparçacıkların türü, şekli ve hacimsel oranının ısıl iletkenliğe etkisini görmek için uygun olarak ifade edilmiştir. Bu model Eş. 2.5 ile verilmiştir;

$$\frac{k_{nf}}{k_f}=\frac{k_p+(s-1)k_f+(s-1)(k_p-k_f)\cdot voc}{k_p+(s-1)k_f-(k_p-k_f)\cdot voc} \tag{2.5}$$

Bu modelde, s şekil faktörü olarak ifade edilmiştir.

Nanoakışkanların diğer bir ısıl özelliği ise viskoziteleridir. Isı transferi uygulamalarında akışkanın dolaşımını düşük güç ile yapmak için düşük yoğunluğa sahip olan akışkan seçilir. Yüksek miktarda ısı transferi yapılması gereken uygulamalarda nanoakışkanların viskozitesi pompalama gücünü artırabilir. Bu konu nanoakışkanların sorunlarından sayılmakta ve bu konunun incelenmesi gerekmektedir. Nanoakışkanların viskozitesi nanoparçacıkların türüne, hacimsel oranlarına, boyutlarına ve temel akışkanın türüne bağlıdır. Viskozite, nanoparçacıkların hacimsel oranlarının artması ve boyutlarının küçülmesi ile artmaktadır. Maiga, Nguyen, Galanis ve Roy (2004) yaptıkları üç çeşitli deneysel çalışmalarda nanoakışkanların dinamik viskozitesini hesaplamak için, Eş. 2.6 ve 2.7'de verilen eşitlikleri önermişlerdir;

$$\mu_r=\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}=1+2{,}5\cdot voc \tag{2.6}$$

$$\mu_r = 1+7{,}5\cdot voc+123\cdot voc^2 \tag{2.7}$$

Literatürde mevcut olan sayısal çalışmalarda nanoparçacıkların boyutları söz konusu olmadığından dolayı Eş. 2.6'nın kullanıldığı görülmüştür. Bu tez kapsamında yapılan sayısal çalışmada nanoakışkanın viskozitesi için Eş. 2.6 kullanılmıştır.

Nanoparçacıkların etkisi;

Genellikle nanoparçacıklar yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan metal veya metal oksit maddelerden yapılırlar. Ayrıca, nanoparçacıkların üretiminde gelişmiş laboratuvarlar ve bu konuda iyi bilgi birikimi gerekmektedir.

Çizelge 2.4'de nanoakışkan olarak kullanılan maddelerin ısıl özellikleri olan yoğunluğu, hacimsel ısı kapasiteleri ve ısıl iletkenlikleri verilmiştir (Incropera, DeWitt, Bergman, ve Lavine 2006). Çoğu araştırmacılar, nanoparçacıkların ve nanoakışkanların ısıl iletkenliği üzerine odaklanmışlardır.

Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi Al_2O_3, CuO ve Cu maddelerinin özellikleri ısı transferi için uygun olarak görülmektedir. Nanoakışkanlarda, nanoparçacıkların ısıl iletkenliği önemli parametredir. Nanoaparçacıkların ısıl iletkenlikleri yüksek olduğu zaman nanoakışkanlar daha iyi ısı transferi sağlamaktadır.

Çizelge 2.4. Nanoakışkan olarak kullanılan metal ve metal oksit parçacıkların ısıl özellikleri

Nanoparçacıklar	Yoğunluk ρ_p (kg/m^3)	Özgül ısı C_p (J/kg·K)	Hacimsel ısı kapasite $(\rho C)_p \times 10^5$ (J/m^3·K)	Isıl iletkenlik k_p (W/m·K)
Al	2702	903	24,4	237
Al_2O_3	3970	765	30,4	46
Cu	8933	385	34,4	401
CuO	6500	560	36,4	20
Ag	10500	325	24,7	429
SİC	3160	675	21,3	490
SiO_2	2400	691	16,6	16
TiO_2	9110	235	21,4	13
TiO_2, çok taneli	4157	710	29,5	8,4

Hacimsel ısı kapasitesi, ısı transferini etkileyen ve önemli diğer bir parametredir. Bu değerin yüksek olması ısı transferinin daha verimli olmasını sağlar. Maalesef hacimsel ısı kapasitesi oranı temel akışkanı su olan nanoakışkanlar için her zaman birden küçüktür ve Eş. 2.8'den hesaplanır;

$$(\rho C)_r = \frac{(\rho C)_{nf}}{(\rho C)_f} \tag{2.8}$$

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Giriş

Isı transferi uygulamalarında, ısınan elemanların sıcaklığını kontrol etmek için zorlanmış taşınım ile ısı transferi tercih edilir. Bundan dolayı, bu konu bilim adamlarının ilgisini çekmiştir ve çekmeye de devam edecektir.

Literatürde deneysel olarak yapılan çalışmalarda genellikle çeşitli akışlar ve akışkanlar için değişik geometrilerde çalışmaların yapıldığı ve deneysel sonuçların ampirik bağıntılar ile verildiği görülmüştür. Teorik çalışmalarda ise, çeşitli modellemeler aracılığı ile problem incelenmiştir.

Isı transferinde analizler ve yapılan araştırmalar ısı transferi uygulamalarının tasarımı için önemlidir. Teknolojinin gelişmesi ile ısı transferinde kullanılan parçaların boyutu küçülmüş ve ısı transferini artırmak için yeni tip akışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Böylece ısı transferi akışkanının akmakta olduğu kanallar mikro seviyeye inmiş ve ısı transferi akışkanı olarak ise nanoakışkanlar kullanılmaya başlanmıştır.

Mikrokanallar ısı transferinde yeni bir nesil soğutucular olarak ifade edilmektedir. Bu kanallar ısı değiştiricilerde kullanılarak elektronik cihazların soğutulması için kullanılmaktadır. Literatür incelemesinde mikrokanallar ile ilgili birçok araştırmanın yapıldığı görülmüştür. Kanal kesiti olarak ise dikdörtgen, üçgen, dairesel ve benzeri kesitlerde mikrokanallar kullanılmıştır. Mikrokanallar yüksek kompaktlığı sahip olup genel olarak küçük cihazlarda ve yüksek miktarda ısı transferi gerektiği koşullarda ve uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Boyutlarından dolayı mikrokanalların imalatları için gelişmiş teknolojiye gerek duyulmaktadır.

Mikrokanallar son zamanlarda özelliklerinden dolayı endüstride elektronik cihazların soğutulması için kullanılmaktadır. Mikroelektronik sistemlerde (microelectromechanical systems, MEMS) elektronik cihazların soğutulması oldukça önemli bir konudur. Bu sistemler güçlü olduklarından dolayı çalışırken ortaya büyük miktarda ısı aktarmaktadırlar. Mevcut kullanılan soğutucu sistemler yeterli soğutma sistemlere sahip olmadıkları için bu sistemlerin soğutulmasında kullanılmaktadırlar. Mikrokanallar, mikro boyutunda oldukları

için ve daha yüksek ısı transferi sağlamalarından dolayı tercih edilirler. Ancak, mikrokanalların MEMS teknolojisinde, küçük hidrolik çapları ve daha verimli oldukları için kullanımları uygun bulunulmuştur, fakat diğer soğutma sistemleri gibi bazı dezavantajları da söz konusudur.

Isı transferi uygulamalarında, elektronik cihazların yarı iletken bileşenlerinden yapılmış olduklarından dolayı ısınma problemleri tespit edilmiştir. Özellikle yüksek hızlı bilgisayarlarda bu problemler daha fazla ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bu tür problemler cihazın performansını yüksek derecede etkilemektedir. Elektronik cihazların performansları ile ilgili yapılan araştırmalarda en önemli parametrenin %55 oranında sıcaklık olduğu ifade edilmiştir (Manay, Şahin, Akyürek ve Çomaklı, 2012).

Mikrokanalların kullanımları sadece MEMS teknolojisinde sınırlı değildir. Mikrokanallar, medikal, gıda, eczacılık ve otomotiv alanlarında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Literatürde yapılan araştırmalar, geleneksel olarak kullanılan akışkanlara göre nanoakışkanların ısı transferi katsayılarının yüksek olduğunu göstermektedir. Bu bölümde nanoakışkanlar ve mikrokanallar ile ilgili literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Tuckerman ve Pease (1981) yaptıkları deneysel çalışmada mikrokanal ısı değiştiricilerinin yüksek ısı akışlı cihazların soğutulmasında uygun bir yöntem olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında ısı transferinde iki önemli sonuç vermişlerdir. Birincisi, kanal boyutlarını azaltarak ve ısı katsayısını duvarlarda düşürerek ısı akısının artırılabileceğini ve ikincisi ise nanoakışkanların soğutma sistemlerinde kullanışlı bir akışkan olduğunu belirtmişlerdir.

Lee, Garimella ve Liu (2005) yaptıkları çalışmada, dikdörtgen kesitli mikrokanallar için, deiyonize suyun ısıl özelliklerini sabit yüzey ısı akısı sınır şartında deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, mikrokanalların çeşitli boyutlarını kullanarak (hidrolik çap 318-903 μm aralığında) deiyonize suyu tek fazlı akışkan olarak ele almışlardır. Reynolds sayısının 300 ile 3500 aralığındaki değerler için deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışma tek fazlı akış kabulü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda mikrokanal boyutunda meydana gelen azalmanın ısı transfer katsayısını artırdığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ampirik bağıntılar ile verilmiştir.

Koo ve Kleinstreuer (2005) yapmış oldukları sayısal çalışmada dikdörtgen kesitli mikrokanallarda ısı transferini CuO-su ve CuO-etilen glikol nano akışkanlarının %1-%4 hacimsel oranları için kararlı rejim şartlarında laminar akışta sabit yüzey ısı akısı sınır şartında incelemişlerdir. Sonuçta, nanoakışkanların ısıl iletkenliklerinin ve mikrokanalların kenar boyutlarının oranının ısı transferinde önemli parametreler olduğu belirtilmiştir.

Lee ve Mudawar (2007) Al_2O_3-su nano akışkanların ısı transferini dikdörtgen kesitli mikrokanallarda deneysel olarak laminar akış şartında sabit yüzey sıcaklık sınır şartı için incelemişlerdir. Mikrokanalların giriş kısmında ısı transfer katsayısının fazla artış gösterdiği, ayrıca ısıl sınır tabakasının gelişimine nanoparçacıkların hissedilebilir etkisinin olduğu ifade edilmiştir.

Xu, Song, Zhang, Zhang ve Gan (2008) yapmış oldukları üç boyutlu bir sayısal çalışmada ısı transferini klasik ve dikişli yamuk kesitli ısı değiştiricilerde incelemişlerdir. Bu çalışmada, dikişli mikrokanalların normal mikrokanallar ile karşılaştırıldığında dikkat çekecek derecede ısı transferi artışı sağladığı görülmüştür.

Wu, Wu ve Cheng (2009) yaptıkları deneysel çalışmada tek fazlı Al_2O_3-saf su nanoakışkanının %0,15 ve %0,26 hacimsel oranlarında ısı transferi özelliklerini 194,50 μm hidrodinamik çapında olan yamuk kesitli silikon bazlı mikrokanalda incelemişlerdir. Nanoakışkanlarda Reynolds sayısı, Prandtl sayısı ve nanoparçacıkların hacimsel oranlarının artışı ile Nusselt sayısının arttığı ifade edilmiştir.

Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib (2010) dikdörtgen kesitli mikrokanallarda ısı transferini Al_2O_3-su nanoakışkanını kullanarak incelemişlerdir. Nanoparçacıkların hacimsel yüzdelerinin %1-%5 ve Reynolds sayısının 100-1000 aralığındaki değerlerinde sayısal çalışma kararlı rejim şartında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar yüksek ısı akılarında, nanoparçacıkların hacimsel yüzdelerinin artması ile duvar sıcaklığının azaldığını göstermiştir. Ayrıca, düşük ısı akılarında nanoakışkanların özelliklerini saf su ile karşılaştırmışlardır ve pek fark olmadığını açıklamışlardır. Artan Reynolds sayısı ile basınç düşümünün arttığı ifade edilmiştir. Nanoakışkanların ısıl direncinin saf suyun karşısında düşük olduğu ifade edilmiştir ve bu değerin, nanoparçacıkların hacimsel yüzdelerinde meydana gelen artış ile azaldığı ifade edilmiştir.

Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib (2011) yapmış oldukları diğer bir sayısal çalışmada ise yamuk kesitli mikrokanallarda laminar akış şartlarında nanoakışkanların ısı transferine etkisini araştırmışlardır. Su, etilen glikol, yağ ve gliserin akışkanları temel akışkan olarak ve elmas ise nanoparçacık olarak ele alınmıştır. Nanoparçacıkların %2 hacimsel oranında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikrokanalların alt tabanında bakır, alüminyum, çelik ve titanyum maddeleri kullanılmıştır. Kullanılan nanoakışkanlarda en yüksek ısı transfer katsayısının gliserine ait olduğu ifade edilmiştir. Yağ, etilen glikol ve suyun sıra ile verimli oldukları belirtilmiştir. Prandtl sayısının artması ile ısı transfer katsayısının arttığı ifade edilmiştir.

Mohammed, Gunnasegaran ve Shuaib (2011) yapmış oldukları diğer bir sayısal çalışmada üçgen kesitli mikrokanallardaki ısı transferini farklı nanoakışkanlar için laminar akış şartlarında ve sabit yüzey ısı akısı sınır şartında incelemişlerdir. Bu çalışmada Al_2O_3, Ag, CuO, elmas, SiO_2 ve TiO_2 nanoparçacıklarını saf suya karıştırarak nano akışkanları elde etmişlerdir. Mikrokanal malzemesi olarak alüminyum malzeme kullanmışlardır. Sonuçlarda elmas-saf su nanoakışkanın en düşük sıcaklık değeri ve en yüksek ısı transfer katsayısını verdiği, ayrıca en yüksek sıcaklık ve en düşük ısı transfer katsayısının alümina nanoakışkanına ait olduğu belirtilmiştir. Saf su ile karşılaştırıldığında nanoakışkanların basınç düşümlerinde hafif bir artış olduğu ifade edilmiştir. En yüksek ve en düşük basınç düşümünün sıra ile SiO_2 –saf su ve Ag-saf su nanoakışkanlarına ait oldukları belirtilmiştir. Elmas nanoparçacıkların su ile karışımının ısı transfer açısından verimli nanoakışkan olduğu ve Ag-saf su nanoakışkanının ise düşük basınç düşümüne sahip olan nanoakışkan olduğu ifade edilmiştir.

Hung, Yan, Wang ve Chang (2012) dikdörtgen kesitli mikrokanallarda ısı transferini geliştirmek için nanoakışkanları kullanarak sabit yüzey ısı akısı sınır şartında sayısal bir çalışma yapmışlardır. Temel akışkanın su olduğu akışkana Al_2O_3, CuO, TiO_2, Cu, Ag ve elmas nanoparçacıkları ilave etmişlerdir. Nanoakışkanların ısıl özelliklerini incelemişlerdir. Suya ilave edilen nanoparçacıklarının ısı transferi katsayısını artırdığı ifade edilmiştir. Nanoparçacıkları değişik hacimsel oranlarda su temel akışkanına katılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanların ısıl özellikleri ve ısı değiştiricilerdeki etkisi incelenmiştir. Nanoparçacık hacimsel oranının pompalama gücünü etkilediği ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek ısı transferinin Al_2O_3-su nanoakışkanı için elde edildiği belirtilmiştir ve akışkanın saf su olması durumu ile kıyaslandığında Al_2O_3-su

nanoakışkanının ısı transferini yaklaşık olarak %21,6 oranında artırdığı görülmüştür. Al_2O_3-su nanoakışkanının %2 hacimsel oranı için en yüksek ısı transferi elde edilmiştir. Ayrıca, nanoparçacıkların hacimsel oranlarında meydana gelen yükselmenin ısıl direnci ilk anda azalttığı ve sonra yükselttiği ifade edilmiştir.

Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah (2012) yaptıkları deneysel araştırmada çiplerin soğutulması için mikrokanalların etkisini laminar akış şartlarında incelemişlerdir. Araştırmalarda dikdörtgen kesitli mikrokanalların hidrolik çapları 35-80μm aralığında seçilmiştir. Deneyde imal edilmiş mikrokanalların çiplerde bulunan yüksek ısı transferini aktarmaya uygun oldukları ifade edilmiştir.

Sohel, Saidur, Sabri, Kamalisarvestani, Elias ve Ijam (2013) tarafından yapılan sayısal çalışmada dairesel kesitli mikrokanal içerisindeki ısı transferi üç farklı nanoakışkan (Al_2O_3-su, TiO_2-su ve CuO-su) için incelenmiştir. Mikrokanalın hidrolik çapı 400μm olarak alınmıştır. İçerisinde dairesel kesitli mikrokanalların bulunduğu ısı değiştiricisinin boyutu 10mm × 10mm × 4mm olarak kabul edilmiştir. İçerisinde nanoakışkanın bulunduğu mikrokanallar içerisindeki akış alanı ve mikrokanalların dışındaki katı kısımdaki ısı transferi incelenmiştir. Çalışma nanoparçacıkların hacimsel yüzdelerinin %0,5-%4 aralığında ve akışın giriş hızının 1,5 m/s değerinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma laminar akış şartlarında, sıkıştırılamaz akış için kararlı rejimde sabit yüzey ısı akısı sınır şartında gerçekleştirilmiştir. Saf su ile kıyaslandığında CuO-su nanoakışkanının ısı transferinde %13,15'lik bir artış meydana geldiği ifade edilmiştir. Al_2O_3-su ve TiO_2-su nanoakışkanları için ise ısı transferinde sıra ile %6,80 ve %6,20'lik artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, CuO-su nanoakışkanının dairesel mikrokanallarda en yüksek ısı transferini sağlayan akışkan olduğu ifade edilmiştir.

Rimbault, Nguyen ve Galanis (2014) yapmış oldukları deneysel çalışmada dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda, CuO-saf su nanoakışkanın çeşitli hacimsel yüzdelerinde laminar ve türbülans akış için akış ve ısıl özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında Reynolds sayısının 5000'den küçük olması durumu için gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanın basınç düşümü ve sürtünme faktörünün saf su ile karşılaştırıldığında artış gösterdiği ifade edilmiştir. Deneyler CuO-saf su nanoakışkanının %0,24, %1,03, %4,5 hacimsel oranlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda nanoakışkanı, saf su ile karşılaştırıldığında basınç düşümünde fark olduğu ayrıca, yüksek hacimsel

oranlarında bu farkın belirgin hale geldiği ifade edilmiştir. Nanoakışkanının %4,5 hacimsel oranında ısı transfer katsayısında artışın diğer oranlara göre en düşük performansını ve %1,03 oranında ise en yüksek ısı transfer katsayısını verdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak CuO-saf su nanoakışkanının saf su ile kıyaslandığında mikrokanalların ısı transferinde önemli etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir.

Lelea ve Laza (2014) nano akışkanların soğutmada uygun ve verimli kullanılmasına yönelik bir sayısal çalışma yapmışlardır. Nanoakışkanların ısı transferini dik mikro tüp ısı değiştiricide birden fazla teğetsel akış girişi için incelemişlerdir. Al_2O_3-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel yüzdelerinde, 50 W/cm^2 sabit ısı akısı ve Reynolds sayısının 15-100 aralığında laminar akış için incelenmiştir. Ayrıca, sonuçları saf suya göre karşılaştırmışlardır.

Vafaei ve Wen (2014) alüminyum oksit nanoakışkanın kritik ısı transferini tekli paslanmaz çelik dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda sabit yüzey ısı akısı sınır şartında deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada nanoparçacıkların hacimsel oranı (%0,001-%0,1) aralığında kabul edilmiştir. Sonuç olarak nanoparçacıkların düşük hacimsel oranlarında tekli mikrokanalların kritik ısı transferinin artışına neden olduğu ifade edilmiştir.

Malavandi ve Ganji (2014) alümina saf su nanoakışkanın karışık taşınım ısı transferini, dikdörtgen kesitli dikey mikrokanallarda tam gelişmiş akışkan için sabit yüzey ısı akısı sınır şartı uygulayarak teorik çalışma yapmışlardır. Mikrokanallarda nanoakışkanın dolaşımını Buongior'un gelişmiş modelini kullanarak incelemişlerdir. Hidrodinamik sınır şartını uygun bir şekilde sağlamak için, mikroboyutlu kanalların pürüzlü olmasından dolayı duvarda kayma şartı uygulanmıştır. Sonuçlarda nanoakışkanın ısınmış duvardan kanalın merkezine doğru hareketi gösterilmiştir, ayrıca nanoparçacıkların düzensiz dağılımı ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Nanoparçacıkların hacimsel oranlarında meydana gelen artışın ısı transferi ve basınç düşümünde artışa neden olmuştur. Ayrıca nanoparçacıkların boyutlarının ısı transferi ve basınç düşümünü önemli derecede etkilediği belirtilmiştir. Yüzeyde meydana gelen kaymanın mikrokanallarda ısı transferini artırdığı ifade edilmiştir.

Yang, Tsai, Wang ve Lin (2014) yapmış oldukları sayısal çalışmada CuO saf su nanoakışkanın soğutucu akışkan olarak performansını üç boyutlu, sabit ısı akısı, sıkıştırılamaz, kararlı rejim, laminar ve türbülanslı akış şartlarında yamuk kesitli

mikrokanalda incelemişlerdir. Çalışmada akışkanı hem iki fazlı ve hem tek fazlı modellerde incelemişlerdir. Ayrıca iki fazlı incelemelerde karışım model kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonuçları aynı şartlarda yapılan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Laminar akışta sayısal çalışmada akışın giriş ve çıkış sıcaklıklarının arasındaki farkın, deneysel çalışmaya göre fazla olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ısıl direncin de iki fazlı metotta bir fazlı metoda göre deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Esmaeilnejad, Aminfar ve Neistanak (2014) yaptıkları sayısal çalışmada Newton tipi olmayan nanoakışkanları laminar akış şartlarında zorlanmış konveksiyon ısı transferini dikdörtgen mikrokanallarda incelemişlerdir. Çalışmada nanoakışkan iki fazlı akışkan olarak kabul edilmiştir ve iki fazlı karışık yöntemi kullanılmıştır. Çalışmalarda akışkanın boyutsuz hız grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğin Peclet sayısına, giriş hızına ve nanoparçacıkların hacimsel oranına bağlı olmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca, düşük Reynolds sayılarında basınç düşümünün artışı Newton tipi olmayan nanoakışkanlarda pek fazla olmadığı belirtilmiştir. Newton tipi olmayan temel akışkanlarda ısı transferini artırmak için Al_2O_3 nanoparçacıkların daha uyumlu karışım olduğu ifade edilmiştir.

Azizi, Alamdari ve Malayeri (2015) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada 86 adet dikdörtgen kesitli mikrokanalları silindirik şeklindeki ısı değiştiricisi içine yerleştirmişlerdir. Mikrokanalların hidrolik çapı 560µm olarak alınmıştır. Çalışmada CuO-su nanoakışkanının üç farklı %0,05, %0,1 ve %0,3 hacimsel oranlarında ve Reynolds sayısının 900'den küçük değerlerinde ısı transferi incelenmiştir. Çalışma laminar akışta, kararlı rejimde 35 kW/m^2 ve 50 kW/m^2 değerlerinde sabit yüzey ısı akısı sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda %0,05, %0,1 ve %0,3 hacimsel oranlarındaki CuO-su nanoakışkanının Nusselt sayısında saf suya göre sırası ile %17, %19 ve %23 artış görüldüğü ifade edilmiştir.

Ghale, Haghshenasfard ve Esfahany (2015) yapmış oldukları sayısal çalışmada Al_2O_3-saf su nanoakışkanını kullanarak dikdörtgen kesitli mikrokanalda sabit yüzey ısı akısı sınır şartında laminar zorlanmış konveksiyonu incelemişlerdir. Çalışma nanoakışkanın %1 ve %2 hacimsel oranlarında gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkan tek fazlı ve iki fazlı akışkan olarak modellenmiştir. Sayısal çalışmadan çıkan sonuçlar, literatürde mevcut olan deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır. İki fazlı model sonuçlarının daha doğru olduğu ifade

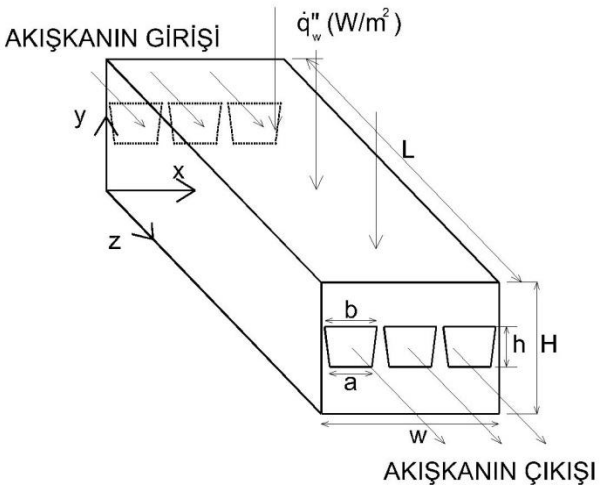
edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında aynı şartlarda Al_2O_3-saf su nanoakışkanının ısıl özellikleri içerisinde engeller bulunan dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda incelenmiştir. Sonuç olarak, içerisinde engel bulunan mikrokanalların normal mikrokanallar ile kıyaslandığında içerisinde engel bulunan mikrokanaldaki Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.

Nimmagadda ve Venkatasubbaiah (2015) yaptıkları sayısal çalışmada nanoakışkanların laminar zorlanmış konveksiyon şartlarında dikdörtgen kesitli mikrokanallardaki ısı transferini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, Al_2O_3, Ag ve Al_2O_3+Ag nanoparçacıkları su ile karıştırılarak nanoakışkanlar elde edilmiştir. Çalışmada, iki nanoakışkanın karışımı olan Al_2O_3+Ag yeni nesil hibrid soğutucu akışkan olarak tanıtılmıştır. %3 hacimsel oranındaki Al_2O_3 nanoakışkanı için %17-%18 ısı transfer katsayısında saf suya göre artış olduğu belirtilmiştir. Ag-su nanoakışkanı için ise %111-%144 ısı transfer katsayısında artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, hibrid (%0,6 Al_2O_3, %2,4 Ag) hacimsel yüzde oranları için ısı taransfer katsayısının %126-%148 aralığında saf suya göre artış elde edildiği ifade edilmiştir.

Yapılan literatür araştırması sonunda mikrokanallarda yapılan çalışmaların genellikle dikdörtgen ve kare kesitli oldukları görülmüştür. Ancak, dikdörtgen ve kare kesitli mikrokanalların imalatları zorluk içermektedir. Her ne kadar dikdörtgen ve kare kesitli mikrokanallar yapılmak istense de yapılan mikrokanallar tam olarak dikdörtgen ve kare kesitten sapma gösterirler. Bu nedenle yamuk kesitli mikrokanal geometrisine kayma olduğu görülür.

Yapılan bu çalışmada ise içerisinde nanoakışkanın geçtiği yamuk kesitli mikrokanal içerisindeki akış alanı ve mikrokanalın dış kısmındaki katı kısım, akış ve ısı transferi için sayısal olarak incelenmiştir. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere ısı değiştiricisinin üst kısmına sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır ve yamuk kesitli mikrokanal sayısı üçtür. Isı transferi ve akış Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için laminar akış şartlarında sabit yüzey ısı akısı sınır şartında incelenmiştir. Gerçekleştirilen sayısal çalışmada, Reynolds sayısının $200 \leq Re \leq 1500$, nanoakışkanın tipinin, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının $\%0 \leq voc \leq \%4$ ve mikro ısı değiştiricideki kanal sayısının n=3-5 olduğu şartlarda akış ve ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.1'de a ve b yamuk kesitli mikrokanalın kesitteki alt ve üst kenar

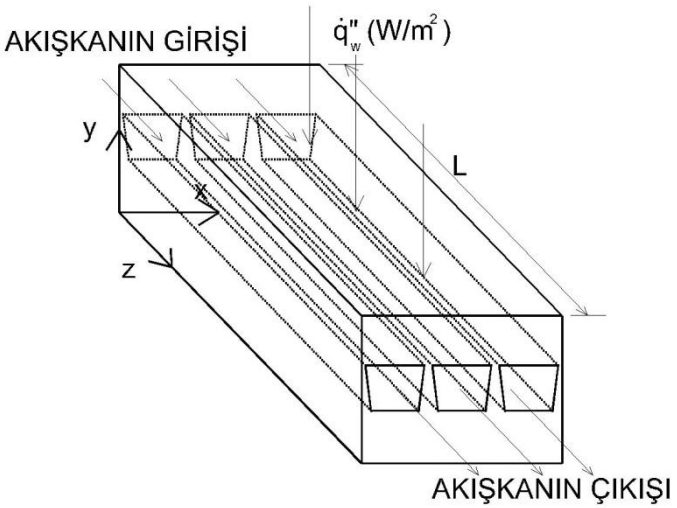
uzunluğu, h ise mikrokanalın yüksekliğidir. W, H ve L yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinin genişliği, yüksekliği ve akış yönündeki uzunluğudur. $\dot{q}_w^{"}$ ise yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinin üst yüzeyine uygulanan ısı akısıdır (W/m^2). Yapılan çalışmada ısı değiştiricisindeki mikrokanalların giriş kesit alanlarının toplamı A_c ve h sabit tutularak mikrokanal sayısı değiştirilmiştir.



Şekil 3.1. Mevcut sayısal çalışmada kullanılan yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi

4. PROBLEMİN TANITIMI ve MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Sayısal çalışmada kullanılan yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinin görünümü Şekil 4.1'de görüldüğü gibidir. Akışkan kanala z=0'da 293,15 K sıcaklığında girmekte ve kanaldan z=L'de çıkmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi ısı değiştiricisinin üst kısmına sabit yüzey ısı akısı $\dot{q}_w^{"}$ (W/m^2) uygulanmıştır ve bu değer 10 000 olarak (W/m^2) alınmıştır.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan ısı değiştiricisi ve kordinat ekseninin görünümü

Bu çalışmada içerisinde nanoakışkanın aktığı yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi kararlı rejim, üç boyutlu, Newton tipi, sıkıştırılamaz, laminar akış ve sabit yüzey ısı akısı sınır şartında sayısal olarak incelenmiştir.

Kullanılan nanoakışkanlar Al_2O_3-su ve CuO-su'dur. Isı değiştirici malzemesi bakırdır. Çalışma nannoakışkanların farklı hacimsel yüzde oranları (voc=%0-%4) için gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkan tek fazlı akışkan olarak kabul edilmiştir ve denklemler tek fazlı akışkan için çözülmüştür.

Sayısal çalışmada kullanılan temel korunum denklemleri disipasyon ve yer çekimi ihmal edildiğinde süreklilik, momentum ve enerji denklemleri boyutlu olarak aşağıdaki gibidir;

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (4.1)$$

Momentum denklemi;

x-yönü: $$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu_{nf}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (4.2a)$$

y-yönü: $$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu_{nf}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (4.2b)$$

z-yönü: $$u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu_{nf}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (4.2c)$$

Enerji denklemi;

Akışkan için: $$\rho_{nf}c_{p_{nf}}\left(u\frac{\partial T_{nf}}{\partial x}+v\frac{\partial T_{nf}}{\partial y}+w\frac{\partial T_{nf}}{\partial z}\right)=k_{nf}\left(\frac{\partial^2 T_{nf}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{nf}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{nf}}{\partial z^2}\right) \quad (4.3)$$

Katı için: $$0=k_s\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}\right) \quad (4.4)$$

Eş. 4.1-4.4 ile verilen temel korunum denklemleri için sınır şartları şu şekildedir. Kanal girişinde akışkan kanala üniform hız ve üniform sıcaklıkta girmektedir. Yani z=0'da;

$$u=U_1;\ v=0;\ w=0;\ T_{nf}=T_1 \quad (4.5)$$

Kanal çıkışında akışın atmosfere çıktığı kabul edilmiştir. Basınç hariç kanal çıkışında diğer değişkenlerin akış yönündeki değişimi ihmal edilmiştir z=L'de;

$$\frac{\partial u}{\partial z}=0;\ \frac{\partial v}{\partial z}=0;\ \frac{\partial w}{\partial z}=0;\ p=p_{atm};\ \frac{\partial T_{nf}}{\partial z}=0 \quad (4.6)$$

Sıvı-katı ara yüzeyinde kaymama sınır şartı kabul edilmiştir;

$$u=0;\ v=0;\ w=0;\ T_{nf}=T_s;\ -k_{nf}\frac{\partial T_{nf}}{\partial n}=-k_s\frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (4.7)$$

Isı değiştiricisinin üst duvarında 10 000 W/m^2 ısı akısı uygulanmıştır;

$$\frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\dot{q}_w}{k_s} \tag{4.8}$$

Isı değiştiricisinin diğer duvarları yalıtılmıştır;

$$\frac{\partial T_s}{\partial n} = 0 \tag{4.9}$$

Eşitlik 4.1-4.4'deki u, v ve w sırası ile akışkanın x, y ve z yönlerindeki hız (m/s) bileşenlerini ifade etmektedir. p basıncı (Pa), T sıcaklığı (K), ν kinematik viskoziteyi (m^2/s), ρ yoğunluğu (kg/m^3), C_p özgül ısıyı (J/kg·K) ve k ısıl iletkenliği (W/m·K) ifade etmektedir.

Yapılan çalışmada yukarıda bahsi geçtiği sınır şartları ve denklemler ANSYS FLUENT 15.1 programında çözülmüştür.

Yapılan çalışmada Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları, 0, 0,001, 0,005, 0,01, 0,02 ve 0,04 yüzde oranlarında kullanılmıştır. Çizelge 5'de çalışmada kullanılan temel akışkanın, nanoparçacıkların ve nanoakışkanların ısıl özellikleri (yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve ısıl iletkenliği) 293,15K sıcaklığında verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan temel akışkan (su) ve nanoparçacıkların 293,15K sıcaklıkta fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	Su (temel akışkan)	Al_2O_3 (nanoparçacık)	CuO (nanoparçacık)
Yoğunluk (kg/m^3)	998	3880	6500
Viskozite (Pa·s)	0,001006	-	-
Özgül ısı (J/kg·K)	4182,1	773	535,6
Isıl iletkenlik (W/m·K)	0,598	36	20

Çizelge 4.2'de nanoakışkanın farklı hacimsel yüzdelerindeki fiziksel özellikleri (yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve ısıl iletkenlik) verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların farklı hacimsel oranlarındaki fiziksel özellikleri

Akışkan cinsi	voc (%)	ρ (kg/m^3)	μ ×10^4 (kg/m·s)	Cp (J/kg·K)	k (W/m·K)
Al_2O_3	0	998,00	10,06	4182,10	0,5980
	0,1	1000,88	10,09	4168,88	0,6003
	0,5	1012,41	10,19	4116,77	0,6095
	1	1026,82	10,31	4053,28	0,6212
	2	1055,64	10,56	3931,50	0,6453
	4	1113,28	11,07	3706,84	0,6966
CuO	0	998,00	10,06	4182,10	0,5980
	0,1	1003,50	10,09	4158,48	0,6002
	0,5	1025,51	10,19	4066,54	0,6090
	1	1053,02	10,31	3957,01	0,6203
	2	1108,04	10,56	3754,28	0,6435
	4	1218,08	11,07	3403,75	0,6925

Sayısal çalışmada elde edilen veriler ile yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Nusselt sayısı (Nu) şu şekilde hesaplanmıştır;

$$Nu = \frac{hD_h}{k_{nf}} \tag{4.10}$$

Eşitlik 4.10'da D_h hidrolik çapı (m), h yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transfer katsayısını (W/m^2·K), k_{nf} nanoakışkanın ısıl iletim katsayısını (W/m·K) ifade etmektedir. Eş. 4.10'daki h ve D_h sırasıyla şu şekilde hesaplanır;

$$h = \dot{q}_w^{"}/(T_w - \frac{T_1+T_2}{2}) \tag{4.11}$$

$$D_h = 4A_c/P \tag{4.12}$$

Burada $\dot{q}_w^{"}$ ısı değiştiricisi yüzeyine uygulanan ısı akısı (W/m^2), T_w yamuk kesitli mikrokanalın ortalama yüzey sıcaklığı (K), T_1 ve T_2 ise sırasıyla nanoakışkanın mikrokanallı ısı değiştiricisine giriş ve çıkış sıcaklıkları (K), D_h mikrokanal hidrolik çapı (m), A_c yamuk kesitli mikrokanalın kesit alanı (m^2) ve P ise akışkanın kanala girişteki ıslak çeper uzunluğu (m)'dir. Enerji dengesinden mikrokanalın yüzeyinden akışkana aktarılan enerji miktarı nanoakışkanın iç enerjisindeki değişime eşittir. Kanal yüzeyinde nanoakışkana aktarılan enerji miktarı şu şekilde hesaplanır;

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (4.13)$$

Burada, $\dot{Q}$ kanal yüzeyinden akışkana aktarılan enerji (W), $\dot{m}$ akışkanın kütlesel debisi (kg/s), T_1 ve T_2 ise sırasıyla nanoakışkanın yamuk kesitli mikrokanala giriş ve çikiş sıcaklıklarıdır (K). Nanoakışkanın kütlesel debisi, yoğunluğu, hız ve kesit alanı kullanılarak şu şekilde hesaplanır;

$$\dot{m} = \rho_{nf} U_1 A_c \quad (4.14)$$

Burada ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğü (kg/m^3), U_1 nanoakışkanın kanala giriş hızı (m/s) ve A_c nanoakışkanın kanala girişteki kanal kesit alanıdır (m^2).

Reynolds sayısı (Re) şu şekilde hesaplanır;

$$Re = \frac{\rho_{nf} U_1 D_h}{\mu_{nf}} \quad (4.15)$$

Burada Re Reynolds sayısı (-), ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğu (kg/m^3), U_1 nanoakışkanın kanala giriş hızı (m/s), D_h yamuk kesitli mikrokanalın hidrolik çapı (m) ve μ_{nf} nanoakışkanın dinamik viskozitesi (kg/m·s)'dir. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Fanning sürtünme faktörü şu şekilde hesaplanır;

$$f = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{D_h}{2 \rho_{nf} U_1^2} \quad (4.16)$$

Eşitlik 4.16'da f yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Fanning sürtünme faktörü (-), D_h yamuk kesitli mikrokanalın hidrolik çapı (m), L kanalın akış yönündeki uzunluğu (m), ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğu (kg/m^3), ΔP mikrokanaldaki basınç düşümü (Pa) ve U_1 nanoakışkanın kanala giriş hızı (m/s)'dır.

4.1. Sayısal Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ve Kullanılan Paket Programın Özellikleri

Genel olarak teknik problemlerin çözümünde analitik, deneysel ve sayısal yöntemlerden biri uygulanır. Deneysel metot güvenilir sonuç vermesine karşın pahalı ve zaman alıcıdır. Analitik yöntem ile sadece lineer problemler çözülebilir. Analitik olarak çözümü yapılamayan problemler iteratif olarak bilgisayar yardımı ile sayısal olarak çözülebilir. Bu

çalışmada akış ve sıcaklık alanlarının sayısal olarak hesaplanmasında, sonlu hacimler yöntemini kullanarak akış ve ısı transferi problemlerini çözebilen, ANSYS 15.1 paket programı içerisinde yer alan FLUENT analiz sistemi kullanılmıştır. Bu analiz sisteminde, yapılan sayısal çalışmanın geometrisi ve ağ yapısı oluşturulmuş olup, çözümü ise yine aynı sistem içerisinde yer alan FLUENT alt programı ile yapılmıştır.

Sayısal çözüm yöntemleriyle problem çözülürken çözüm o alan içinde sonlu sayıda nokta için elde edilir. Sonucun güvenilirliğini artırmak için çözüm alanı içerisinde elde edilen nokta sayısı artırılır. Bu da bilgisayar kapasitesine bağlıdır. Çözümün ağ sayısından bağımsız olduğunu göstermek için çözüm farklı ağ sayıları için yapılır ve optimum ağ sayısı belirlenir.

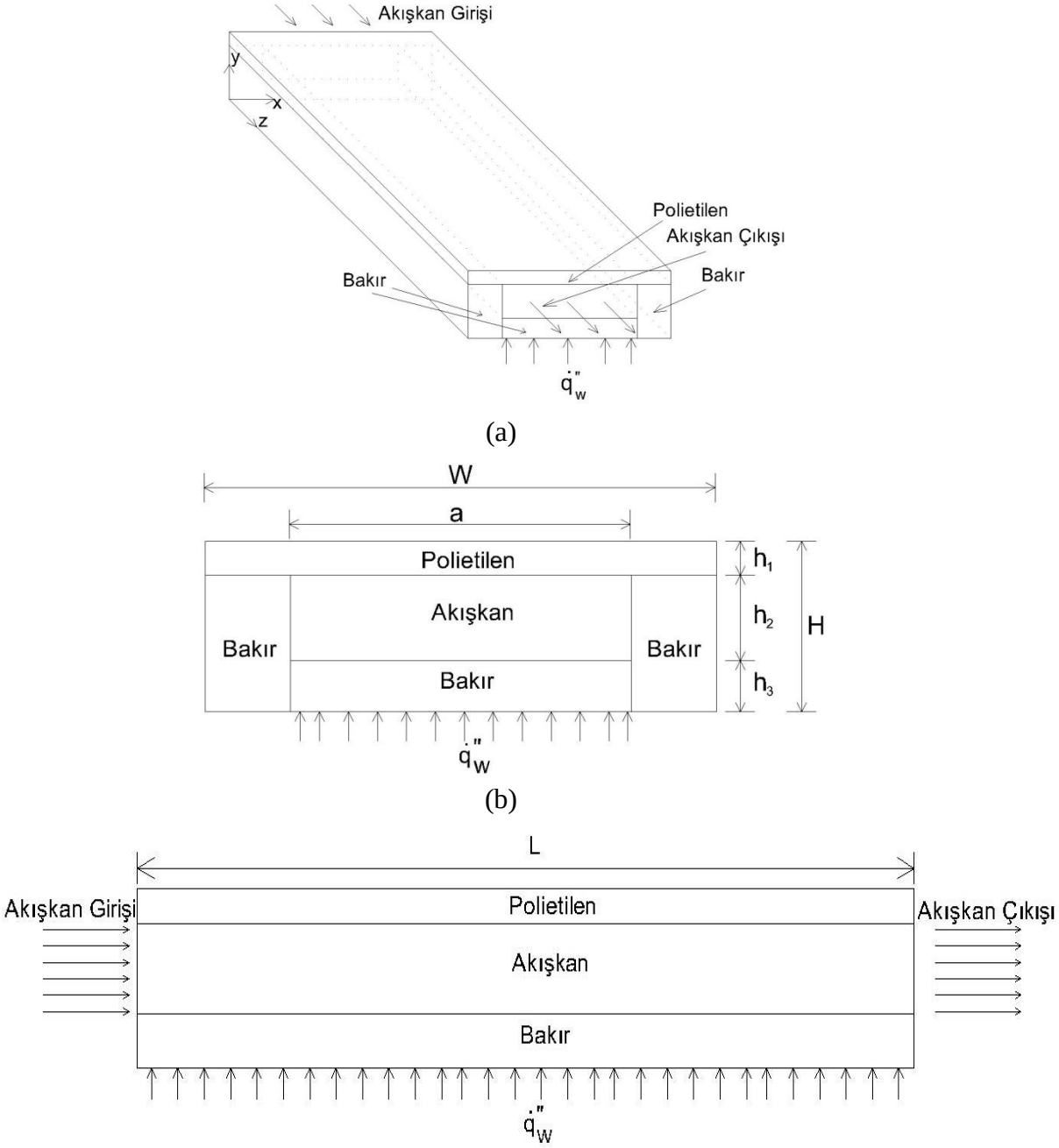
FLUENT teknik özellikleri;

FLUENT, sıkıştırılamaz (düşük sabsonik), orta sıkıştırılabilir (transonik) ve yüksek sıkıştırılabilir (süpersonik ve hipersonik) akışlar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsüdür. Yakınsamayı hızlandıran çoklu ağ metoduyla beraber çoklu çözücü seçenekleri ile FLUENT 15.1 geniş hız rejimleri aralıklarında optimum çözüm etkinliği ve hassasiyeti getirir. FLUENT 15.1'deki fiziksel modellerin zenginliği, laminer, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar.

5. SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARI

5.1. Kullanılan Çözüm Tekniğinin Doğrulanması

Asıl yapılmak istenilen çalışmalara geçmeden önce mevcut sayısal çalışmada kullanılan metodun doğruluğunu görebilmek için öncelikle literatürde mevcut olan çalışma sayısal olarak yapılmıştır. Literatürde deneysel (Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah, 2012) olarak incelenmiş olan dikdörtgen kesitli mikrokanal Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.1a'da dikdörtgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinin üç boyutlu görünümü verilmiştir. Ayrıca şekil üzerinde koordinat ekseni, akışkanın kanala giriş ve çıkış yönleri gösterilmiştir. Akışkanın geçtiği kısmın alt yüzeyinden sabit yüzey ısı akısı $\dot{q}_w^{"}$ (W/m^2) sınır şartı uygulanmıştır. Akışkan z-ekseni yönünde akmaktadır. Dikdörtgen kesitli mikrokanalın üst yüzeyini polietilenden (yalıtım maddesi) ve diğer üç tarafı ise bakırdan imal edilmiştir. Şekil 5.1b'de ise dikdörtgen kesitli mikrokanalın önden görünüşü verilmiştir. Şekil üzerindeki a ve h_2 sırasıyla dikdörtgen kesitli mikrokanalın genişliği ve yüksekliğidir. h_1 ve h_3 ise dikdörtgen kesitli mikrokanalın üst ve alt kısmındaki polietilen ve bakır malzeme kalınlıklarıdır. W ve H sırasıyla dikdörtgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinin genişliği ve yüksekliğidir. Şekil 5.1c'de ise dikdörtgen kesitli mikrokanalın yandan görünümü verilmiştir. Şekil üzerinde gösterilen L mikrokanalın akış yönündeki uzunluğudur.



Şekil 5.1. Dikdörtgen kesitli mikrokanalın (a) üç boyutlu görünümü, (b) önden görünümü ve (c) yandan görünümü

Şekil 5.1'de görülen dikdörtgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki a, h_1, h_2, h_3, H, W ve L parametrelerinin değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Dikdörtgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki parametrelerin değerleri

a (μm)	h_1 (μm)	h_2 (μm)	h_3 (μm)	H (μm)	W (μm)	L (μm)
200	20	50	30	100	300	10 000

Bu problem için çözülen temel korunum denklemleri süreklilik, momentum ve enerji denklemleri olup Eş. 4.1-4.4'deki gibidir. Problemin çözüm bölgesi Şekil 5.1a'daki gibidir. Temel korunum denklemleri akışkanın geçtiği akış bölgesinde ve akışkanın geçmediği katı kısımda çözülmüştür. Temel korunum denklemleri problemin çözüm bölgesindeki sınır şartları ile çözülür. Kullanılan sınır şartları şu şekildedir;

Kanal girişinde akışkan kanala üniform hız ve üniform sıcaklıkta girmektedir. Yani z=0'da;

$$u = U_1;\ v = 0;\ w = 0;\ T_{nf} = T_1 \tag{5.1}$$

Kanal çıkışında akışın atmosfere çıktığı kabul edilmiştir basınç hariç kanal çıkışında diğer değişkenlerin akış yönündeki değişimi ihmal edilmiştir z=L'de;

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0;\ \frac{\partial v}{\partial z} = 0;\ \frac{\partial w}{\partial z} = 0;\ p = p_{atm};\ \frac{\partial T_{nf}}{\partial z} = 0 \tag{5.2}$$

Sıvı-katı ara yüzeyinde kaymama sınır şartı kabul edilmiştir;

$$u = 0;\ v = 0;\ w = 0;\ T_{nf} = T_s;\ -k_{nf}\frac{\partial T_{nf}}{\partial n} = -k_s\frac{\partial T_s}{\partial n} \tag{5.3}$$

Isı değiştiricinin alt duvarında;

$$\frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\dot{q}_w}{k_s} \tag{5.4}$$

Isı değiştiricinin diğer duvarları yalıtılmıştır;

$$\frac{\partial T_s}{\partial n} = 0 \tag{5.5}$$

Doğrulama analizi için optimum çözüm ağının belirlenmesi gerekir. Yapılan çalışmada tekli dikdörtgen kesitli mikrokanalın ısı transferi incelenmiştir. Çalışmada akışkan olarak su kullanılmıştır. Çalışma Reynolds sayısının 49,61 ile 92,38 aralığındaki değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Optimum çözüm ağının belirlenmesi çözüm ağının 67750, 330176 ve 872425 değerlerinde Re=92,38 için gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.2'de üç farklı çözüm ağı için akışkanın dikdörtgen kesitli mikrokanaldan çıkış sıcaklığı ve mikrokanaldaki ortalama Nusselt sayısı verilmiştir. Görüldüğü üzere çözüm ağının 330176 değerinden 872425 değerine çıkması durumunda mikrokanalın çıkışındaki akışkan çıkış sıcaklığı ve kanaldaki ortalama Nusselt sayısındaki değişim miktarı %0,01 ve %4,70'dir. Çözüm ağında meydana gelen artışa rağmen akışkan çıkış sıcaklığı ve ortalama Nusselt sayısındaki değişim az olarak kalmıştır. Bu nedenle bu problem için optimum çözüm ağı olarak 330176 kabul edilmiştir. Çalışma bu optimum çözüm ağında farklı Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2. Hücre sayıları ve sonuçlar

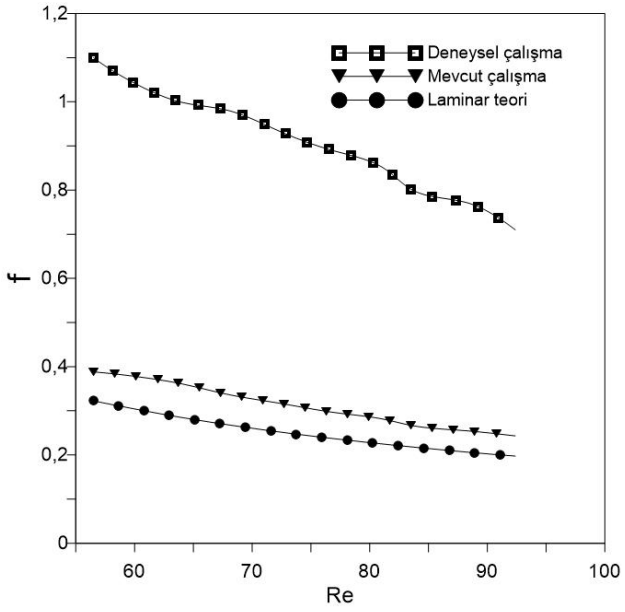
Sıra	Çözüm ağı	Akışkanın çıkış sıcaklığı T_2 (℃)	Nusselt sayısı Nu
1	67750	337,62	9,50
2	330176	330,56	10,44
3	872425	330,59	10,94

Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmadaki akışkanın kütlesel debisi, mikrokanalın yüzeyine uygulanan ısı akısı ve akışkanın kanala girişteki sıcaklık değerleri Çizelge 5.3'de verilmiştir. Bu değerler için elde edilen akışkanın mikrokanal çıkışındaki sıcaklık değerleri Çizelge 5.3'un son sütununda verilmiştir.

Çizelge 5.3. Literatürdeki deneysel çalışmada (Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah, 2012) kullanılan parametre değerleri ve elde edilen çıkış sıcaklık değerleri

Akışkanın Debisi (μl/min)	Ortalama Isı akısı (W/cm^2)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış sıcaklığı (°C)
175	43,5	24,9	96,50
200	44,2	25,1	95,80
225	44,8	24,7	96,80
250	45,4	24,8	91,10
275	45,8	24,8	87,00
300	46,6	24,7	82,80
325	47	24,6	79,30
350	47,3	24,6	74,50
375	47,6	24,5	73,10
400	47,7	24,4	70,70

Yukarıda belirlenen optimum çözüm ağı ele alınarak Çizelge 5.3'de verilen sınır şartları için problem sayısal olarak çözülmüştür. Yapılan çalışmada akışkanın dikdörtgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı ve kanaldaki basınç düşümü elde edilmiştir. Basınç düşümü kullanılarak mikrokanaldaki ortalama Fanning sürtünme fakrörü değeri hesaplanmıştır. Sayısal çalışmadan elde edilen ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısıyla değişimi Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere artan Reynolds sayısı ile mikrokanaldaki ortalama Fanning sürtünme faktörü azalma göstermiştir.



Şekil 5.2. Ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

$200\ \mu m$ genişliğinde ve 50 μm yüksekliğinde olan dikdörtgen kesitli mikrokanal için (en-boy oranı 4) laminar akış şartlarında sürtünme faktörü Kandlikar, Garimella, Li ve King (2006) tarafından şu şekilde verilmiştir;

$$f\ Re = 18{,}23 \tag{5.6}$$

Burada, f-ortalama Fanning sürtünme faktörü değeridir. Şekil 5.2'de kıyaslama amacı ile Eş. 5.6'dan elde edilen sonuçlar da gösterilmiştir.

Şekil 5.2'de ayrıca Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah (2012) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları da kıyaslama amacı ile gösterilmiştir. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere mevcut sayısal çalışma sonuçlarının sınır tabaka teoriden (Kandlikar, Garimella, Li ve King, 2006) elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Fakat, Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah (2012)'ın deneysel sonuçlarının mevcut sayısal çalışma ve sınır tabaka teorisinden elden edilen sonuçlardan daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

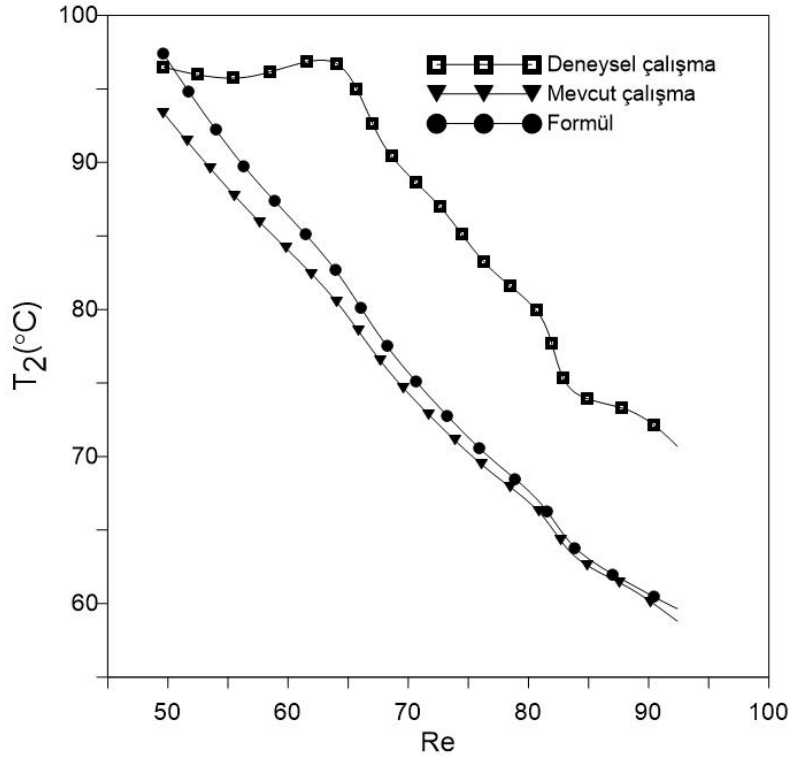
Sabit yüzey ısı akısı sınır şartındaki bir kanal içerisindeki akış için enerji dengesinden akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı şu şekilde verilir (Incropera, DeWitt, Bergman, ve Lavine 2006);

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{q}_w^{"} A_s}{\dot{m} c_p} \tag{5.7}$$

Eş. 5.7'de T_2 akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı (K), T_1 akışkanın kanala giriş sıcaklığı (K), $\dot{q}_w^{"}$ yüzey ısı akısı (W/m^2), A_s ısının aktarıldığı yüzey alanı (m^2), $\dot{m}$ akışkanın kütlesel debisi (kg/s) ve c_p sabit basınçta nanoakışkanın özgül ısısı (kJ/kg·K)'dır.

Mevcut sayısal çalışmadan elde edilen akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı Reynolds sayısına göre Şekil 5.3'de verilmiştir. Ayrıca kıyaslama amacı ile Eş. 5.7'den elde edilen sonuçlar ve Çizelge 5.3'de verilen Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah (2012)'ın sonuçları da Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Şekil 5.3'de görüldüğü üzere mevcut sayısal çalışma sonuçları ve Eş. 5.7'den elde edilen sonuçlar birbirine yakındır. Koyuncuoğlu, Jafari, Okutucu-Özyurt ve Külah (2012)'ın deneysel sonuçlarının ise

mevcut sayısal çalışma sonuçları ve Eş. 5.7'den elde edilen sonuçlardan oldukça uzak olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3. Akışkanın kanaldan çıkış sıcaklıklarının Reynolds sayısı ile değişimi

5.2. Mevcut Sayısal Çalışma Sonuçları

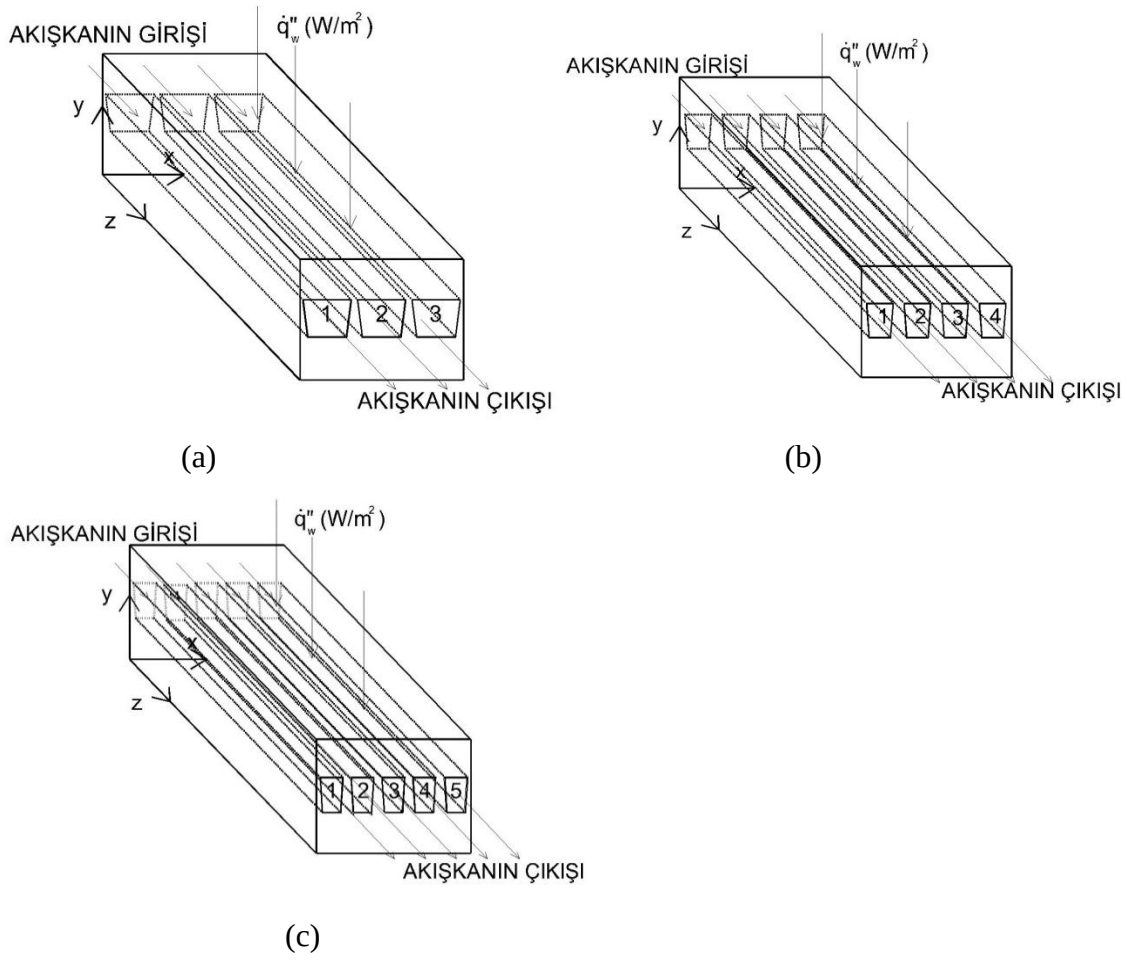
Bu çalışmada kullanılan yöntemin doğruluğunun literatür sonuçları ile kıyaslanıp kullanılan yöntemin doğru olduğu görüldükten sonra asıl yapılmak istenilen, içerisinde nanoakışkanın akmakta olduğu yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi çalışmasına geçilmiştir. Yapılan çalışmada, yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının, nanoakışkanın cinsinin, nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin ve Reynolds sayısının akış ve ısı transferi karakteristikleri laminar akış ve kararlı rejim şartlarında sabit yüzey ısı akısı sınır şartında sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma, ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının n=3-5 (bakınız Şekil 2.1), Reynolds sayısının Re=200-1500 ve nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin voc=%0-%4 aralığındaki değerlerinde Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için gerçekleştirilmiştir. Burada temel akışkan su olup nanoparçacıklar sırasıyla Al_2O_3 ve CuO'dur.

Bu bölümde iki farklı nanoakışkan için elde edilen sayısal çalışma sonuçları, geometrisi Şekil 2.1'de ve boyutları Çizelge 2.3'de verilen mikrokanallar için ayrı bölümler halinde verilmiştir.

5.2.1. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al_2O_3-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçları

Bu kısımda yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al_2O_3-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçları verilmiştir. Sayısal çalışma, ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının n=3-5 (bakınız Şekil 2.1), Reynolds sayısının Re=200-1500 ve nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin voc=%0-%4 aralığındaki değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Üç, dört ve beş adet yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki mikrokanallar Şekil 5.4'de sıra ile numaralandırıldığı gibidir. Şekil 5.4'de görüldüğü gibi üç, dört ve beş adet mikrokanal soldan sağa doğru artan numara ile numaralandırılmıştır.



Şekil 5.4. (a) üç, (b) dört ve (c) beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki mikrokanalların görünümü

Yamuk kesitli mikrokanalın boyutsal parametreleri Şekil 2.1'de verildiği gibidir ve boyutları Çizelge 2.3'de verilmiştir. Üç, dört ve beş adet yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi Al_2O_3-su nanoakışkanı için sayısal olarak incelenmiştir.

İlk önce sonuçların çözüm ağından bağımsız olması sağlanmıştır. Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının n=5, Reynolds sayısının Re=1500 ve hacimsel yüzde oranının voc=%4 olması durumunda üç farklı çözüm ağı (137204, 240546 ve 640971) için sayısal çalışma yapılmış ve nanoakışkanın yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinden çıkış T_2 ve duvar sıcaklığı T_w, yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transfer katsayısı h, ortalama Nusselt sayısı Nu ve ortalama Fanning sürtünme faktörü f değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir. Çözüm ağının 240546'dan 640971'e çıkması durumunda sonuçlardaki değişimin önemsiz olduğu görülmüştür. Bu nedenle nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin %4 olması durumunda optimum çözüm ağı olarak

240546 alınmıştır. Bu optimum çözüm ağı ısı değiştiricisndeki beş adet yamuk kesitli mikrokanaldaki %4 hacimsel oranındaki Al_2O_3-su nanoakışkanının diğer Reynolds sayıları için de kullanılmıştır. Benzer şekilde nanoakışkanın diğer hacimsel yüzde oranları ve ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumu için de yapılmıştır ve Ek Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Beş kanallı yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde üç farklı çözüm ağı için sonuçlar

Sıra	Çözüm ağı	Akışkanın çıkış sıcaklığı T_2 (K)	Ortalama duvar sıcaklığı T_w (K)	Isı transfer katsayısı h ($W/m^2 \cdot K$)	Nusselt sayısı Nu	Sürtünme faktörü f
1	137204	293,18	293,21	57366,76	26,17	0,01937
2	240546	293,17	293,21	57094,21	26,05	0,02053
3	640971	293,17	293,21	56814,35	25,92	0,02070

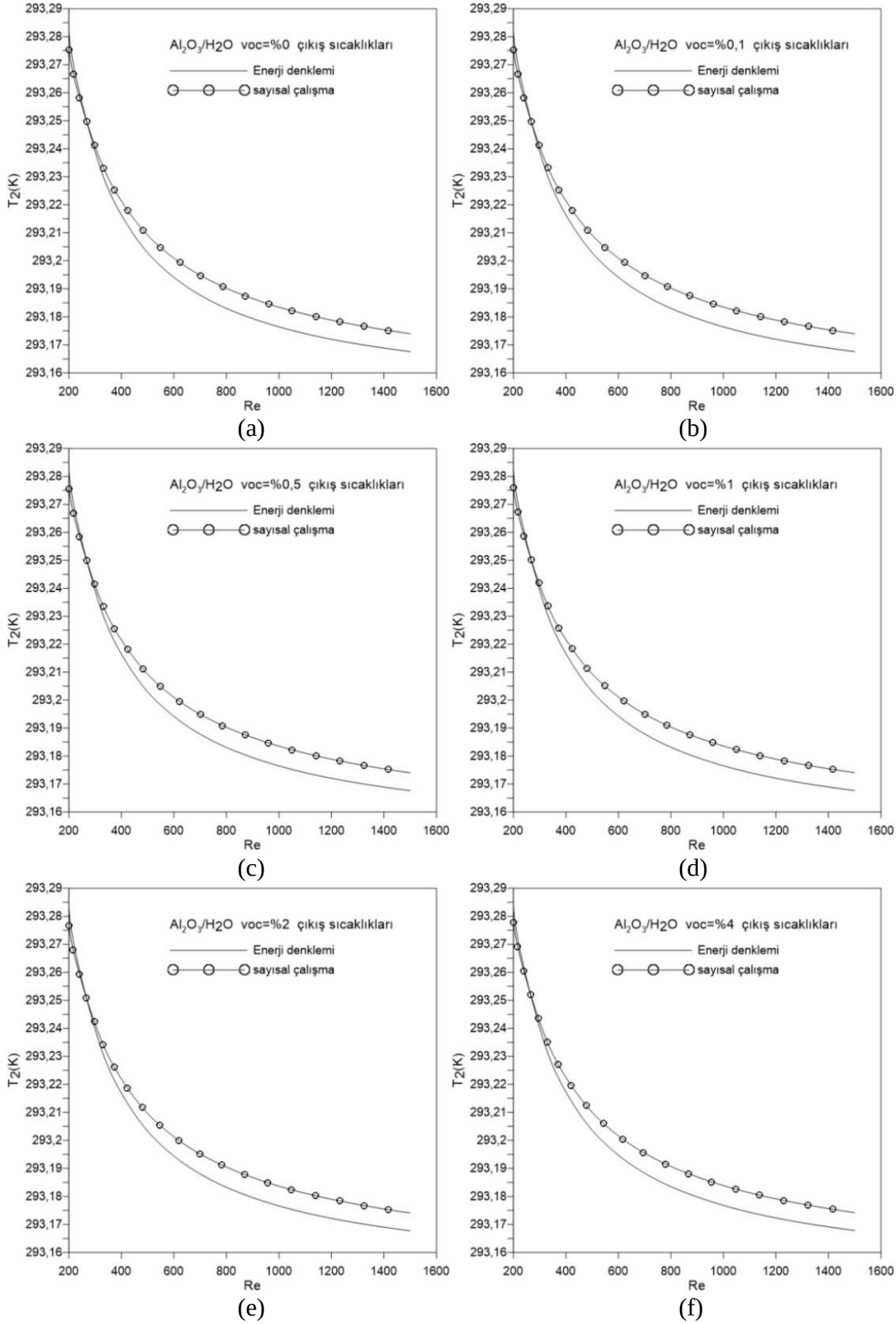
Al_2O_3-su nanoakışkanının %0, %0,01, %0,05, %1, %2 ve %4 hacimsel oranlarında ve Reynolds sayısının 200, 350, 500, 650, 1000, 1150, 1300, 1400 ve 1500 olması durumunda sayısal çalışma tekrarlanmıştır.

Yamuk kesitli üç, dört ve beş kanallı mikro ısı değiştiricisinde Al_2O_3-su nanoakışkanının Re=1000 ve hacimsel yüzde oranının voc=%1 olması durumunda nanoakışkanın mikrokanala giriş hızı u (m/s), kanal hidrolik çapı D_h (m), mikrokanallardaki ısının aktarıldığı toplam yüzey alanları A_s (m^2), mikrokanalların giriş kesit alanlarının toplamı A_c (m^2) ve akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı T_2 (K) Çizelge 5.5'de verilmiştir. Görüldüğü üzere ısı değiştiricilerin her üçünün de giriş kesitlerinin toplam alanları A_c eşittir. Isı değiştiricisindeki mikrokanal sayısı arttıkça hidrolik çap azalmaktadır. Bu nedenle, aynı Reynolds sayısı için ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması, giriş hızının artmasına neden olmaktadır. Akışkanın giriş hızının artması ise akışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması akışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır.

Çizelge 5.5. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde kanal sayısına göre Re=1000 ve %1 Al2O3-su nanoakışkanı için fiziksel ve ısıl özellikler

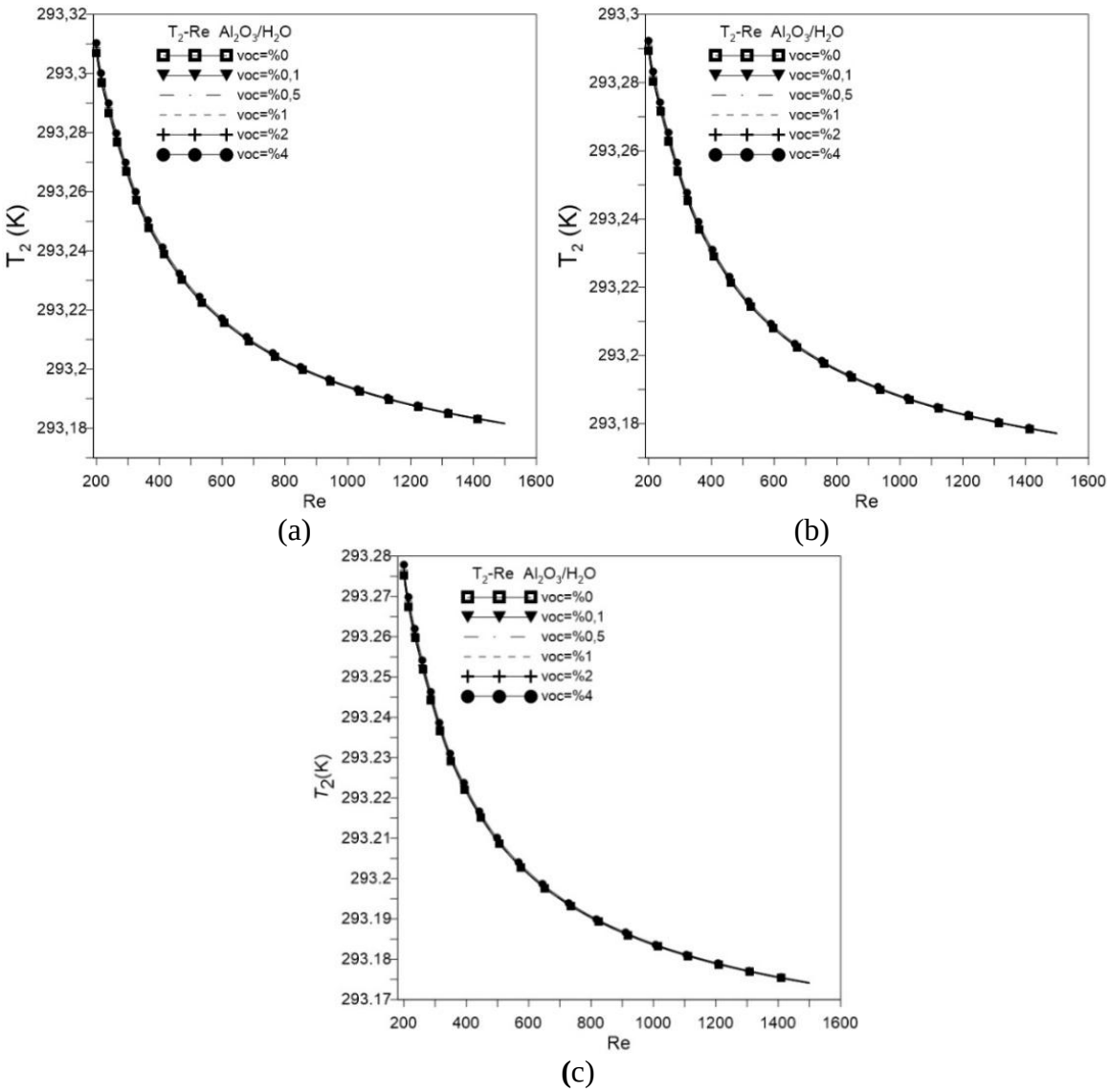
Kanal sayısı	Re	voc (%)	u (m/s)	D_h (μm)	A_s (mm^2)	A_c (μm^2)	T_2 (K)
n=3	1000	1	2,368	424	51,17	542	293,19
n=4	1000	1	2,764	363	59,74	542	293,19
n=5	1000	1	3,160	318	68,25	542	293,18

Al_2O_3-su nanoakışkanının beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklıkları Şekil 5.5'de Reynolds sayısının fonksiyonu olarak farklı hacimsel yüzde oranları (voc) için verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.5'de enerji denkleminden (Eş. 5.7) elde edilen akışkanın kanaldan çıkış sıcaklıkları da gösterilmiştir. Mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların enerji denkleminden elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Görüldüğü üzere artan Reynolds sayısı ile akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır. Benzer sonuç ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda da gözlenmiştir (bakınız Ek Şekil 2 ve Ek Şekil 3).



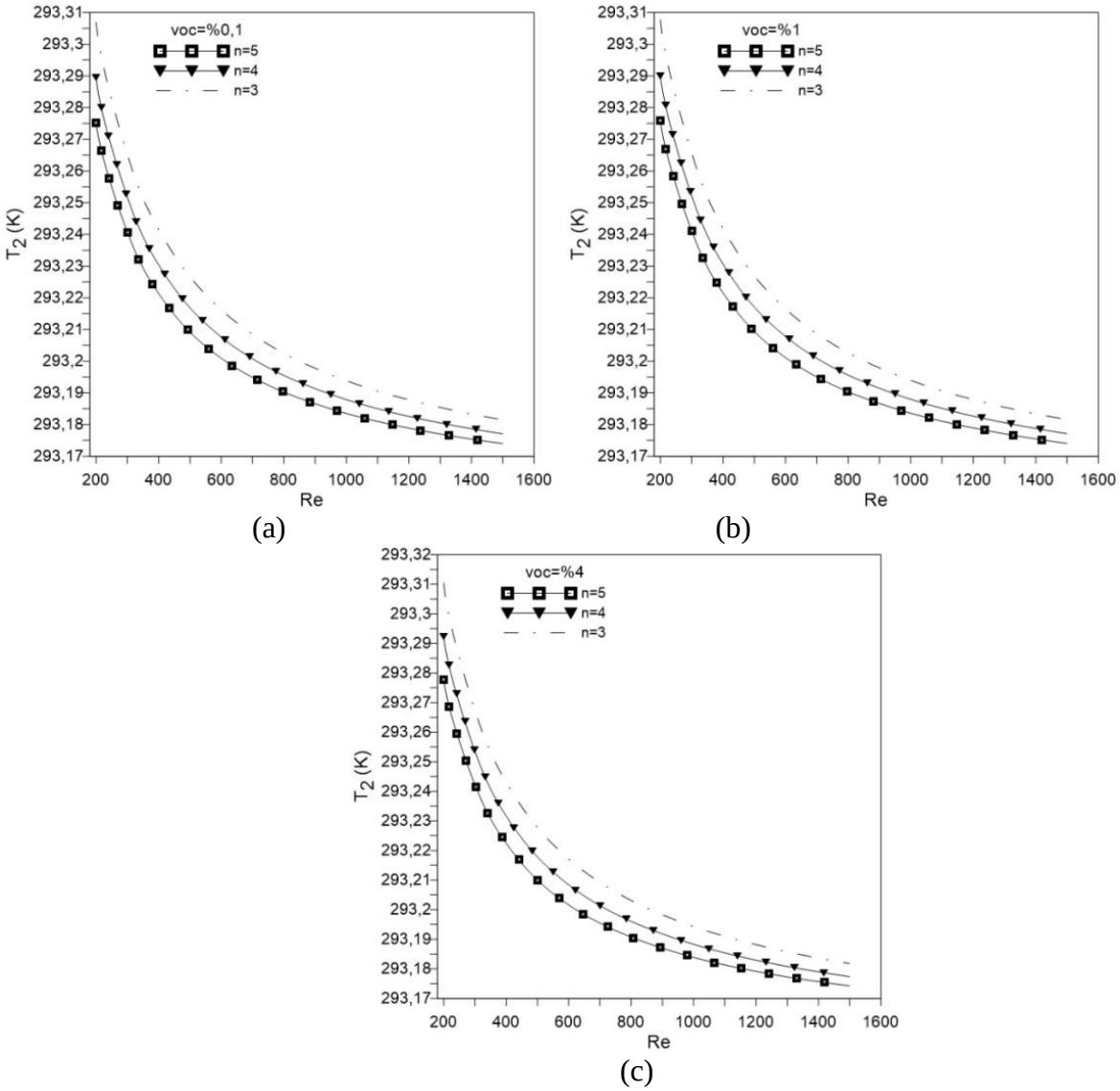
Şekil 5.5. n=5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarında akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2 ve (f) voc=%4

Şekil 5.6'da Al_2O_3-su nanoakışkanının hacimsel yüzde oranının akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olması durumları için verilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısında Al_2O_3-su nanoakışkanının artan hacimsel yüzde oranı ile nanoakışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile söylenirse, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi yok denilebilir düzeydedir. Bu ise mikrokanal uzunluğunun küçük olmasından dolayı akışkanın kanal boyunca yeterince ısınamadan mikrokanaldan çıkması şeklinde yorumlanabilir.



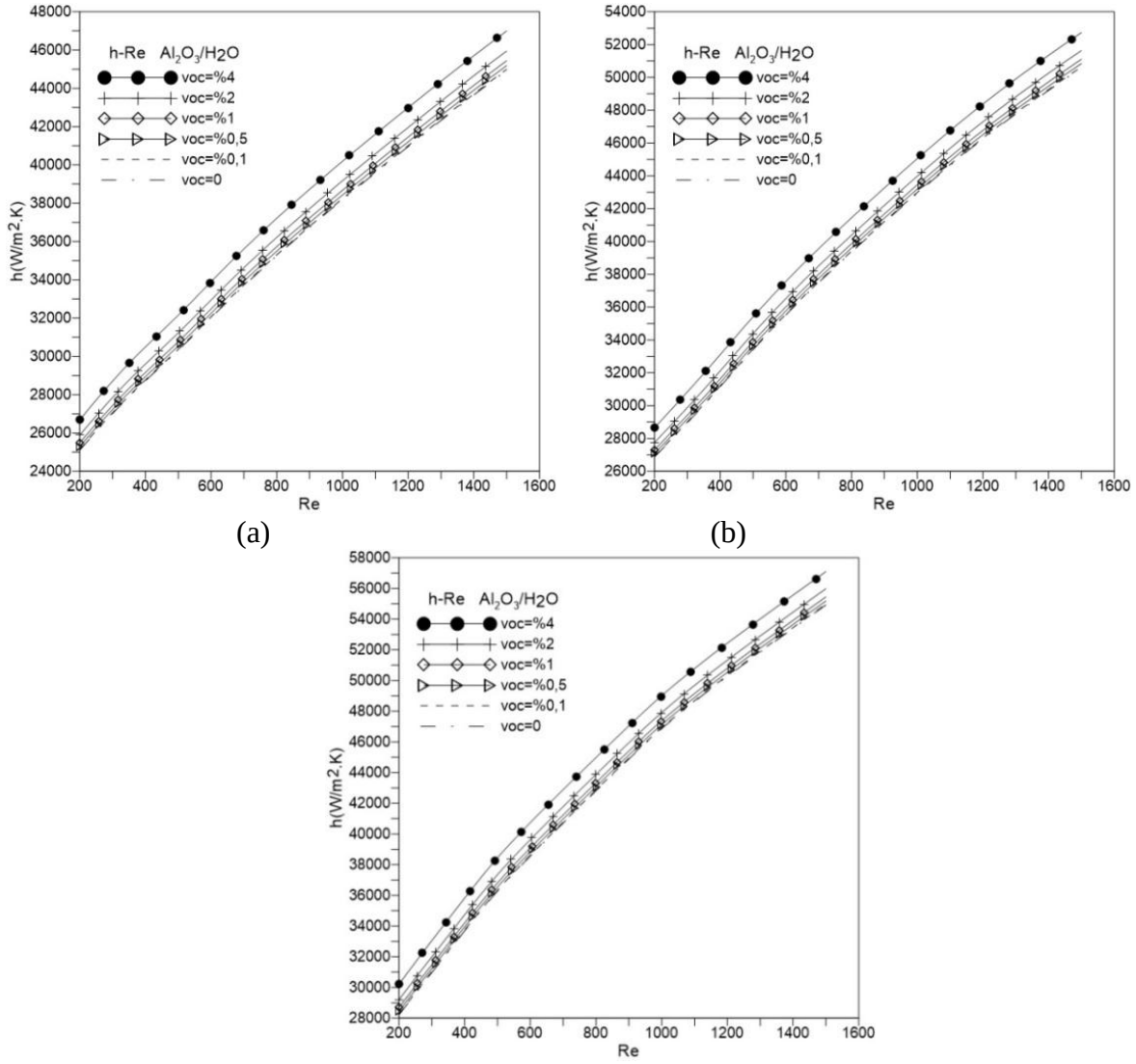
Şekil 5.6. Al_2O_3-su nanoakışkanı için farklı hacimsel yüzde oranlarında akışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) n=3 (b) n=4 ve (c) n=5

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın yamuk kesitli mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisini görmek için, nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.7'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için (voc=%0,1, %1 ve %4) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için kanal sayısı artınca nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır. Aynı sonuç Çizelge 5.5'de Re=1000, voc=%1 ve n=5 için görülmüştür.



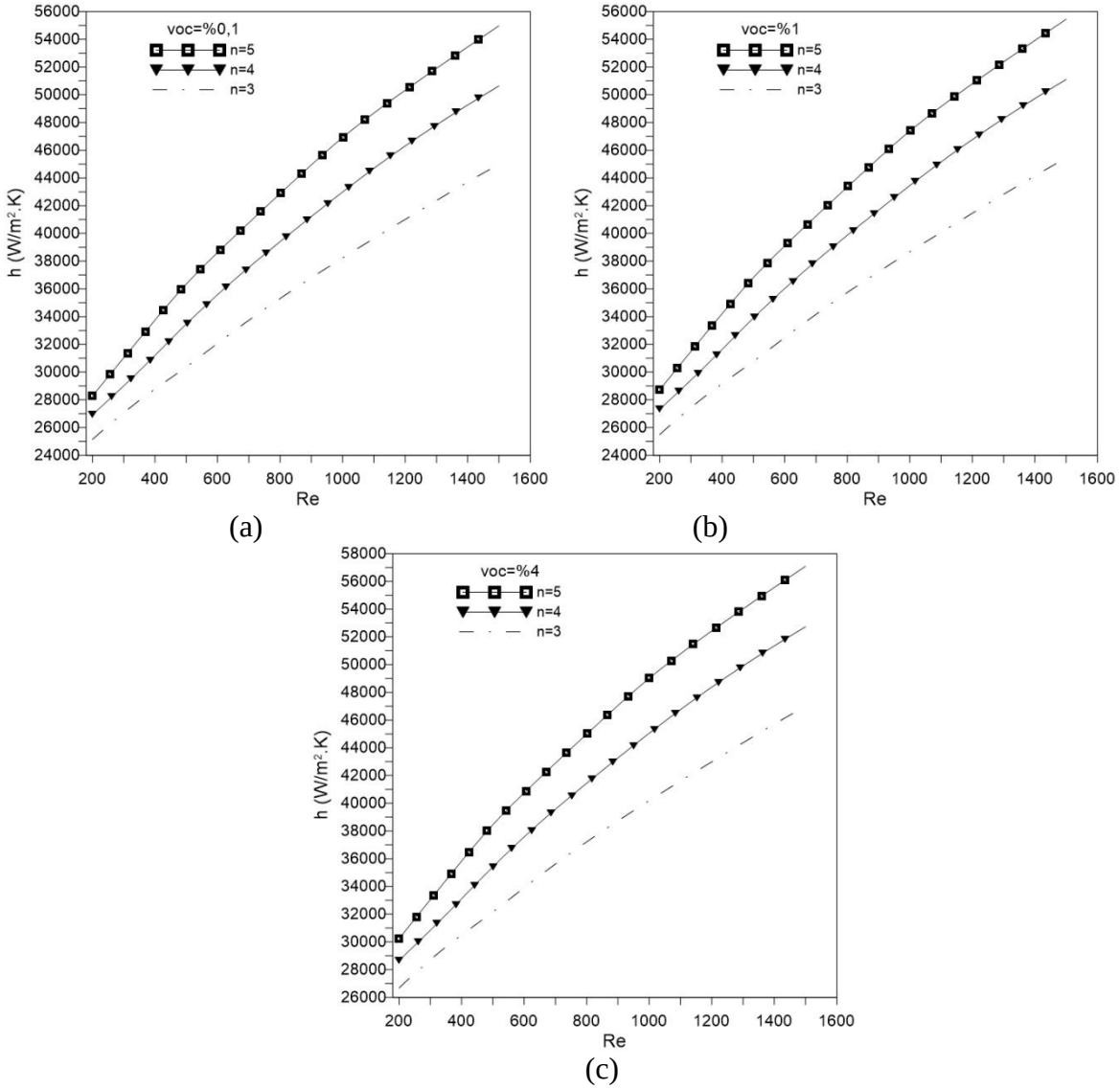
Şekil 5.7. Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi

Al_2O_3-su nanoakışkanı için nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görebilmek için kanaldaki ortalama ısı transfer katsayısı h Reynolds sayısının Re fonksiyonu olarak Şekil 5.8'de nanoakışkanın farklı hacimsel yüzde oranları için ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olması durumları için verilmiştir. Sabit Reynolds sayısı için nanoakışkanların hacimsel yüzde oranlarının artması ile mikrokanaldaki ısı transfer katsayısının arttığı görülmüştür. Ayrıca, Şekil 5.8'de görüldüğü üzere artan Reynolds sayısı ile ortalama ısı transferi katsayısı artmaktadır. Khanafer, Vafai, ve Lightstone (2003)'de yaptıkları çalışma sonucunda artan Reynolds sayısı ile ısı transferi katsayısının arttığını ifade etmişlerdir.



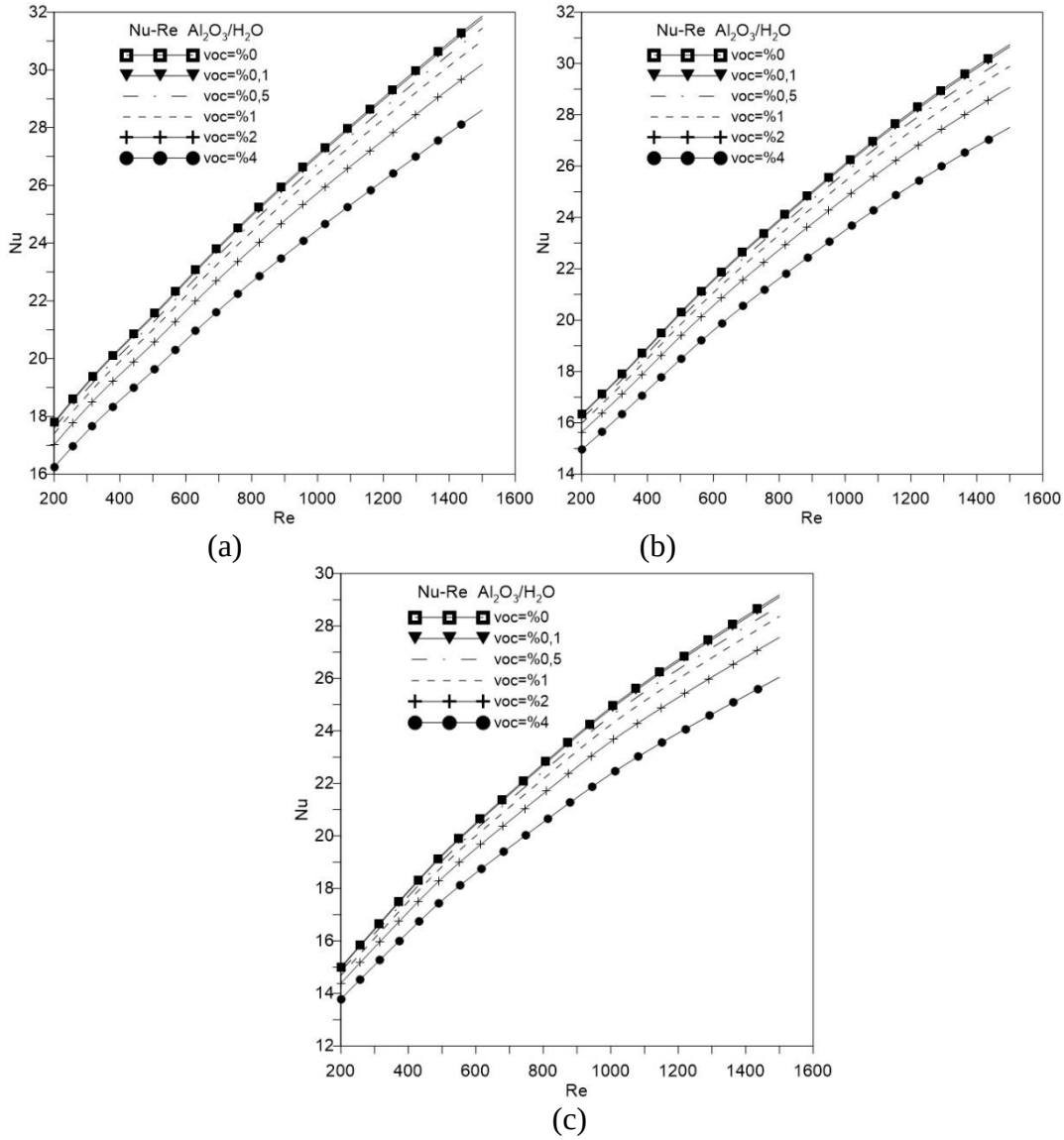
Şekil 5.8. Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın ısı transfer katsayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.9'da mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısında kanal sayısının artması ile ortalama ısı transfer katsayısında artış meydana gelmiştir.



Şekil 5.9. Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranlarında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

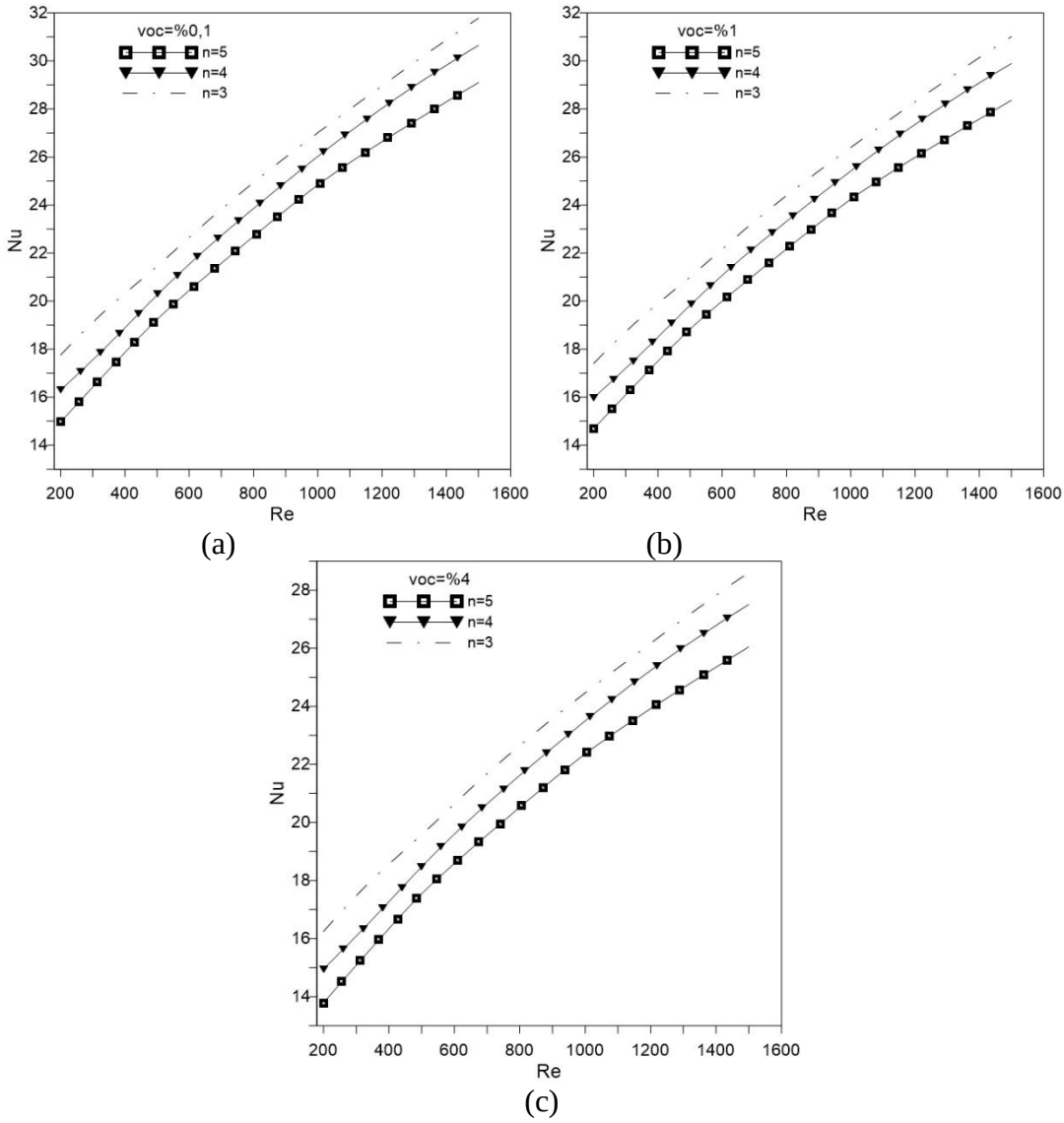
Şekil 5.10'da ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olması durumunda Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranları için ortalama Nusselt sayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, Reynolds sayının artması ile Nusselt sayısı artmaktadır. Ayrıca, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının (voc) artışı ile ortalama Nusselt sayısının azaldığı görülmektedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; Nusselt sayısı (Nu), akışkanın ısı transferi katsayısına (h) ve ısıl iletkenlik katsayısına (k) bağlıdır. Nanoakışkanların hacimsel yüzde oranları arttığı zaman nanoakışkanın ısıl iletkenlik katsayısı ve ısı transfer katsayısı artmaktadır. Fakat, ısıl iletkenliğin yükselme oranı, ısı transfer katsayının yükselme oranından fazla olduğundan dolayı, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artışı ile ortalama Nusselt sayısında azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5.10. Al_2O_3-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 kanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

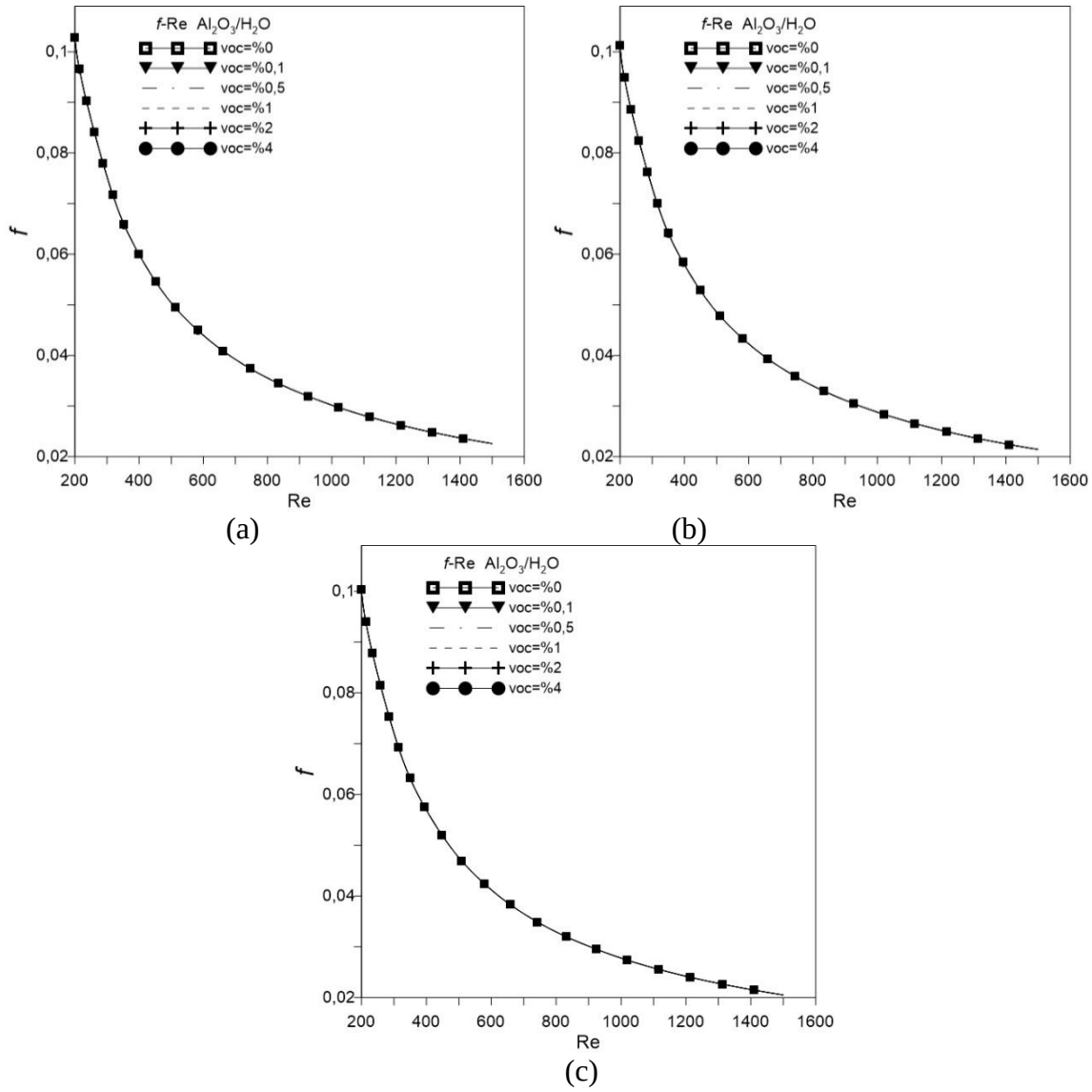
Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın Nusselt sayısı üzerindeki etkisini görmek için Nusselt sayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.11'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması ile Nusselt sayısı azalmıştır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; Nusselt sayısı (Nu), akışkanın ısı transferi katsayısına (h) ve mikrokanalların hidrolik çaplarına (D_h) bağlıdır. Çizelge 5.5'de görüldüğü gibi ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısı azaldığı zaman hidrolik çap artmıştır. Ayrıca kanal sayısı azaldığı zaman nanoakışkanın ısı transfer katsayısı azalmıştır. Fakat, hidrolik çaptaki

yükselme oranı, ısı transfer katsayısındaki azalma oranına göre daha yüksektir. Bu nedenle ısı değiştiricisinde sabit Reynolds sayısında kanal sayısının artışı ile ortalama Nusselt sayısında azalma meydana gelmektedir.



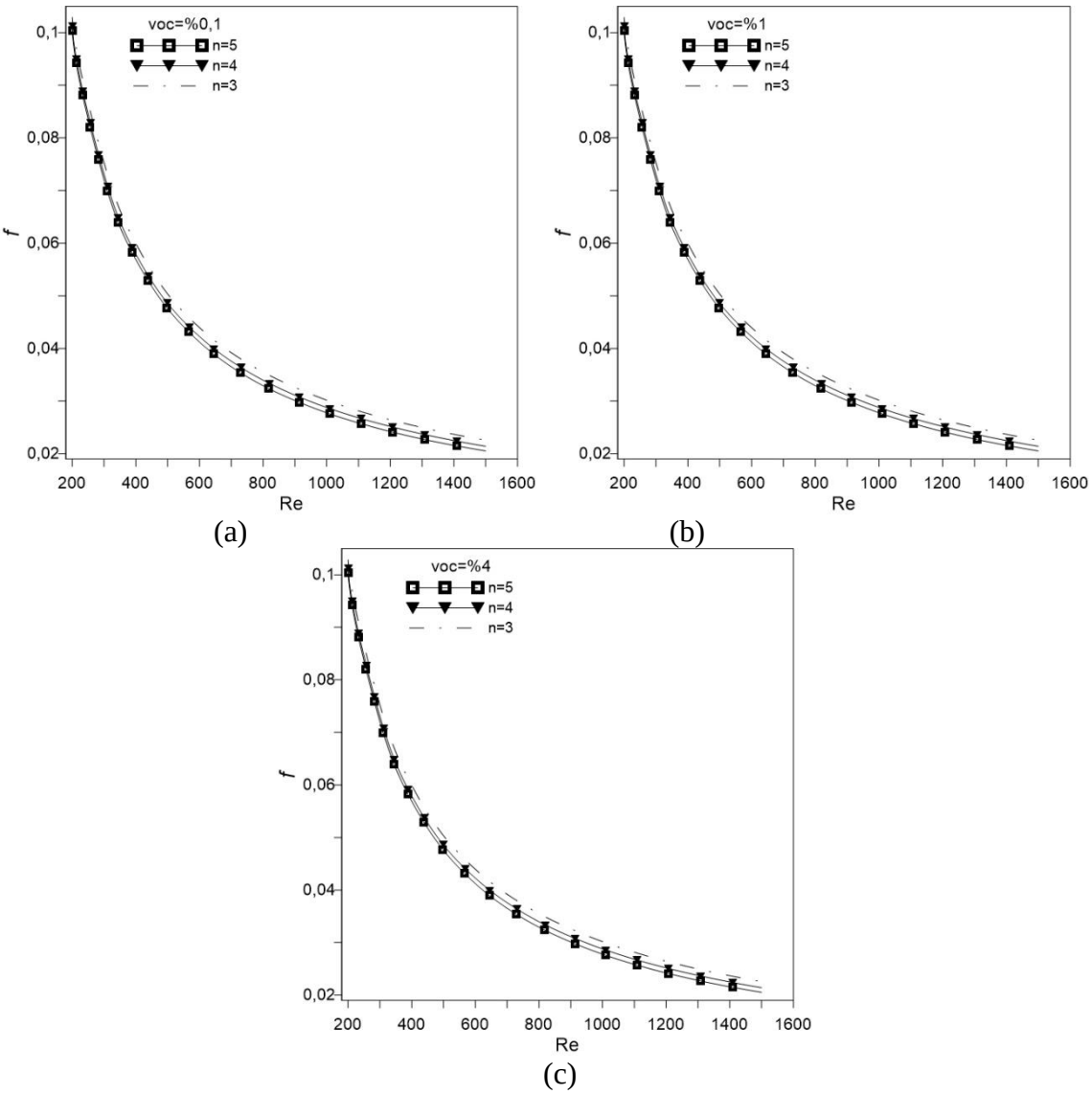
Şekil 5.11. Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi

Al_2O_3-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel oranlarındaki ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi üç, dört ve beş kanallı ısı değiştiricisi için Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.12'den görüldüğü gibi, Reynolds sayısı arttıkça ortalama Fanning sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir. Nanoakışkanın hacimsel yüzde miktarının sürtünme faktöründe bir değişme meydana getirmediği görülmektedir.



Şekil 5.12. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 için Al_2O_3-su nanoakışkanın çeşitli hacimsel yüzde oranlarında ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

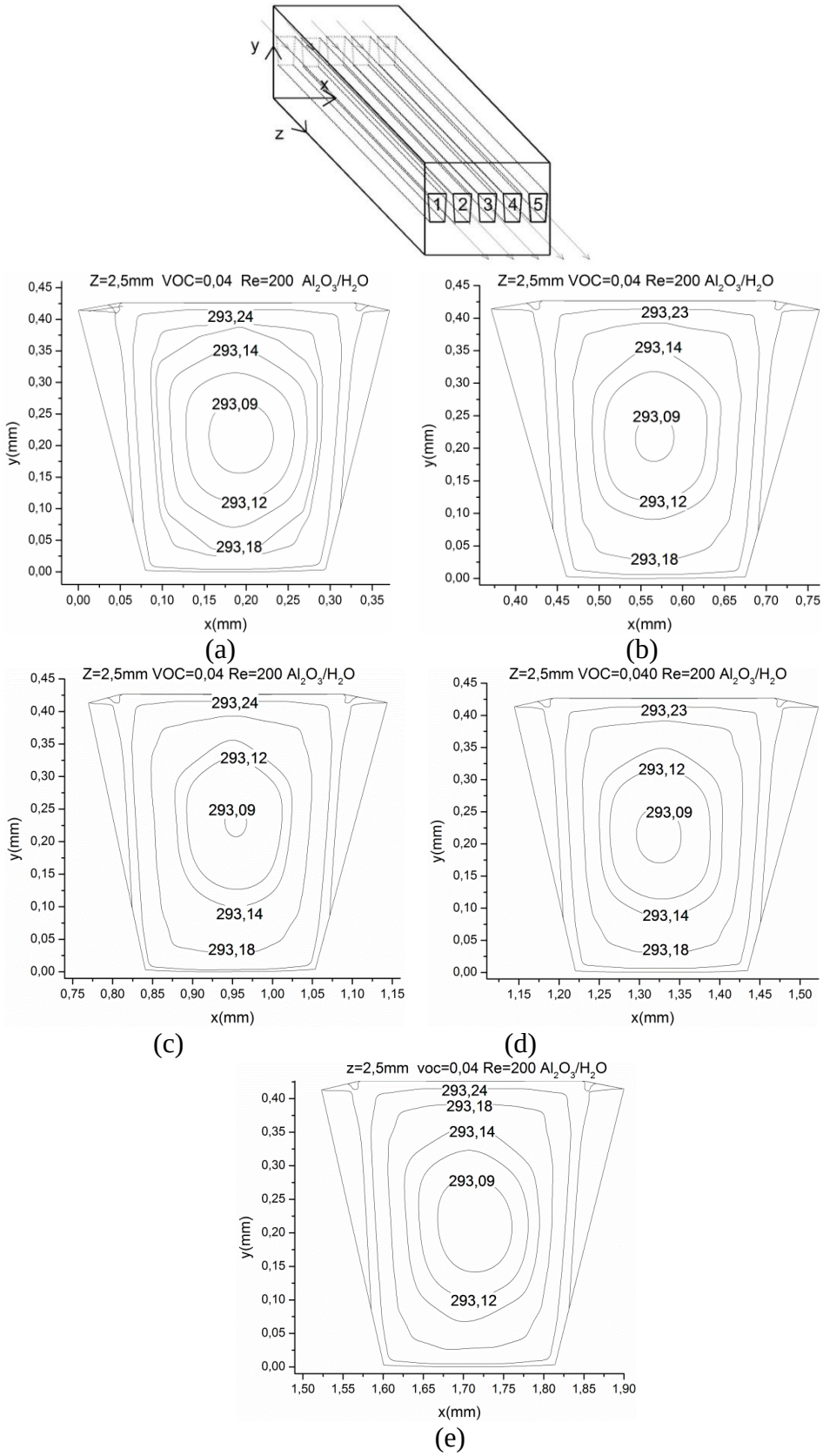
Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.13'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için kanal sayısı artınca ortalama Fanning sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir.



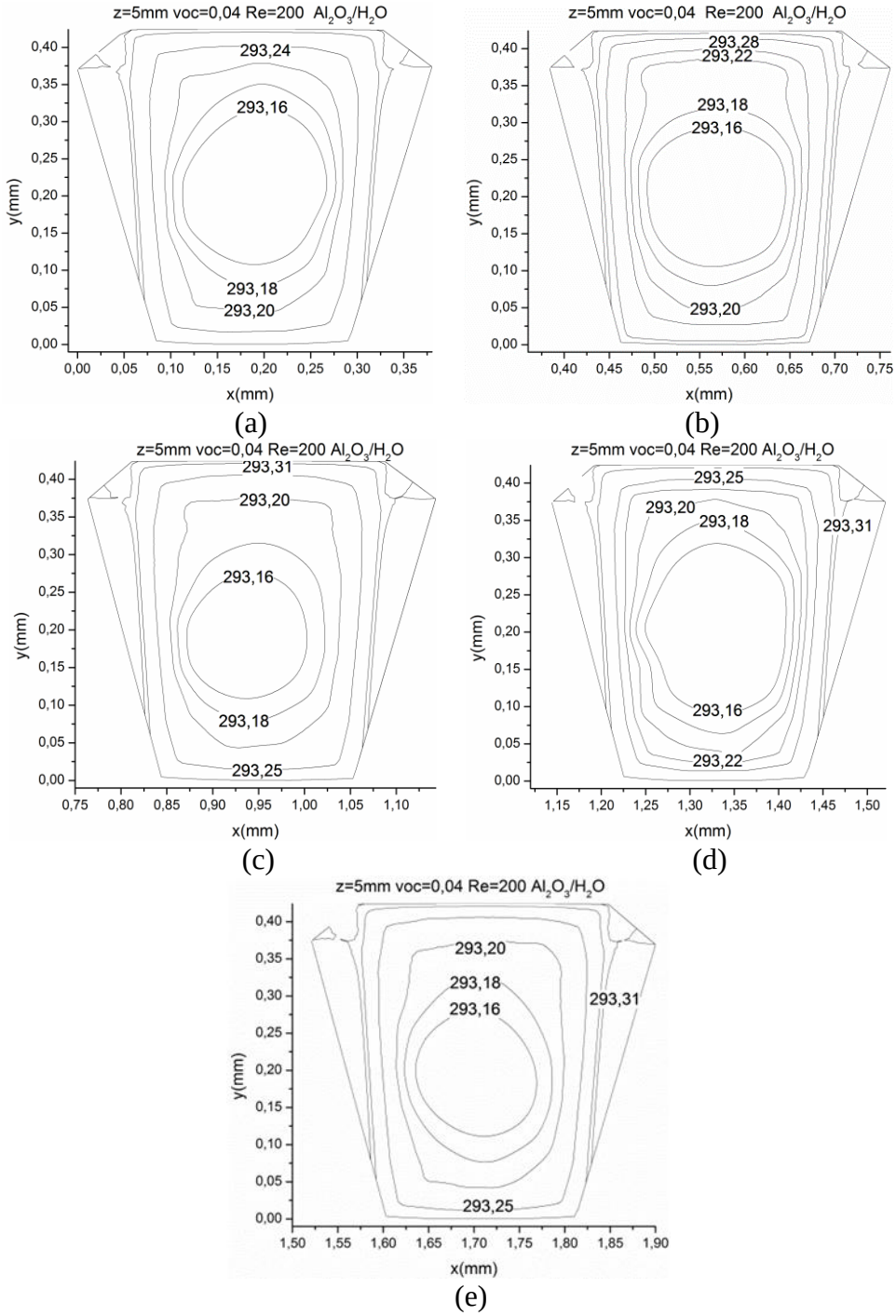
Şekil 5.13. Al_2O_3-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisi

Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al_2O_3-su nanoakışkanın voc=%4 hacimsel oranında Re=200 için beş adet yamuk kesitli mikrokanaldaki sıcaklık konturları sırası ile kanal girişinden itibaren 2,5mm, 5mm ve 10mm (çıkış kesiti) kesitleri için Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16'da verilmiştir. Kanalın girişinden çıkışına doğru nanoakışkanın sıcaklığının arttığı görülmektedir. Sıcaklık konturlarından görüldüğü gibi, akışkanın duvar yakınındaki sıcaklığı kanal merkezindeki sıcaklığa göre daha yüksektir. Ayrıca, sıcaklık dağılımından simetri görülmektedir. Kararlı rejim şartlarında sabit Reynolds sayısında kanal girişinden belirli mesafedeki sıcaklık konturlarının beş adet yamuk kesitli mikrokanal için de aynı olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar diğer Reynolds sayılarında da görülmüştür. Örnek

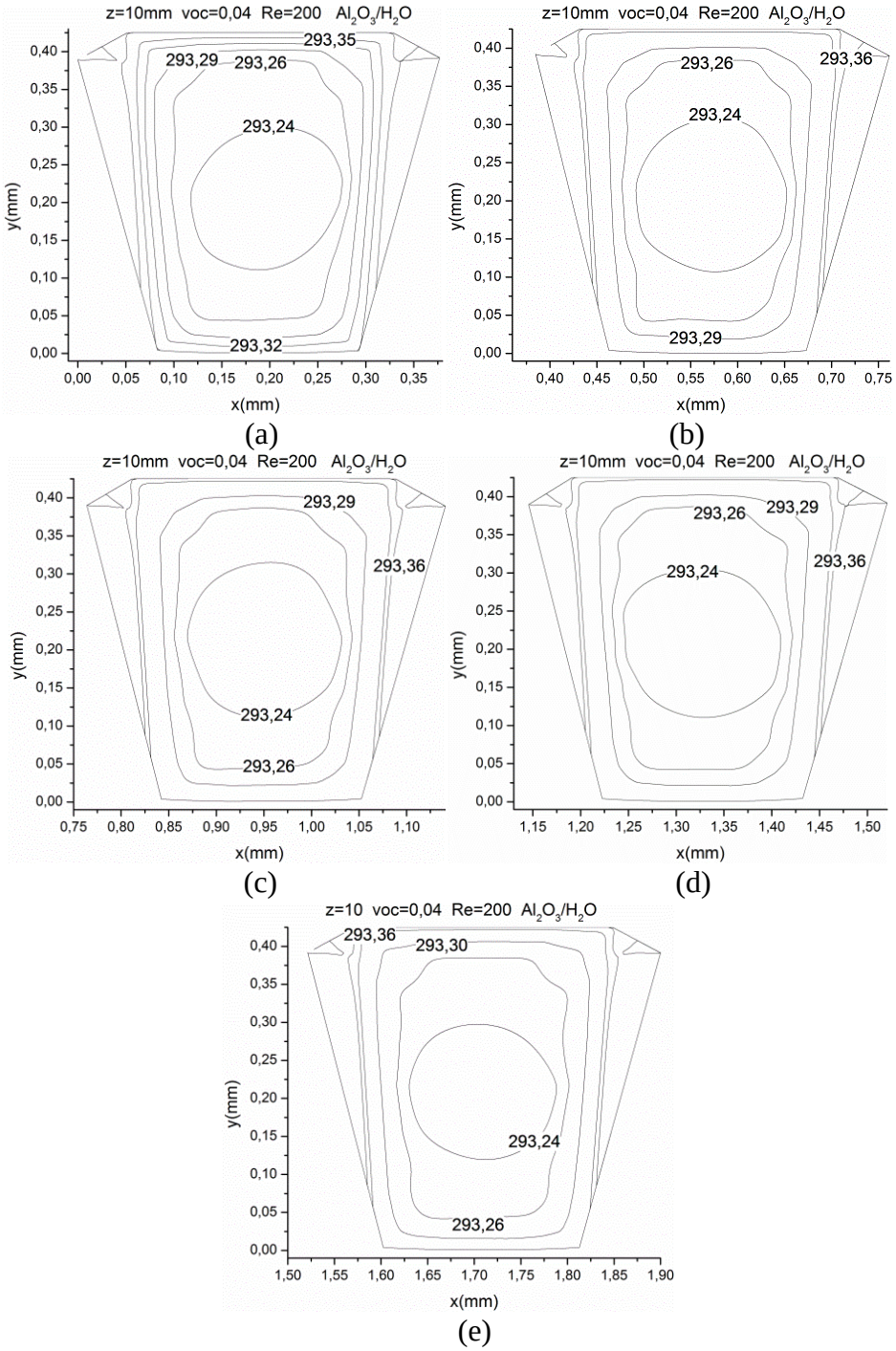
olarak; nanoakışkanın %4 hacimsel oranında Reynolds sayısının 500 olduğu durumdaki z=5mm ve z=10mm (çıkış kesiti)'deki sıcaklık konturları ve aynı şekilde nanoakışkanın %4 hacimsel oranında, Reynolds sayısının 1000 olduğu durumdaki z=5mm'deki sıcaklık konturları Ek 1'de (Ek Şekil 4, Ek Şekil 5 ve Ek Şekil 6) verilmiştir. Isı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda kanaldaki z=2,5mm, z=5mm ve z=10mm'deki kesitteki sıcaklık konturları Re=500 ve voc=%4 için Ek 1'de (Ek Şekil 7-Ek Şekil 12) verilmiştir. Benzer sonuçlar n=3 ve 4 için de şekillerde görülmektedir.



Şekil 5.14. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=200 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranında her bir kanal için sıcaklık konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal



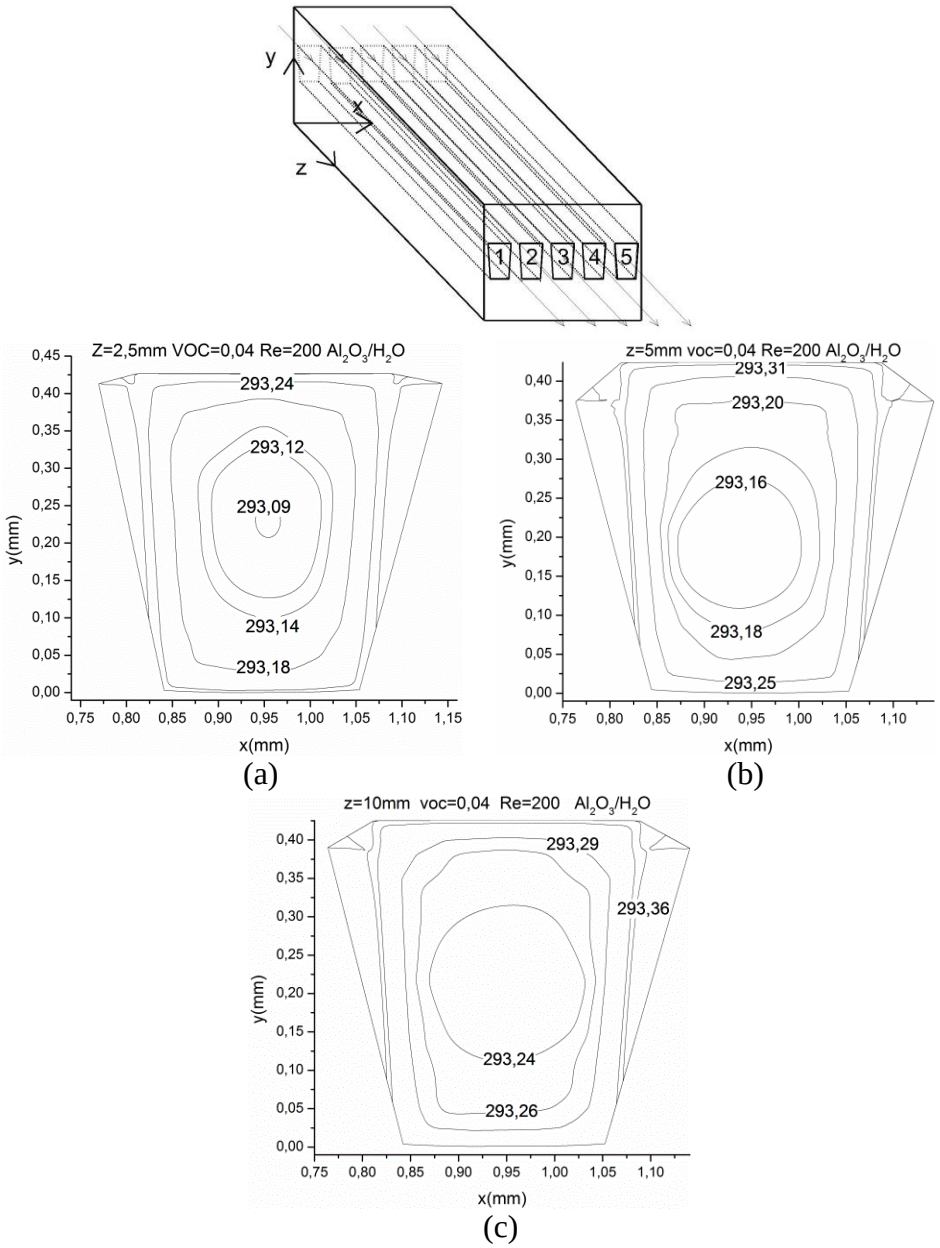
Şekil 5.15. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 5mm kesitinde Re=200 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranında her bir kanal için sıcaklık konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal



Şekil 5.16. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 10mm kesitinde Re=200 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranında her bir kanal için sıcaklık konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal

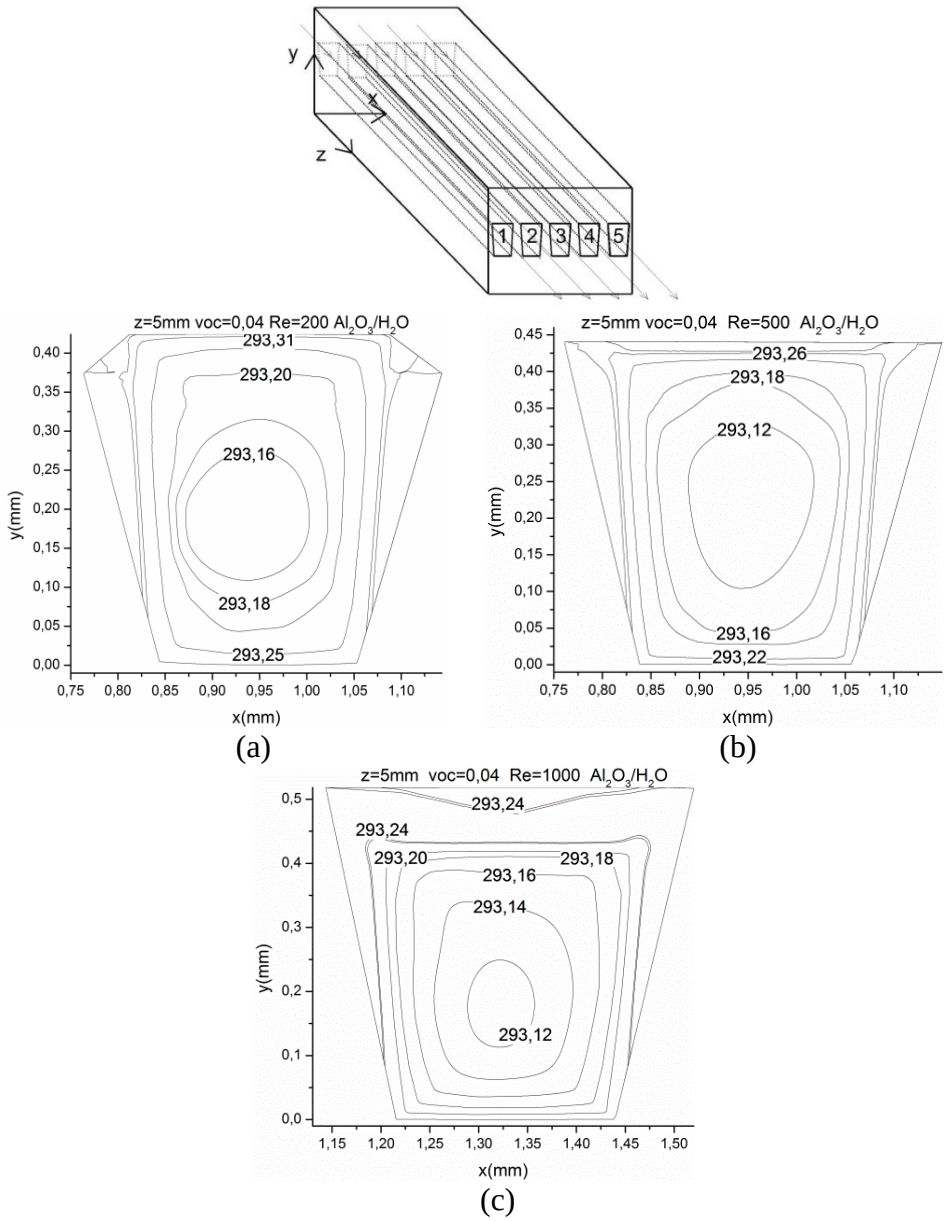
Sıcaklık konturlarının ısı değiştiricisindeki mikrokanal içerisindeki akış yönündeki (z-yönü) z=2,5mm, z=5mm ve z=10mm'deki değişimi Re=200 ve nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının voc=%4 olması durumunda Şekil 5.17'de beş mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanal için gösterilmiştir. Şekil 5.17'de görüldüğü üzere,

yamuk kesitli mikrokanalda akış yönünde ilerledikçe akışkanın ısındığı ve kanal merkezine doğru akışkan sıcaklığında artış meydana geldiği görülmektedir. Diğer bir ifade ile söylemek gerekirse, kanal girişinden itibaren akış yönünde ilerledikçe ısıl sınır tabaka kalınlığı artmaktadır.



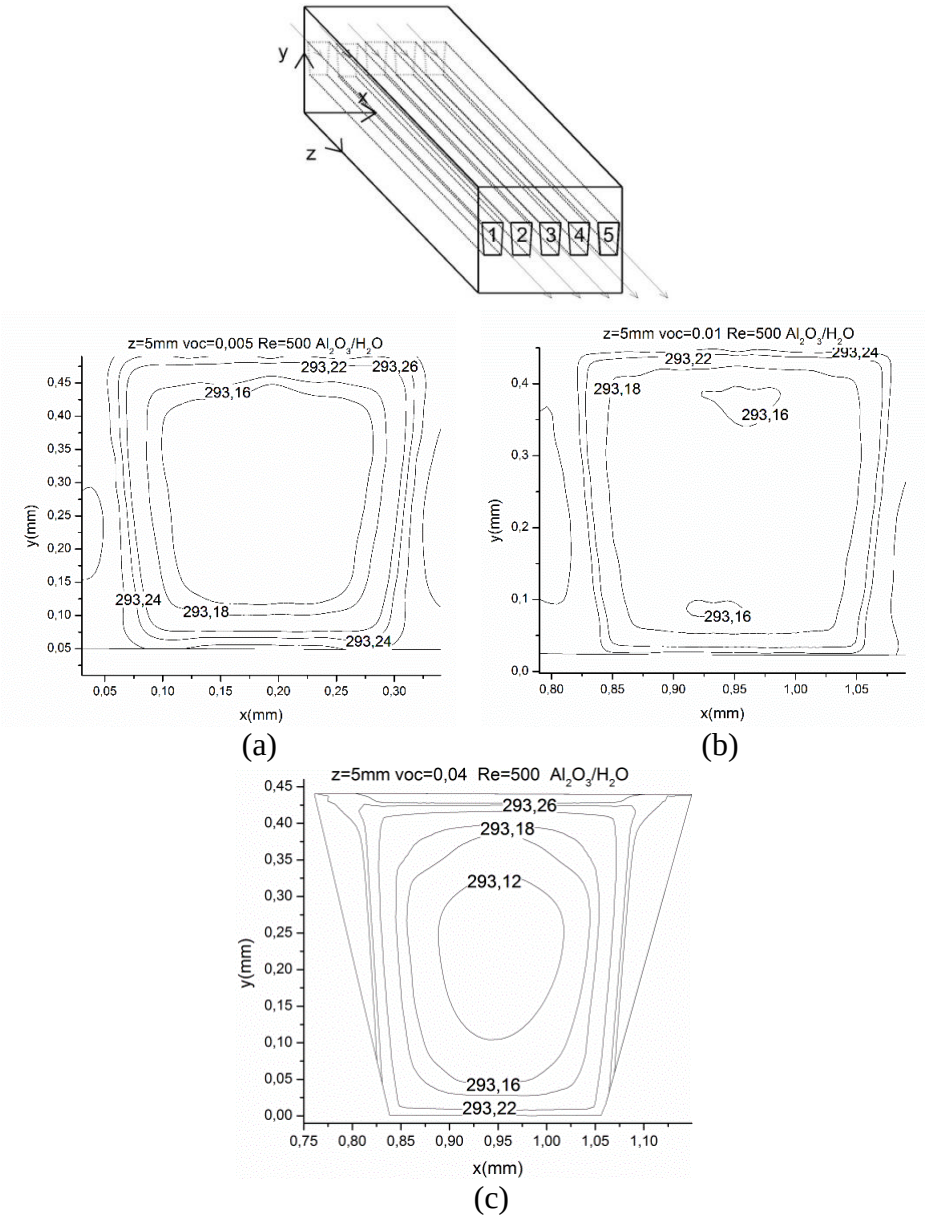
Şekil 5.17. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda Re=200 ve %4 hacimsel oranında (a) z=2,5mm, (b) z=5mm ve (c) z=10mm'deki sıcaklık konturları

Reynolds sayısının sıcaklık konturu üzerindeki etkisini görmek için beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalın z=5mm'deki kesitte sıcaklık konturu Reynolds sayısının 200, 500 ve 1000 değerleri için nanoakışkanın voc=%4 hacimsel oranı için Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Şekil 5.18'de görüldüğü üzere artan Reynolds sayısı ile birlikte aynı kesitte sıcaklık sınır tabakasının kalınlığının azaldığı görülmektedir. Sıcaklık sınır tabakasının azalması ise ısı transferinin artması ile sonuçlanmaktadır (bakınız Şekil 5.8 ve 5.9). Reynolds sayısının artması ile aynı kesitte akışkan sıcaklığının azaldığı görülmektedir.



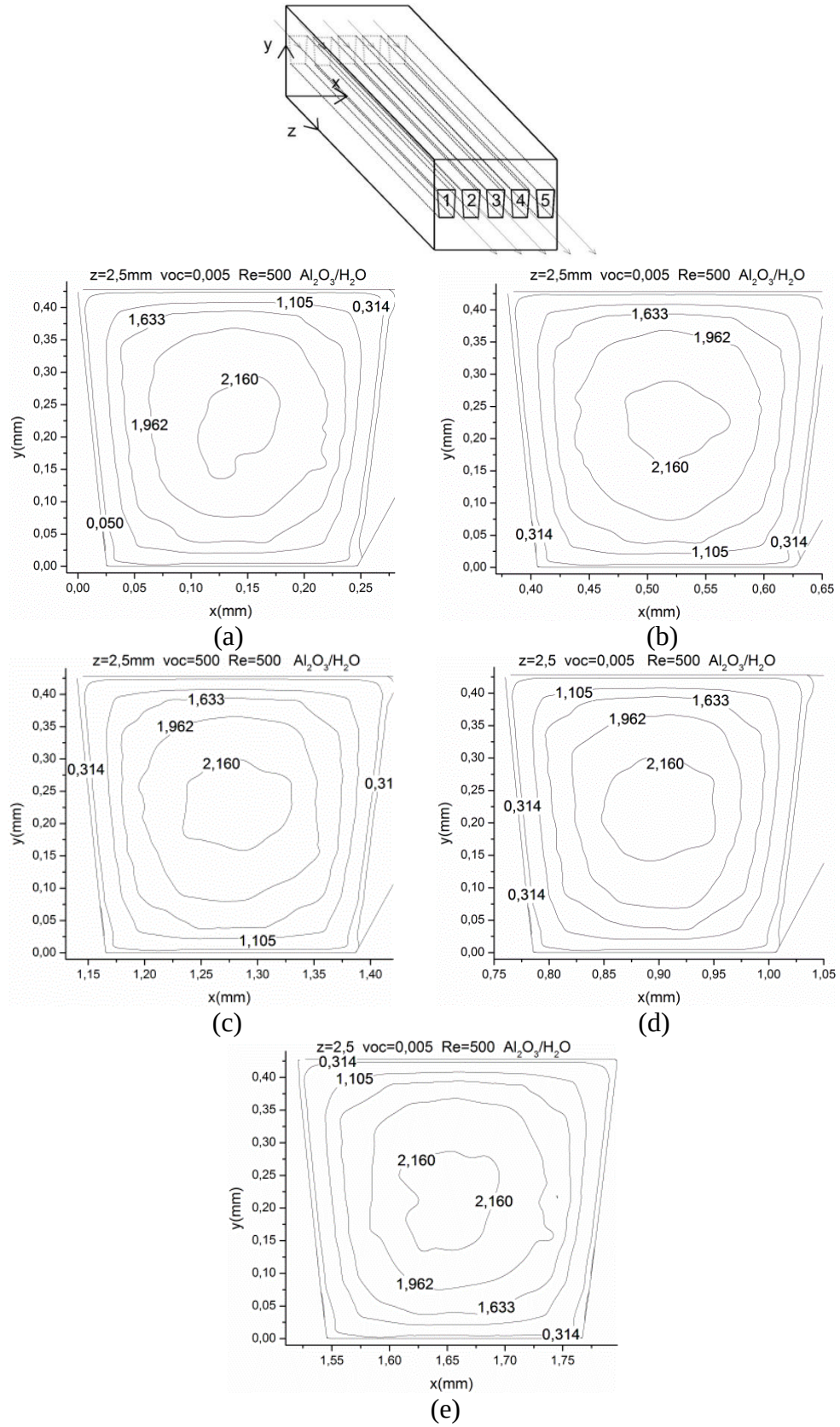
Şekil 5.18. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) Re=200, (b) Re=500 ve (c) Re=1000

Nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının sıcaklık konturu üzerindeki etkisi Şekil 5.19'da beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu kanalın z=5mm'deki kesitte hacimsel yüzde oranının voc=%0,5, %1 ve %4 değerlerinde Re=500 için çizilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artması nanoakışkanın sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır.

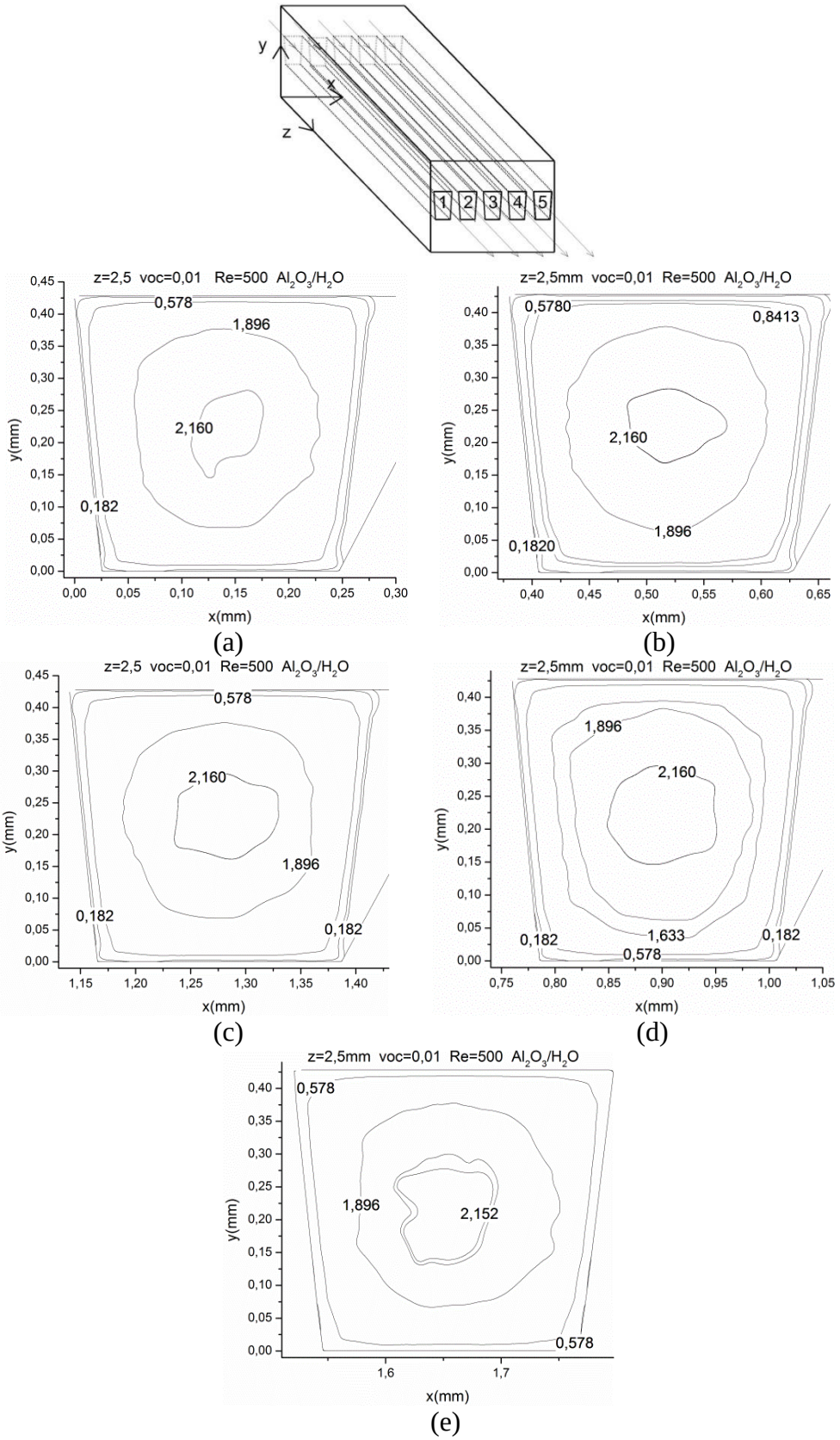


Şekil 5.19. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4

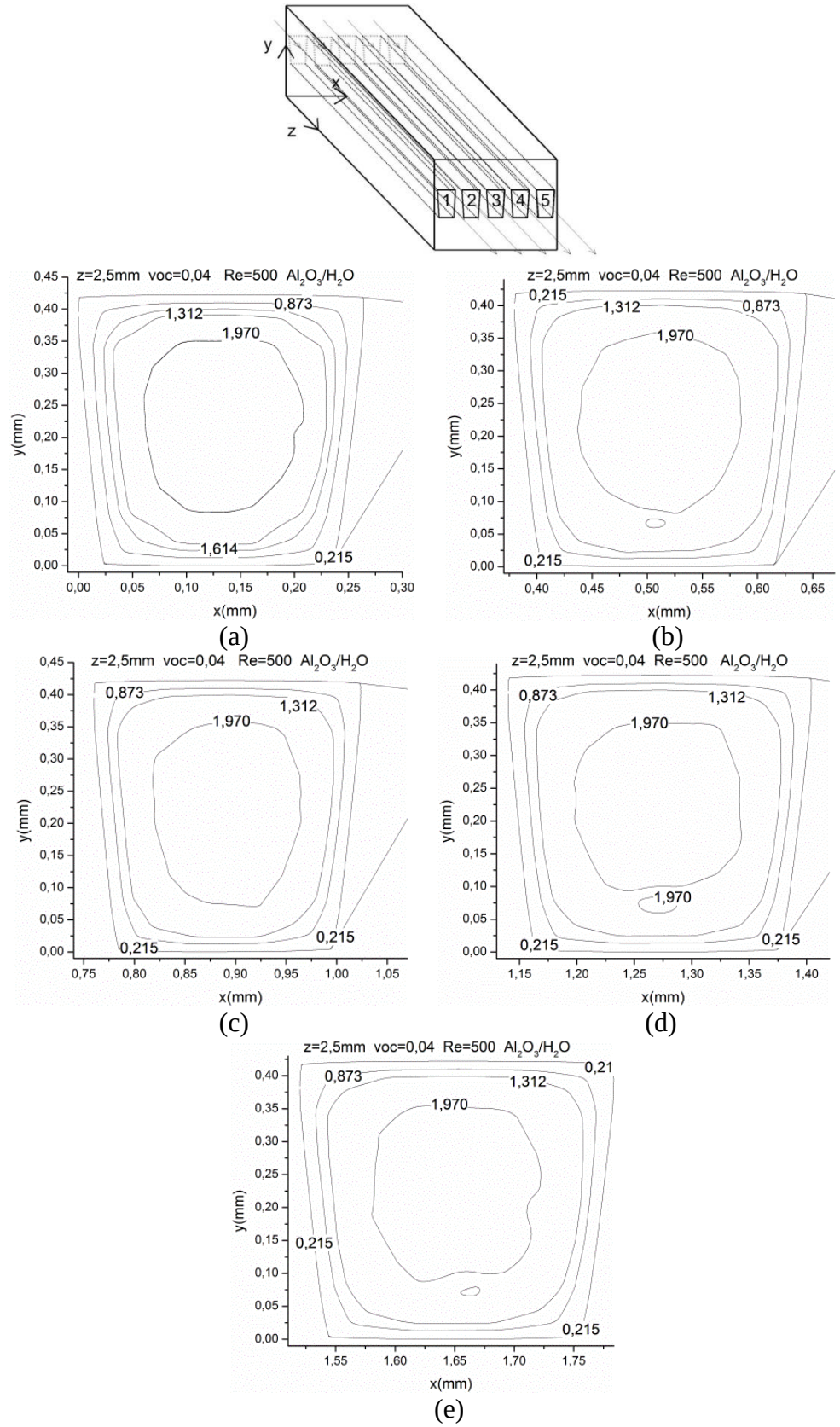
Benzer şekilde hız konturları akış yönünde değişik mesafelerde farklı Reynolds sayıları ve nanoakışkanın farklı hacimsel yüzde oranları için verilmiştir. İlk önce nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının hız konturu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Re=500 için akış yönünde z=2,5mm kesitindeki hız konturları nanoakışkanın hacimsel yüzde oranları voc=%0,5, %1 ve %4 için Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının n=5 olması durumunda verilmiştir. Şekil (a)-(e) sırasıyla 1-5 nolu kanallar içindir. Hız konturlarından görüldüğü üzere aynı Reynolds sayısı ve aynı hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki her bir yamuk kesitli mikrokanal için hız konturları aynı kalmaktadır. Diğer bir ifade ile 1, 2, 3, 4 ve 5 nolu yamuk kesitli mikrokanallarda z=2,5mm kesitindeki hız koınturları aynıdır. Ayrıca her kanalda simetri görülmektedir. Kanalın merkezine doğru akışkanın hızının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.20. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=500 ve voc=%0,5 hacimsel yüzde oranı için her bir kanaldaki hız konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal



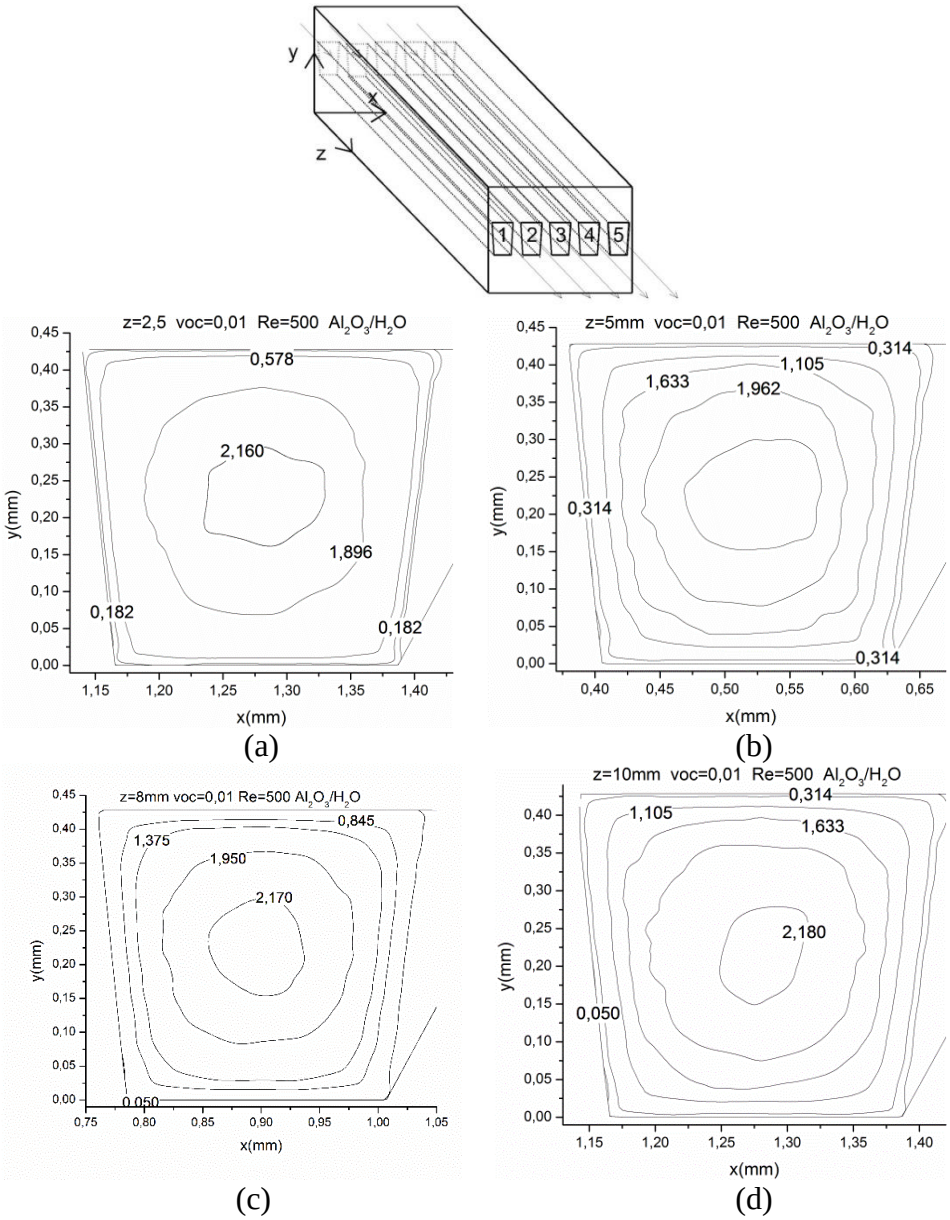
Şekil 5.21. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=500 ve voc=%1 hacimsel yüzde oranı için her bir kanaldaki hız konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal



Şekil 5.22. Beş adet yamuk kesitli mikrokanalın girişinden itibaren 2,5mm kesitinde Re=500 ve voc=%4 hacimsel yüzde oranı için her bir kanaldaki hız konturları (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal

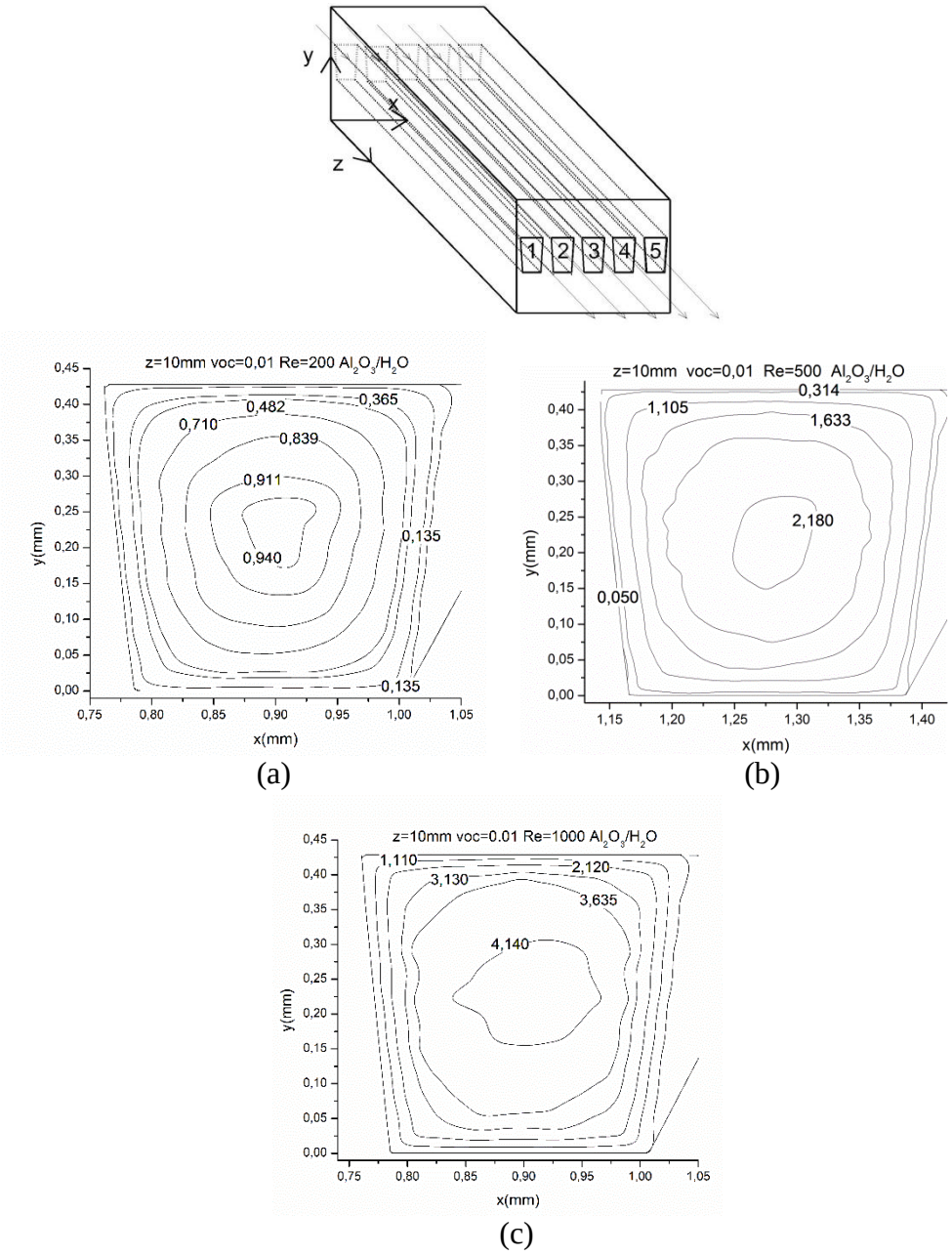
Benzer sonuçlar beş mikrokanallı ısı değiştiricisinin diğer kesitlerinde de görülmüştür. Örnek olarak; nanoakışkanın %0,5, %1 ve %4 hacimsel oranlarında Reynolds sayısının 500 olduğu durumdaki z=5mm ve z=10mm (çıkış kesiti)'deki hız konturları Ek'de (Ek Şekil 13- Ek Şekil 18) verilmiştir. Isı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda kanaldaki z=2,5mm, z=5mm ve z=10mm'deki kesitte hız konturları Re=500 ve voc=%4 için Ek'de (Ek Şekil 19-Ek Şekil 24) verilmiştir. Benzer sonuçlar n=3 ve 4 için de görülmüştür.

Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanal için z=2,5mm, z=5mm ve z=10mm kesitlerindeki hız konturları Re=500 ve nanoakışkanın hacimsel oranının voc=%1 değeri için Şekil 5.23'de verilmiştir. Görüldüğü üzere kanal girişinden itibaren kanal çıkışına doğru akış yönünde ilerledikçe kesitteki hız konturları değişmektedir. Bunun sebebi ise hız sınır tabakasının gelişmeye devam etmesidir. Reynolds sayısının 500 değeri için beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki hız sınır tabakası giriş bölgesi uzunluğu $z \approx 0{,}05 \cdot Dh \cdot Re \approx (0{,}05)(0{,}00031776)(500) = 0{,}00794m = 7{,}94$ mm'dir. Şekil 5.23'den görüldüğü üzere hız konturu kanal girişinden itibaren z=8mm'ye kadar değişmekte bundan sonra sabit kalmaktadır (Bakınız Şekil 5.23c ve 5.23d).



Şekil 5.23. n=5 için üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda Re=500 ve %1 hacimsel oranı için kanal girişinden itibaren (a) z=2,5mm (b) z=5mm, (c) z=8mm ve (d) z=10mm'deki hız konturları

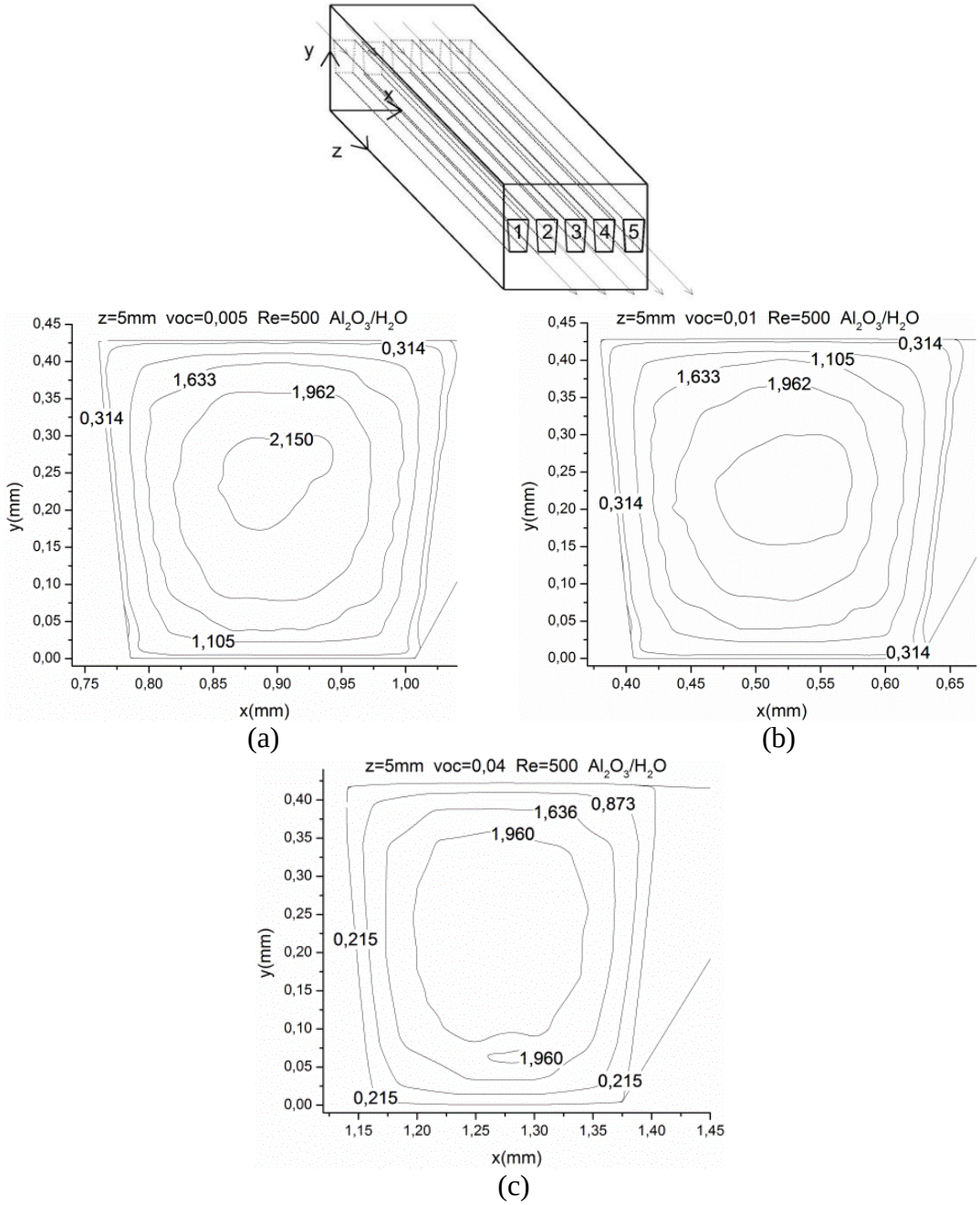
Akış hızının hız konturları üzerindeki etkisi Şekil 5.24'de verilmiştir. Şekil 5.24'de z=10mm (çıkış kesiti)'deki hız konturları beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanal için voc=%1 hacimsel oranında Re=200, Re=500 ve Re=1000 için verilmiştir. Görüldüğü üzere Reynolds sayısı değiştikçe çıkış kesitindeki hız konturları farklılık göstermektedir.



Şekil 5.24. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=10mm'de %1 hacimsel oranı için hız konturları (a) Re=200, (b) Re=500 ve (c) Re=1000

Nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin hız konturu üzerindeki etkisi Şekil 5.25'de beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalın z=5mm'deki kesiti için verilmiştir. Hız konturları nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin voc=%0,5, %1 ve %4 değerlerinde Re=500 için çizilmiştir. Nanoakışkanlarda, nanoparçacıkların hacimsel oranının artması, nanoakışkanın yoğunluğunun ve nanoakışkanın viskozite değerinin artmasına neden olmaktadır. Fakat, nanoakışkanın yoğunluğundaki artış oranı viskozitesine göre daha fazla olduğundan dolayı nanoakışkanın

çeşitli hacimsel oranı için test kanalın kesitinde, hacimsel oranları arttıkça akışkanın hızının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.25. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalın z=5mm'deki hız konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4

5.2.2. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde CuO-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçları

Bu kısımda yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde CuO-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçları verilmiştir. Sayısal çalışma, ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının n=3-5 (bakınız Şekil 2.1), Reynolds sayısının Re=200-1500 ve nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin voc=%0-%4 aralığındaki değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

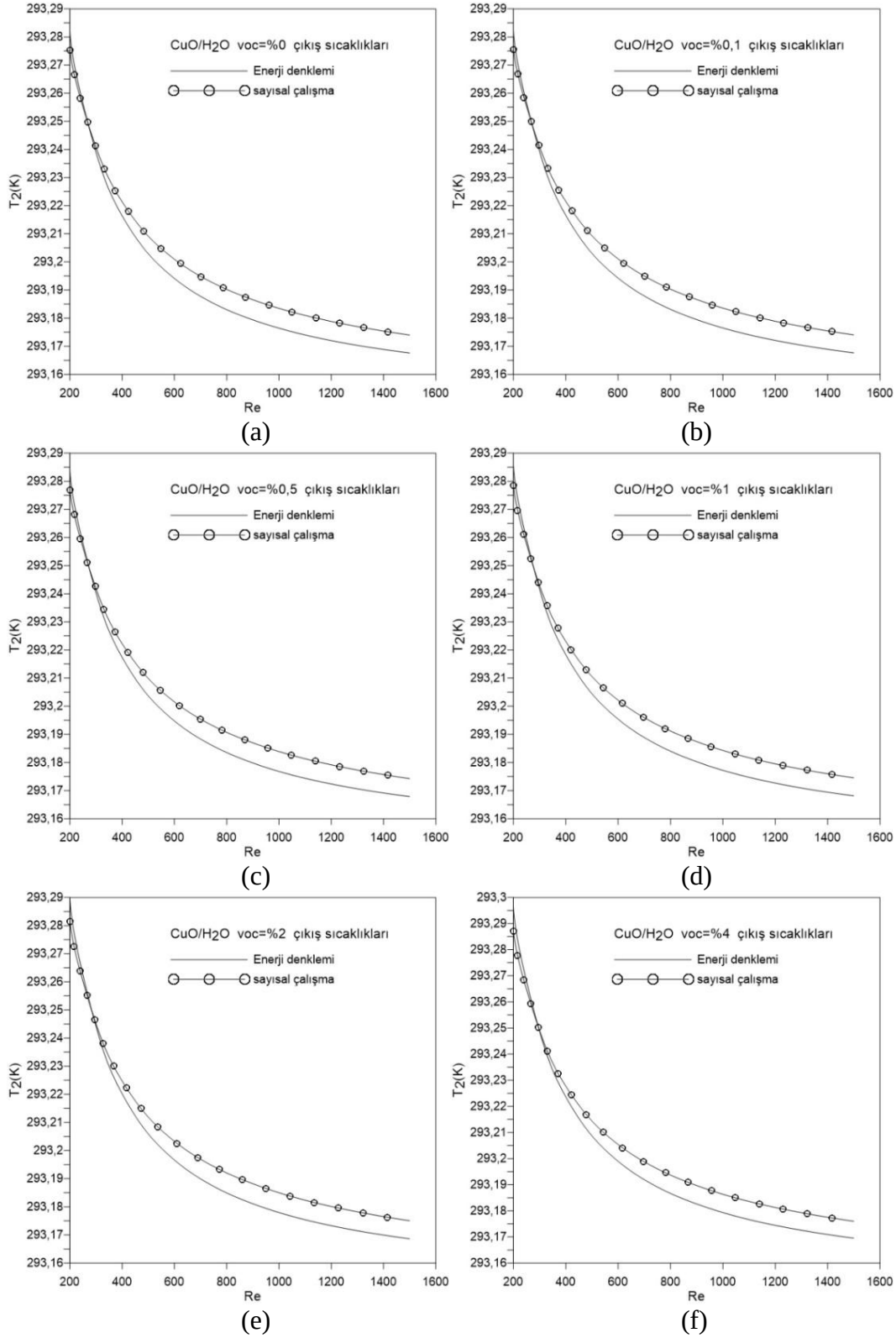
CuO-su nanoakışkanının %0, %0,01, %0,05, %1, %2 ve %4 hacimsel yüzde oranlarında ve Reynolds sayısının 200, 350, 500, 650, 1000, 1150, 1300, 1400 ve 1500 olması durumunda sayısal çalışma tekrarlanmıştır.

Yamuk kesitli üç, dört ve beş kanallı mikro ısı değiştiricisinde CuO-su nanoakışkanının Re=1000 ve hacimsel yüzde oranının %1 olması durumunda nanoakışkanın mikrokanala giriş hızı u (m/s), kanal hidrolik çapı D_h (m), mikrokanallardaki ısının aktarıldığı toplam yüzey alanları A_s (m^2), mikrokanalların giriş kesit alanlarının toplamı A_c (m^2) ve akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı T_2 (K) Çizelge 5.6'de verilmiştir. Görüldüğü üzere ısı değiştiricilerin her üçünün de giriş kesitlerinin toplam alanları A_c eşittir. Isı değiştiricisindeki mikrokanal sayısı arttıkça hidrolik çap azalmaktadır. Bu nedenle, aynı Reynolds sayısı için ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması, giriş hızının artmasına neden olmaktadır. Akışkanın giriş hızının artması ise akışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması akışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır.

Çizelge 5.6. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde mikrokanal sayısına göre Re=1000 ve %1 CuO-su nanoakışkanı için fiziksel ve ısıl özellikler

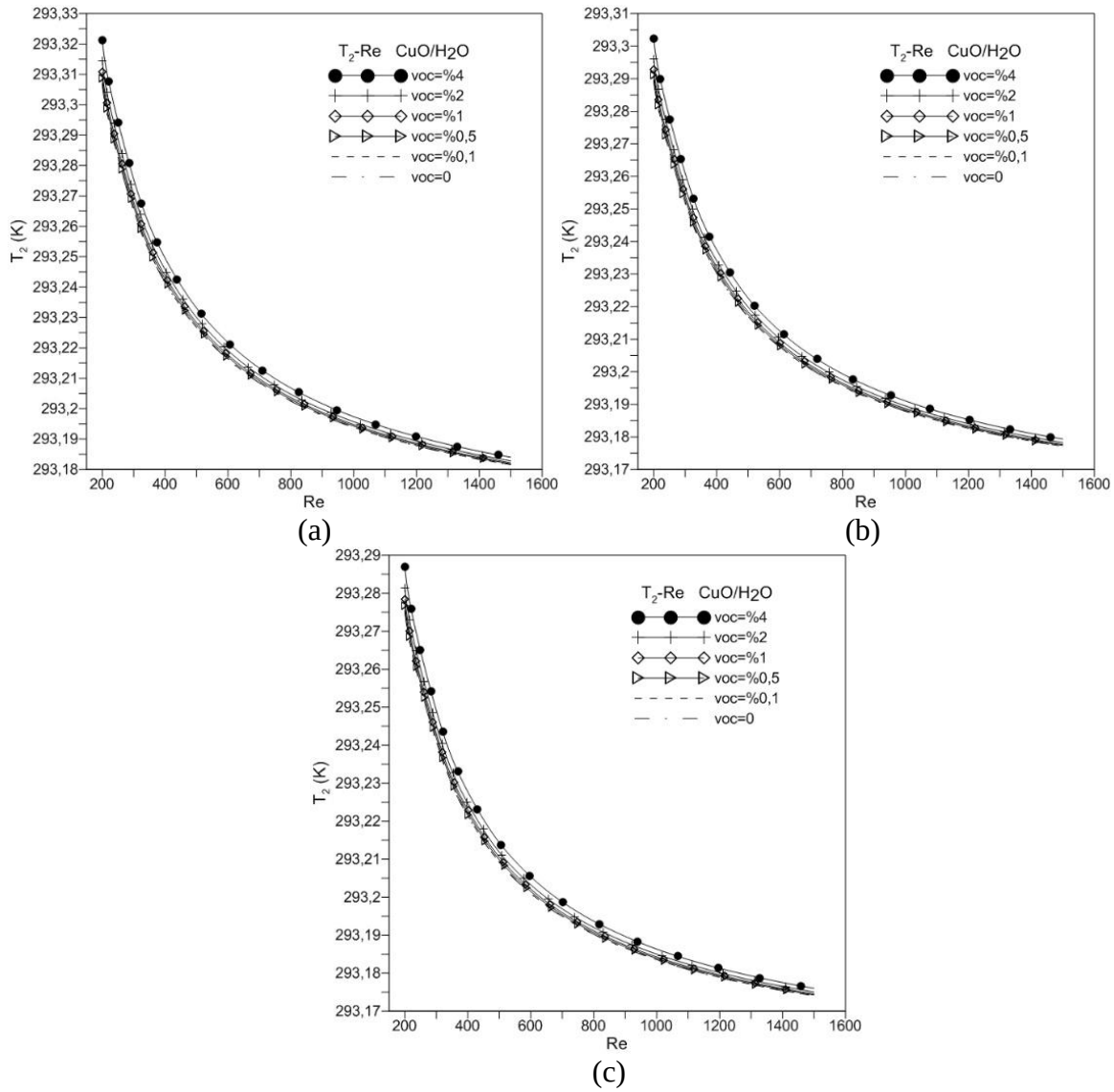
Kanal sayısı	Re	voc (%)	u (m/s)	D_h (μm)	A_s (mm^2)	A_c (μm^2)	T_2 (K)
n=3	1000	1	2,309	424	51,17	542	293,19
n=4	1000	1	2,695	363	59,74	542	293,19
n=5	1000	1	3,081	318	68,25	542	293,18

CuO-su nanoakışkanının beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklıkları Şekil 5.26'da Reynolds sayısının fonksiyonu olarak farklı hacimsel yüzde oranları (voc) için verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.26'da enerji denkleminden (Eş. 5.7) elde edilen akışkanın kanaldan çıkış sıcaklıkları da gösterilmiştir. Mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların enerji denkleminden çıkan sonuçlara yakın oldukları görülmüştür. Görüldüğü üzere artan Reynolds sayısı ile akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır. Enerji denkleminden elde edilen akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının mevcut sayısal çalışma sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Benzer sonuç ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda da gözlenmiştir (Bakınız Ek Şekil 25 ve Ek Şekil 26).



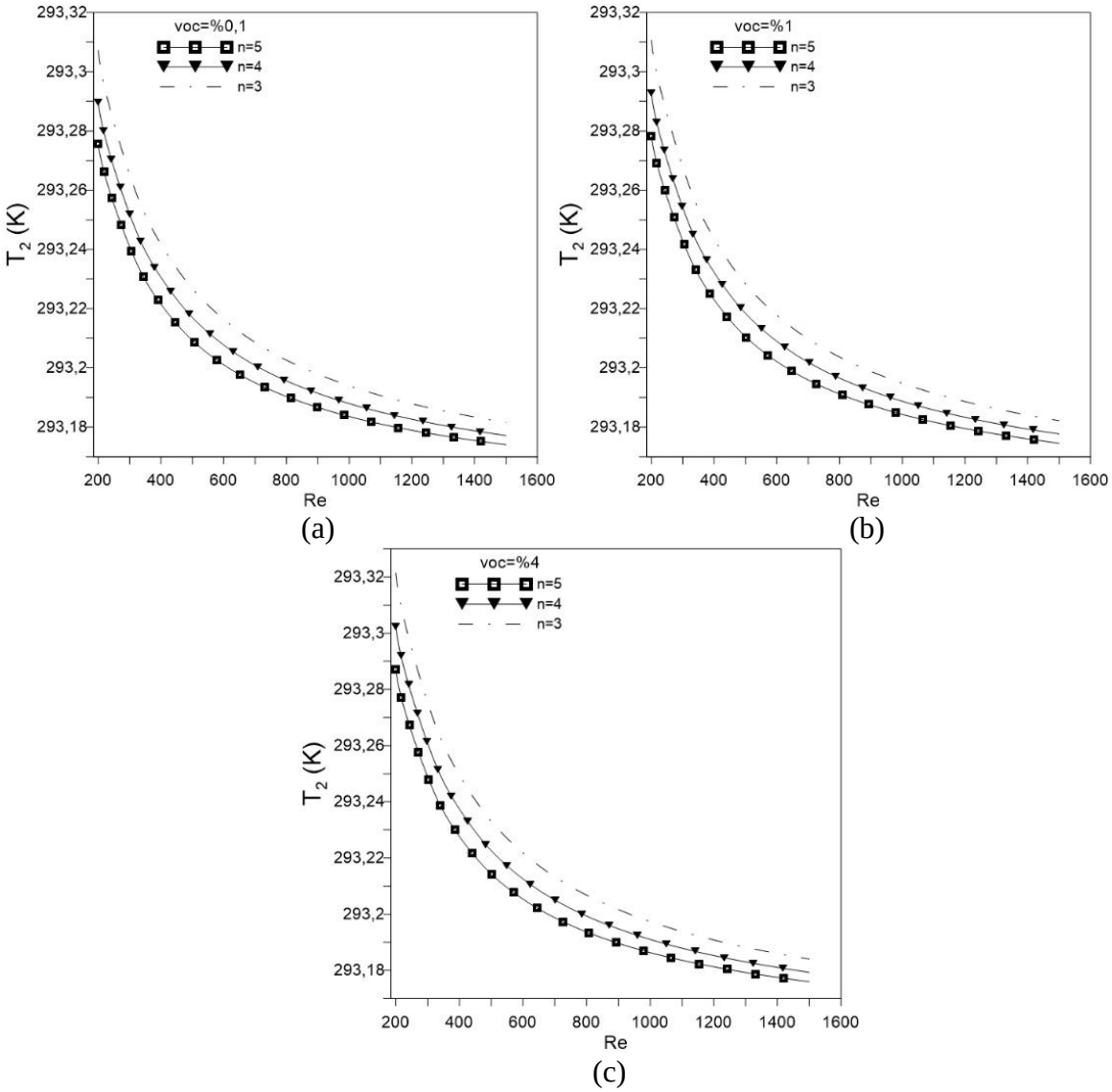
Şekil 5.26. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4

Şekil 5.27'de CuO-su nanoakışkanının hacimsel yüzde oranının akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olması durumları için verilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısında CuO-su nanoakışkanının artan hacimsel yüzde oranı ile nanoakışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile söylenirse, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi yok denilebilir düzeydedir. Bu ise mikrokanal uzunluğunun küçük olmasından dolayı akışkanın kanal boyunca yeterince ısınamadan mikrokanaldan çıkması şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 5.27. CuO-su nanoakışkanı için farklı hacimsel yüzde oranlarında nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5

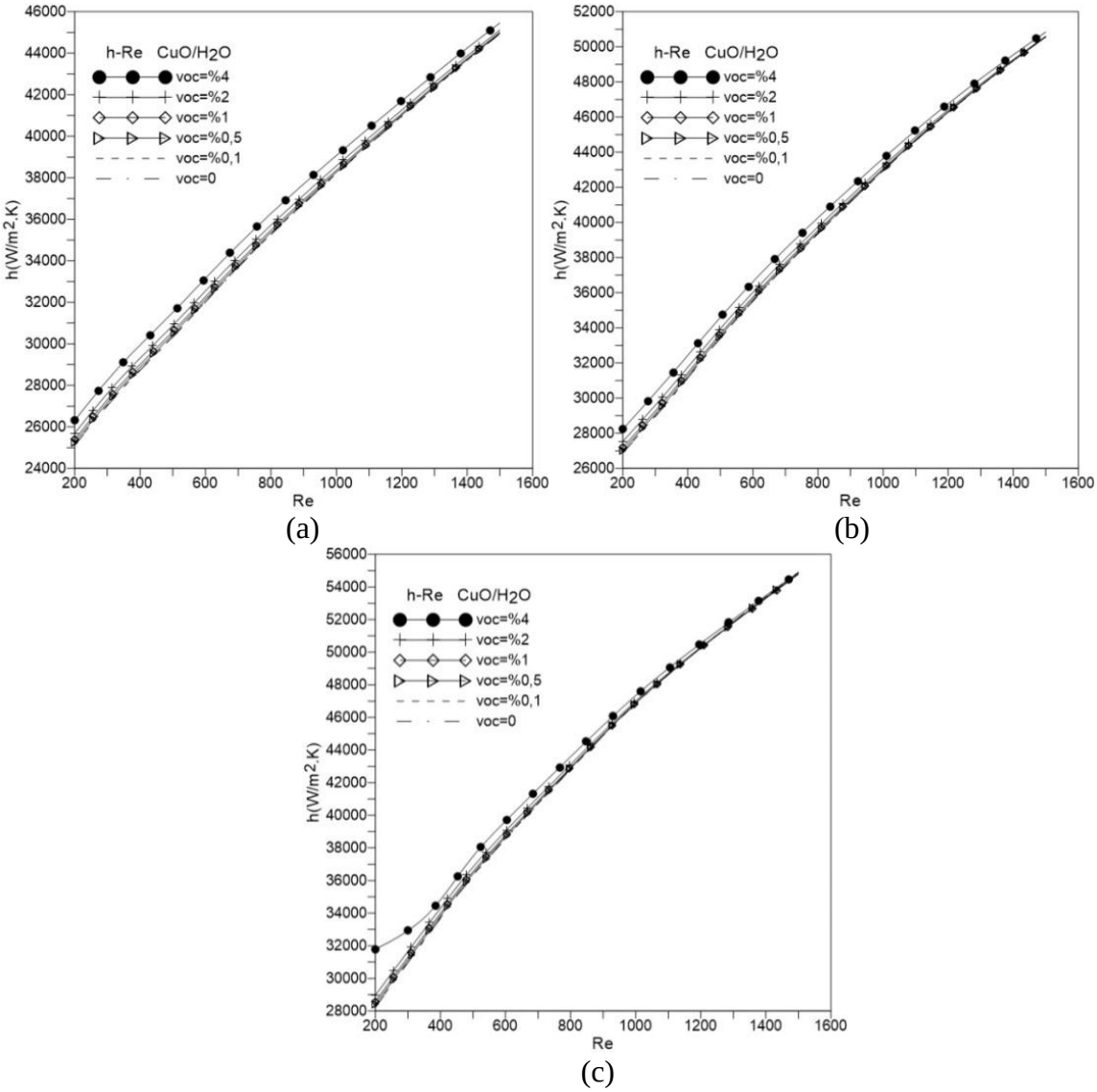
Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın yamuk kesitli mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisini görmek için, nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.28'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için (voc=%0,1, %1 ve %4) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için kanal sayısı artınca nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır. Aynı sonuç Çizelge 5.6'da Re=1000, voc=%1 ve n=5 için görülmüştür.



Şekil 5.28. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi

CuO-su nanoakışkanı için nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görebilmek için kanaldaki ortalama ısı transfer katsayısı h Reynolds

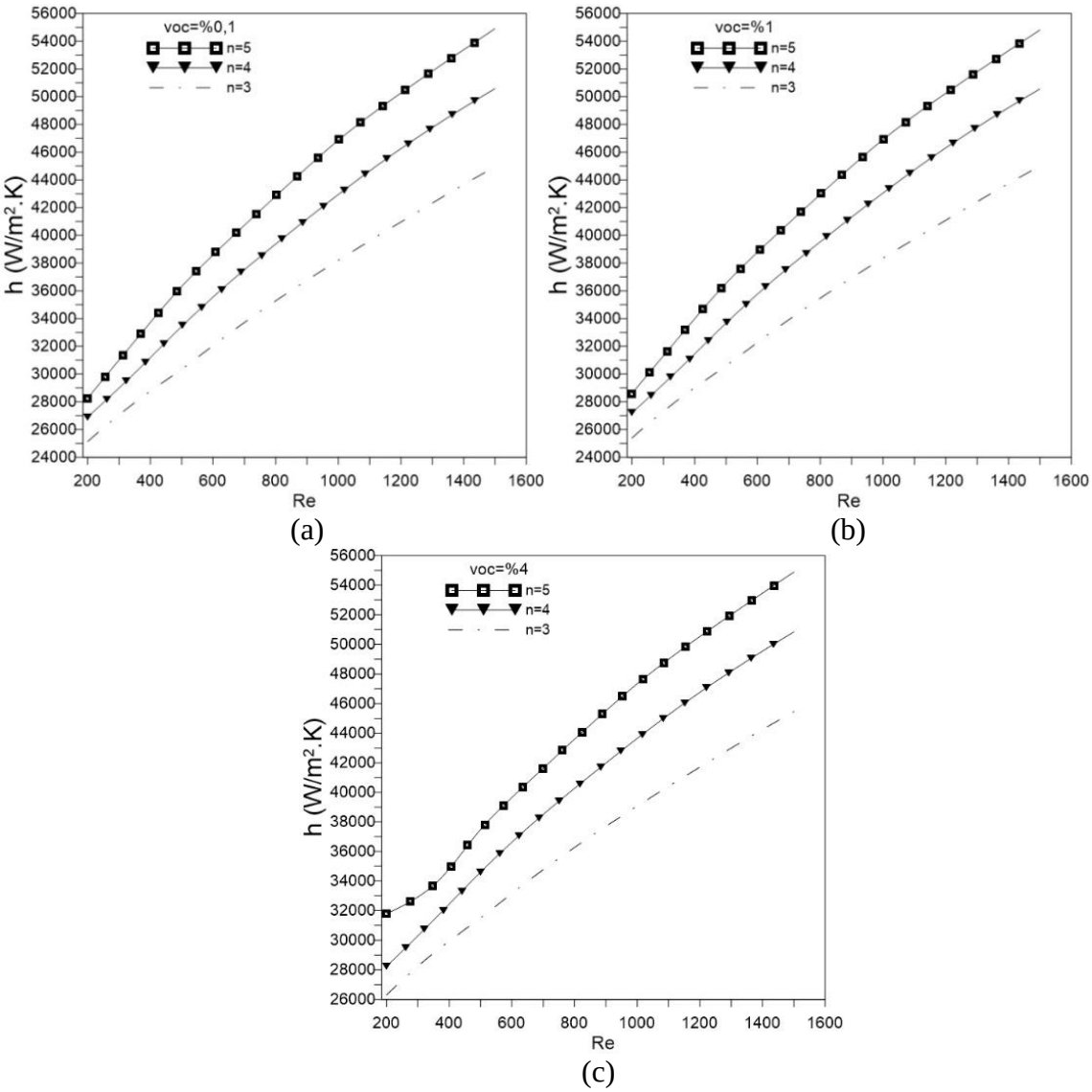
sayısının Re fonksiyonu olarak Şekil 5.29'da nanoakışkanın farklı hacimsel yüzde oranları için ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olması durumları için verilmiştir. Sabit Reynolds sayısı için nanoakışkanların hacimsel yüzde oranlarının artması ile mikrokanaldaki ısı transfer katsayısının arttığı görülmüştür. Ayrıca, Şekil 5.29'da görüldüğü üzere artan Reynolds sayısı ile ortalama ısı transferi katsayısı artmaktadır. Khanafer, Vafai, ve Lightstone (2003)'de yaptıkları çalışma sonucunda benzer sonuçlar bulmuşlardır.



Şekil 5.29. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın ısı transfer katsayısı Reynolds

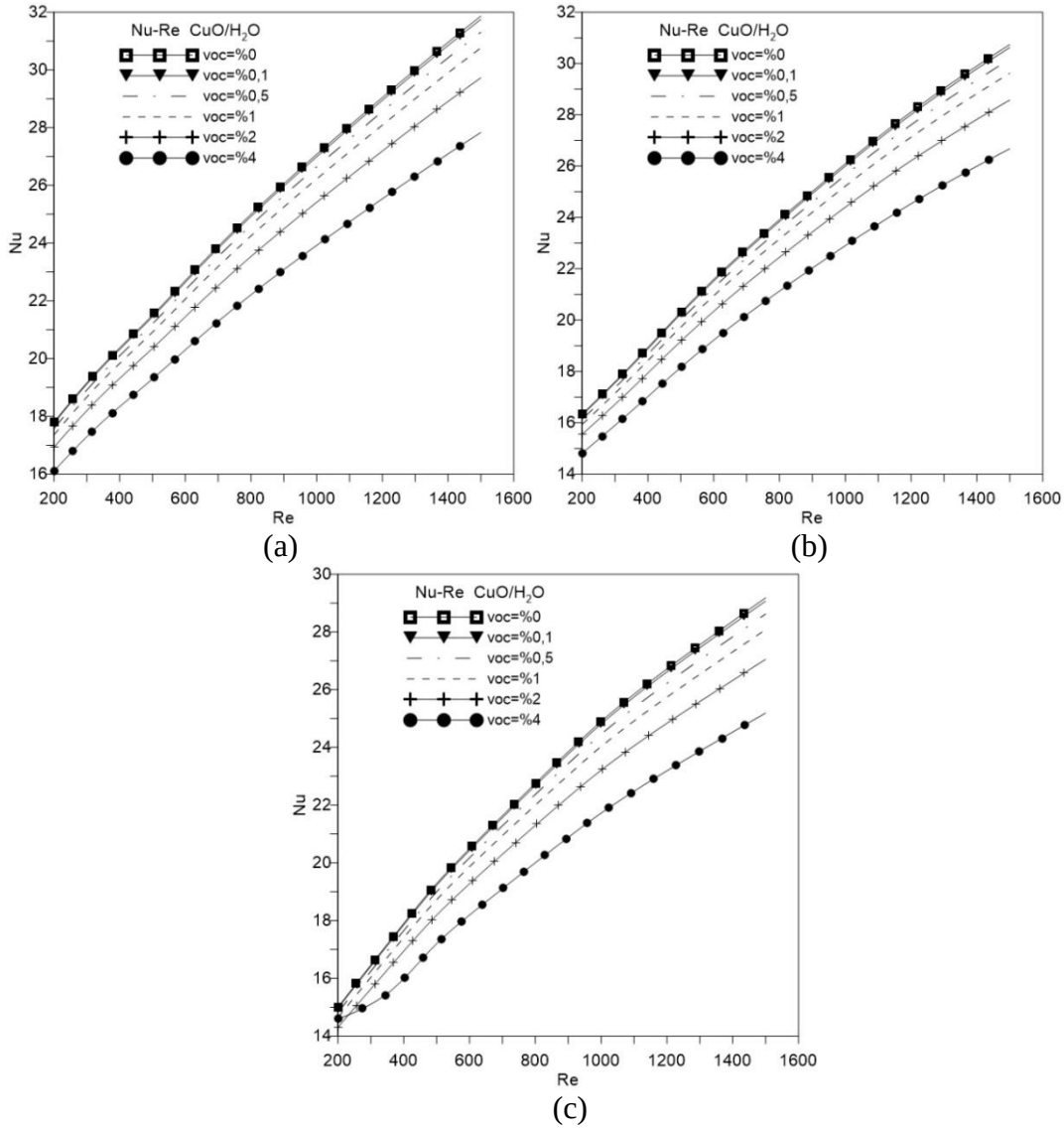
sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.30'da mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısında kanal sayısının artması ile ortalama ısı transfer katsayısında artış meydana gelmiştir.



Şekil 5.30. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranlarında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Şekil 5.31'de ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç, dört ve beş olması durumunda CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranları için ortalama Nusselt sayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, Reynolds sayının artması ile Nusselt sayısı artmaktadır. Ayrıca, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının (voc) artışı ile ortalama Nusselt sayısının azaldığı görülmektedir. Bu durum

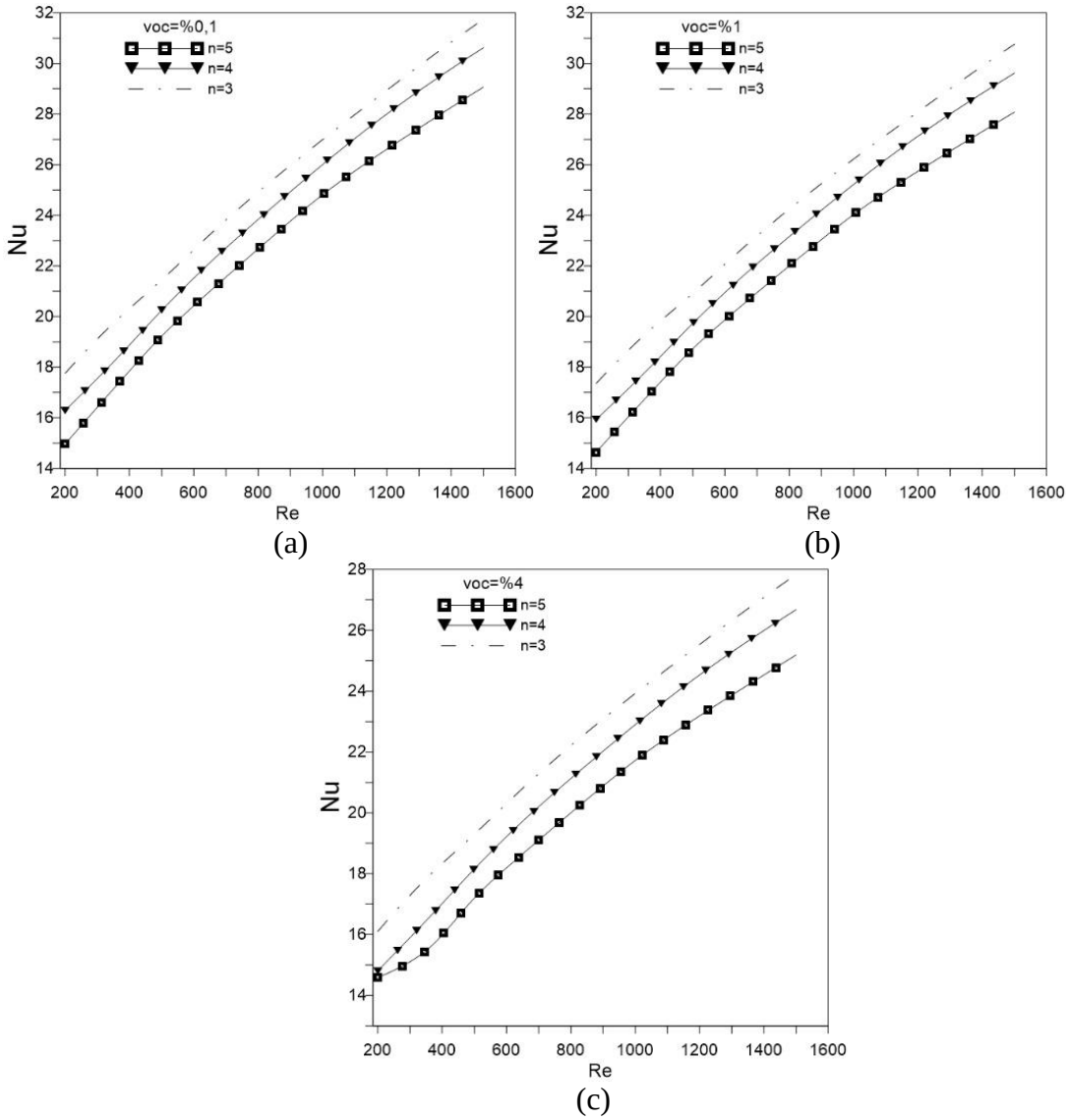
şu şekilde açıklanabilir; Nusselt sayısı (Nu), akışkanın ısı transferi katsayısına (h) ve ısıl iletkenlik katsayısına (k) bağlıdır. Nanoakışkanların hacimsel yüzde oranları arttığı zaman nanoakışkanın ısıl iletkenlik katsayısı ve ısı transfer katsayısı artmaktadır. Fakat, ısıl iletkenlikteki artış miktarı, ısı transfer katsayısındaki artış miktarından fazla olduğundan dolayı, nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artışı ile ortalama Nusselt sayısında azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5.31. CuO-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel yüzde oranlarında (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 mikrokanallı ısı değiştiricisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

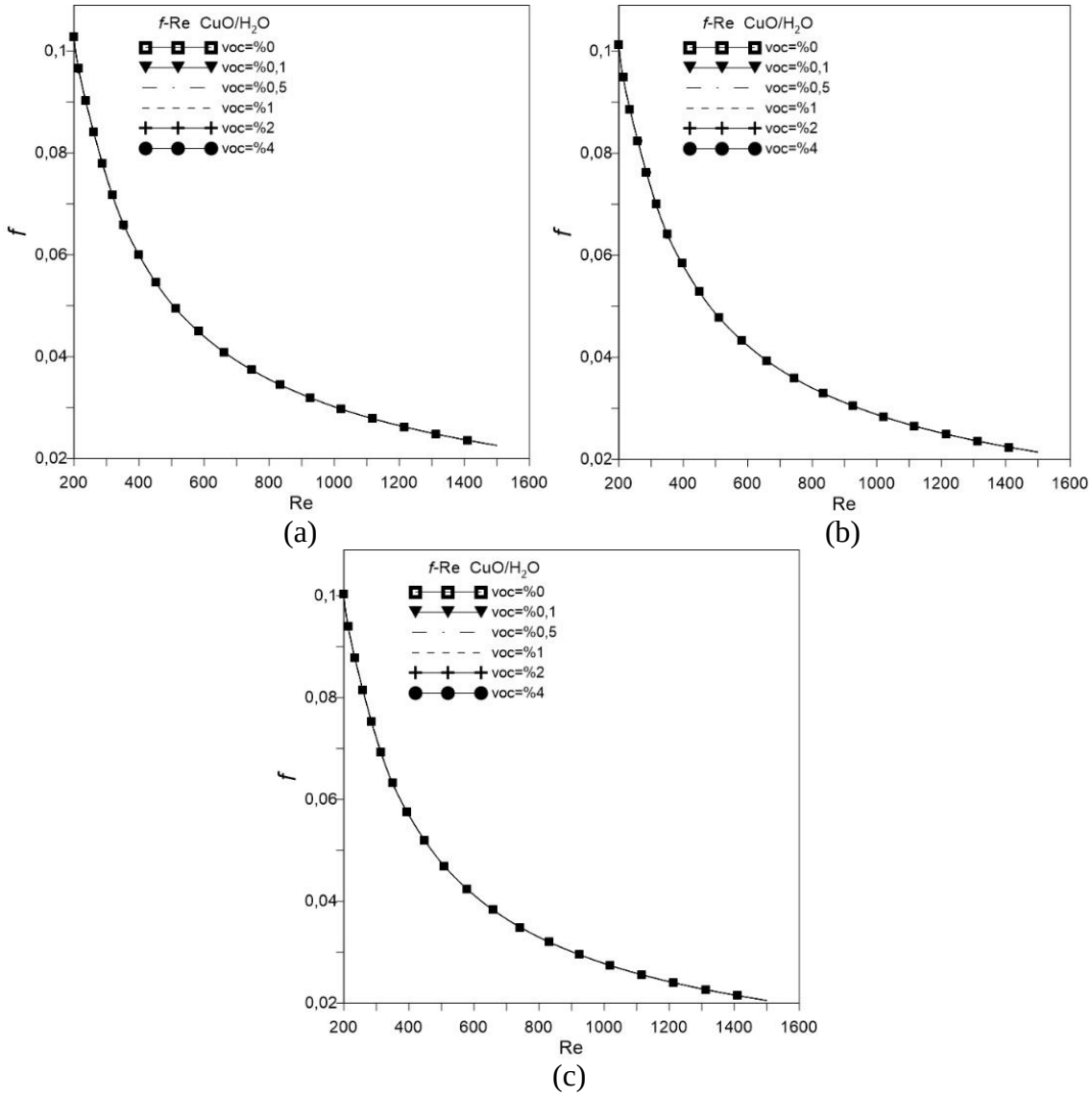
Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın Nusselt sayısı üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın Nusselt sayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.32'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç

farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması ile Nusselt sayısı azalmıştır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; Nusselt sayısı (Nu), akışkanın ısı transferi katsayısına (h) ve mikrokanalların hidrolik çaplarına (D_h) bağlıdır. Çizelge 5.6'da görüldüğü gibi ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısı azaldığı zaman hidrolik çap artmıştır. Ayrıca kanal sayısı azaldığı zaman nanoakışkanın ısı transfer katsayısı azalmıştır. Fakat, hidrolik çaptaki yükselme oranı, ısı transfer katsayısındaki azalma oranına göre daha yüksektir. Bu nedenle ısı değiştiricisinde sabit Reynolds sayısında kanal sayısının artışı ile ortalama Nusselt sayısında azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5.32. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranlarında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi

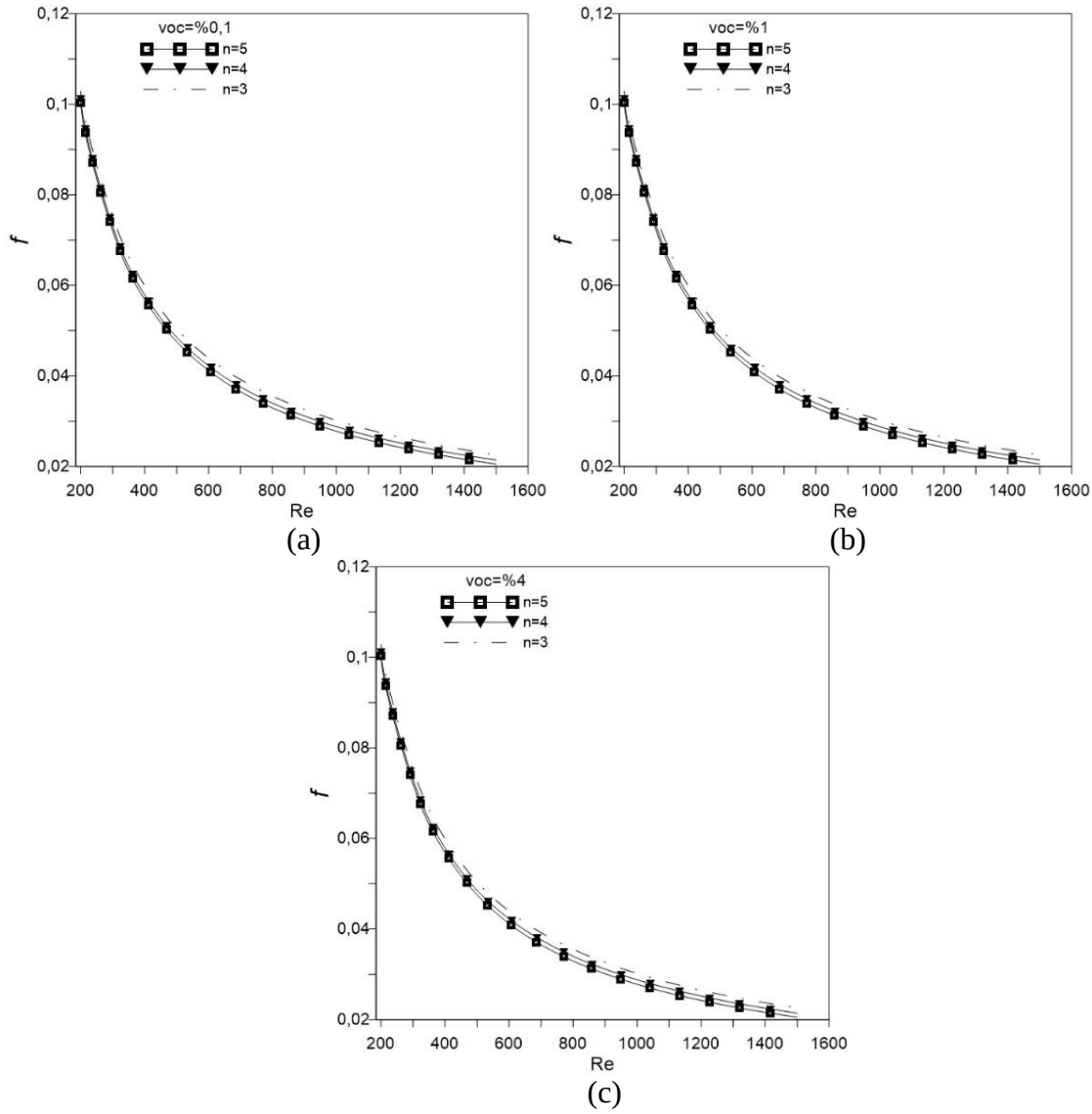
CuO-su nanoakışkanının çeşitli hacimsel yüzde oranlarındaki ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi üç, dört ve beş kanallı ısı değiştiricisi için Şekil 5.33'de verilmiştir. Şekil 5.33'den görüldüğü gibi, Reynolds sayısı arttıkça ortalama Fanning sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir. Nanoakışkanın hacimsel yüzde miktarının sürtünme faktöründe bir değişme meydana getirmediği görülmüştür.



Şekil 5.33. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde (a) n=3, (b) n=4 ve (c) n=5 için CuO-su nanoakışkanın çeşitli hacimsel oranlarında ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.34'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1

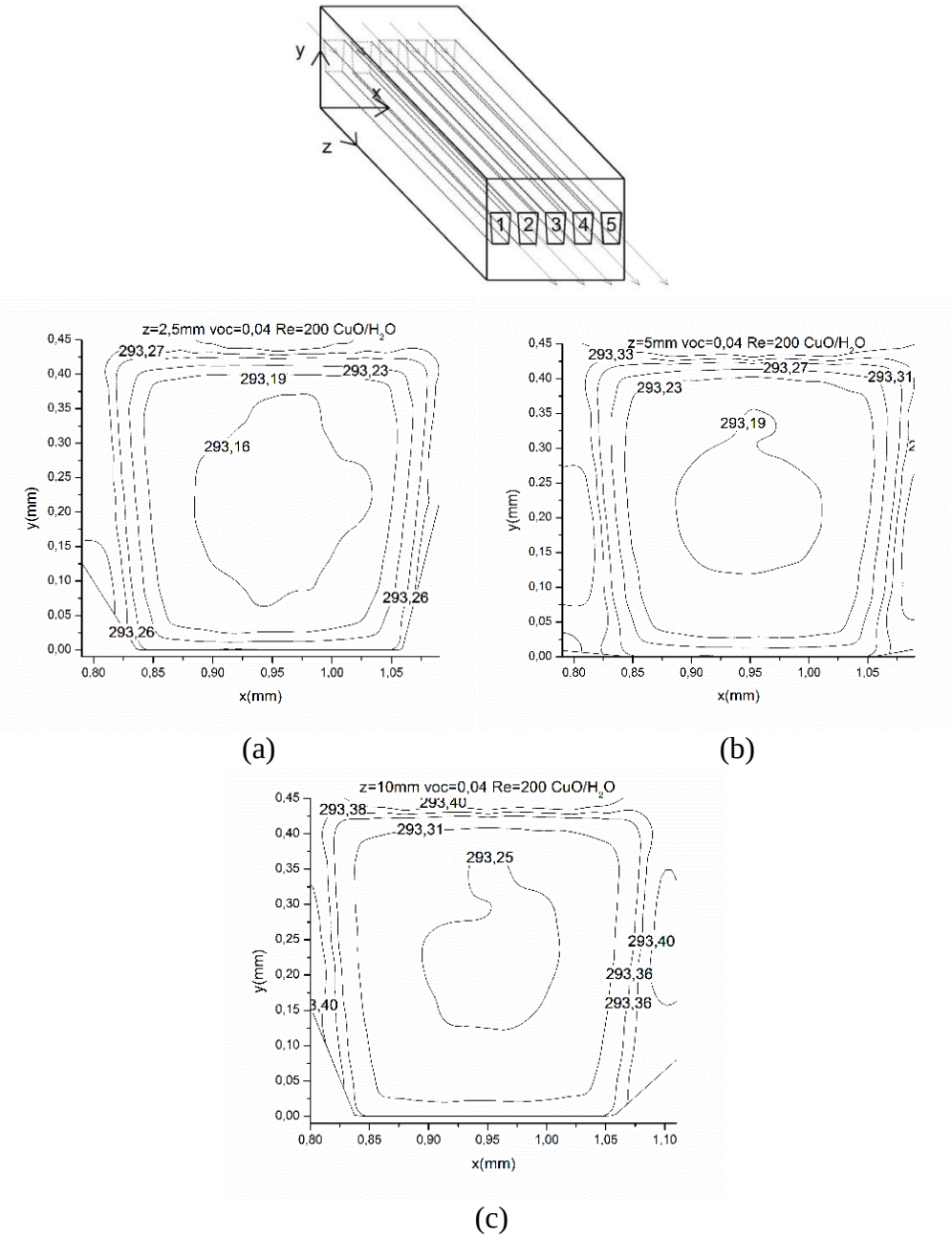
ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için kanal sayısı artınca ortalama Fanning sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir.



Şekil 5.34. CuO-su nanoakışkanı için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisi

Sıcaklık konturları ısı değiştiricisindeki mikrokanal içerisinde akış yönünde (z-yönü) z=2,5mm, z=5mm ve z=10mm'deki kesitlerdeki görünümü Re=200 ve nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının voc=%4 olması durumunda Şekil 5.35'de beş mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanal için gösterilmiştir. Şekil 5.35'de görüldüğü üzere, yamuk kesitli mikrokanalda akış yönünde ilerledikçe akışkanın ısındığı ve kanal merkezine doğru akışkan sıcaklığında artış meydana geldiği görülmektedir. Diğer bir ifade ile

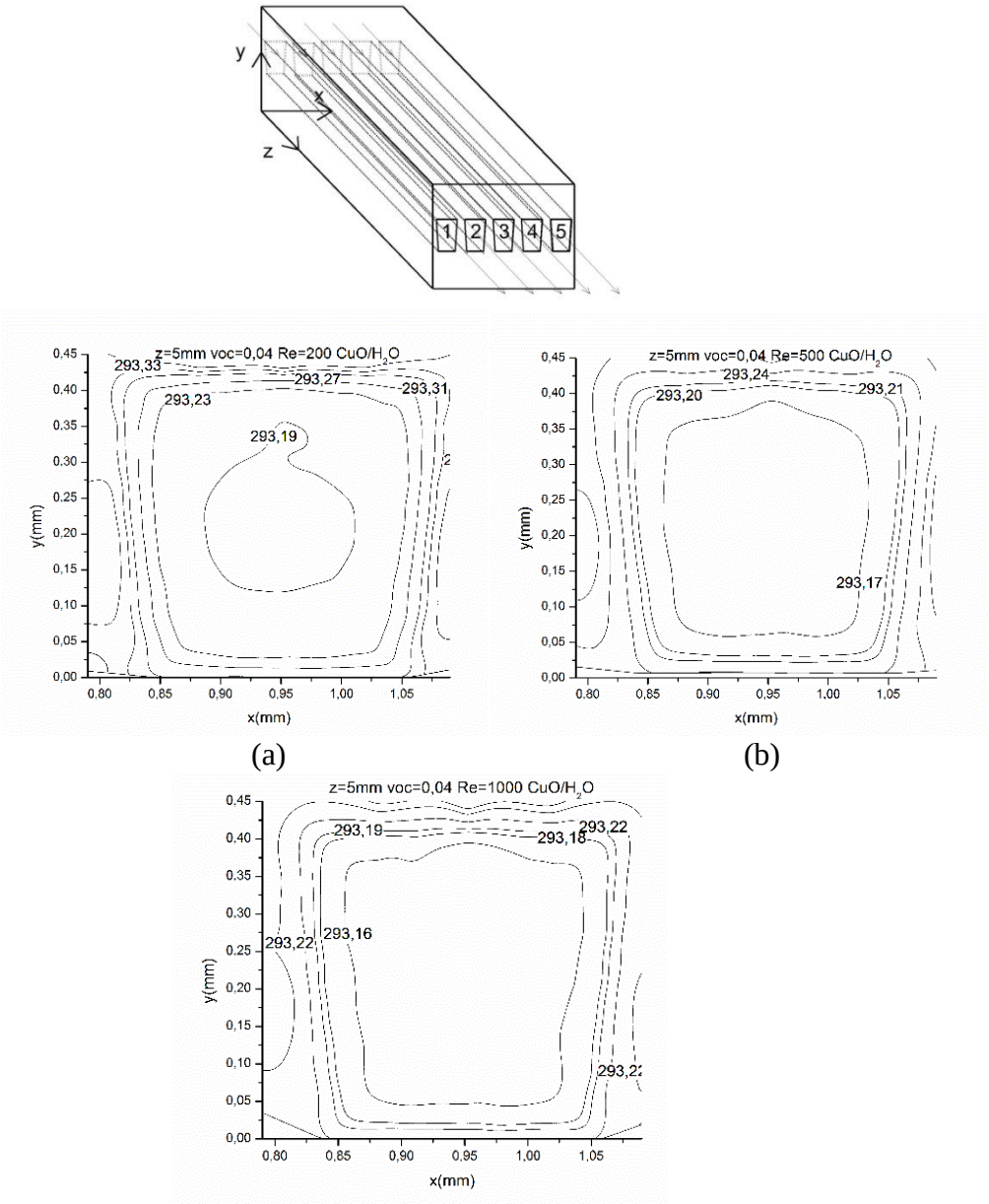
söylemek gerekirse, kanal girişinden itibaren akış yönünde ilerledikçe ısıl sınır tabaka kalınlığı artmaktadır.



Şekil 5.35. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda Re=200 ve %4 hacimsel oranı için (a) z=2,5mm, (b) z=5mm ve (c) z=10mm'deki sıcaklık konturları

Reynolds sayısının sıcaklık konturu üzerindeki etkisini görmek için beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalın z=5mm'deki kesitindeki sıcaklık konturu Reynolds sayısının 200, 500 ve 1000 değerleri için nanoakışkanın voc=%4 hacimsel yüzde oranı için Şekil 5.36'da gösterilmiştir. Şekil 5.36'da görüldüğü üzere artan

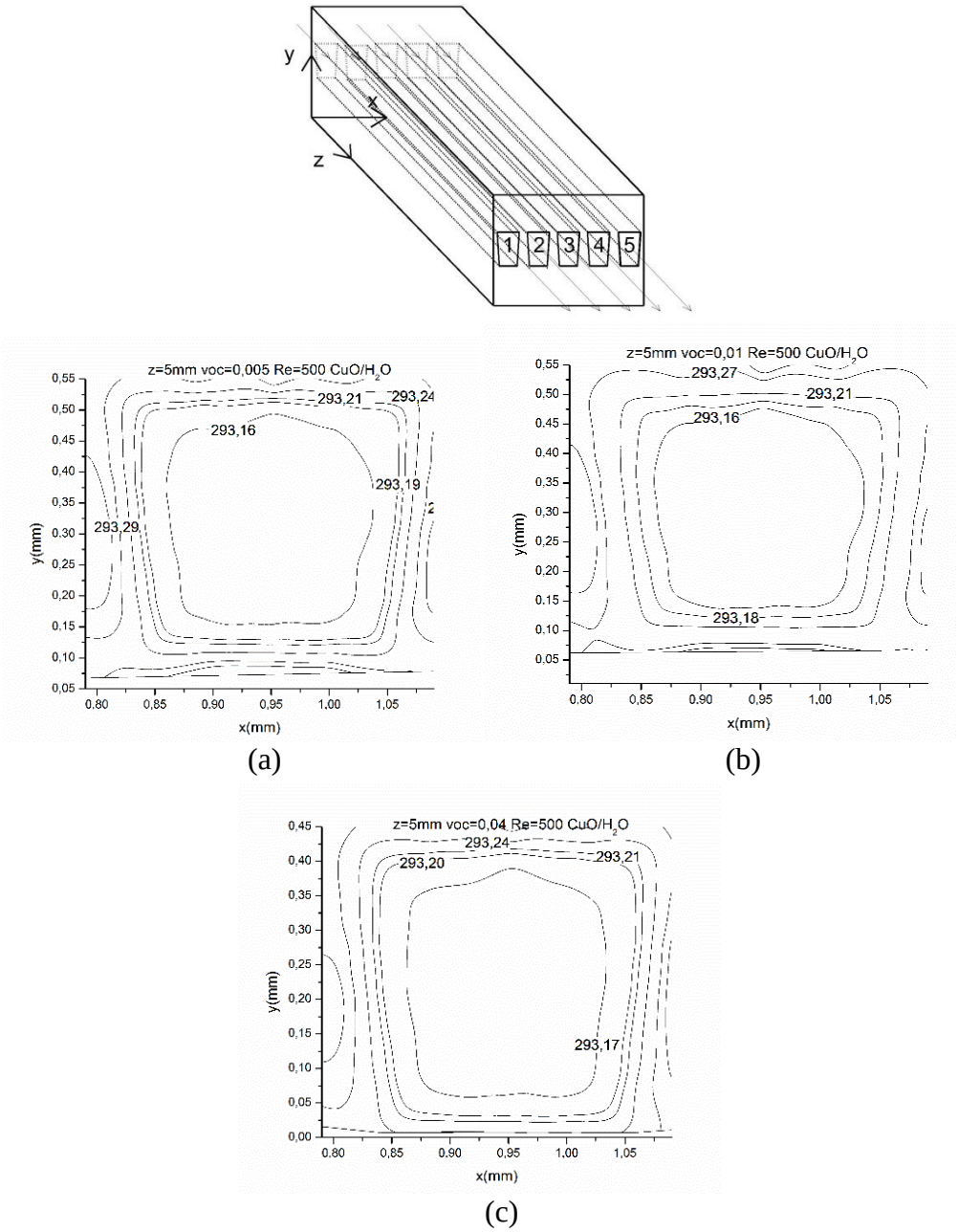
Reynolds sayısı ile birlikte aynı kesitte sıcaklık sınır tabakası kalınlığının azaldığı görülmektedir. Sıcaklık sınır tabakasının azalması ise ısı transferinin artması ile sonuçlanmaktadır. Reynolds sayısının artması ile aynı kesitte akışkan sıcaklığının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.36. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) Re=200, (b) Re=500 ve (c) Re=1000

Nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının sıcaklık konturu üzerindeki etkisi Şekil 5.37'de beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu kanalın z=5mm'deki kesitinde hacimsel yüzde oranının voc=%0,5, %1 ve %4 değerlerinde Re=500 için çizilmiştir. Şekilde

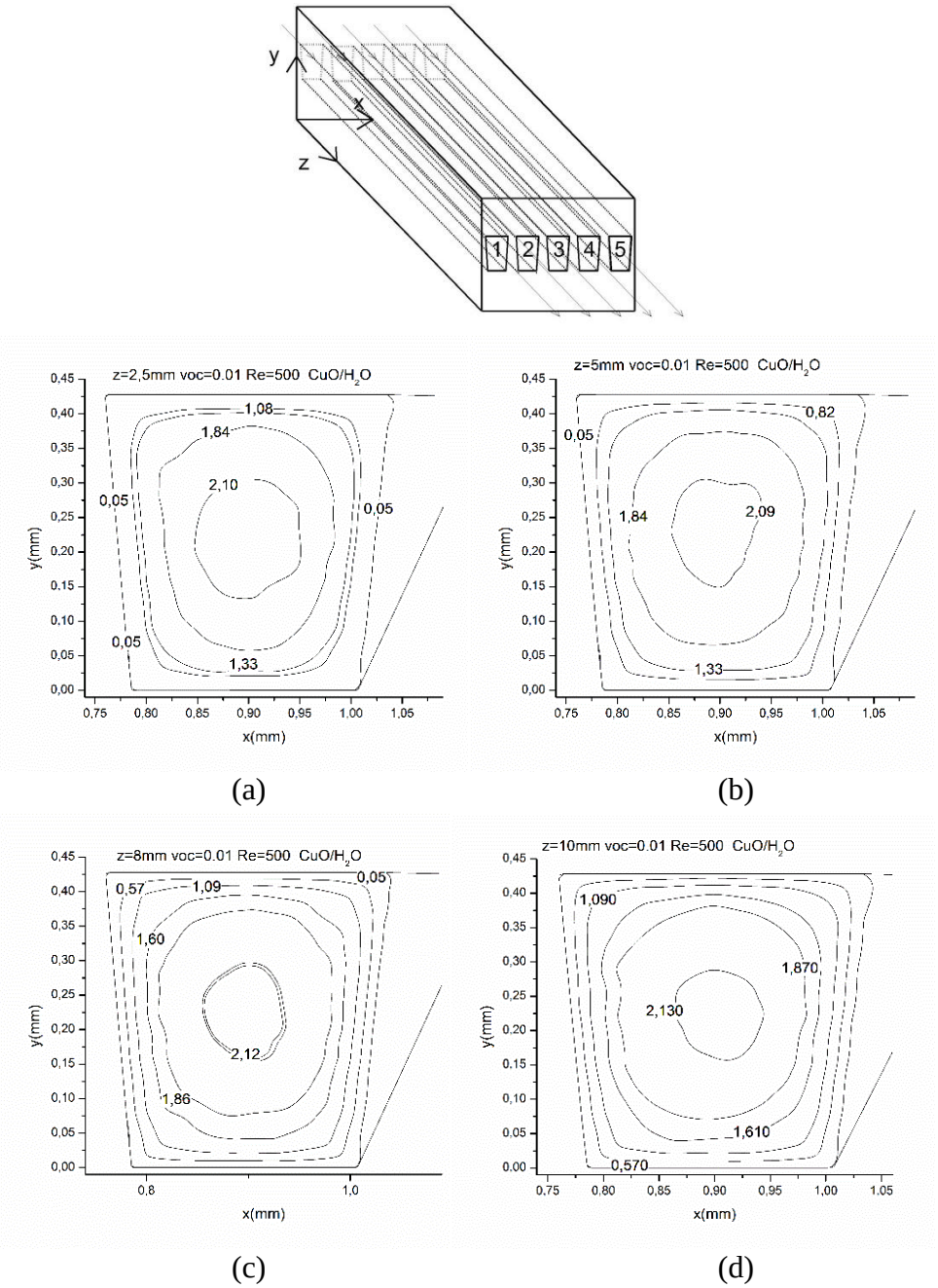
görüldüğü gibi nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artması nanoakışkanın sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır.



Şekil 5.37. Beş adet mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalda z=5mm'deki sıcaklık konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4

Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanal için z=2,5mm, z=5mm, z=8mm ve z=10mm kesitlerindeki hız konturları Re=500 ve nanoakışkanın hacimsel oranının voc=%1 değeri için Şekil 5.38'de verilmiştir. Görüldüğü üzere kanal girişinden itibaren kanal çıkışına doğru akış yönünde ilerledikçe

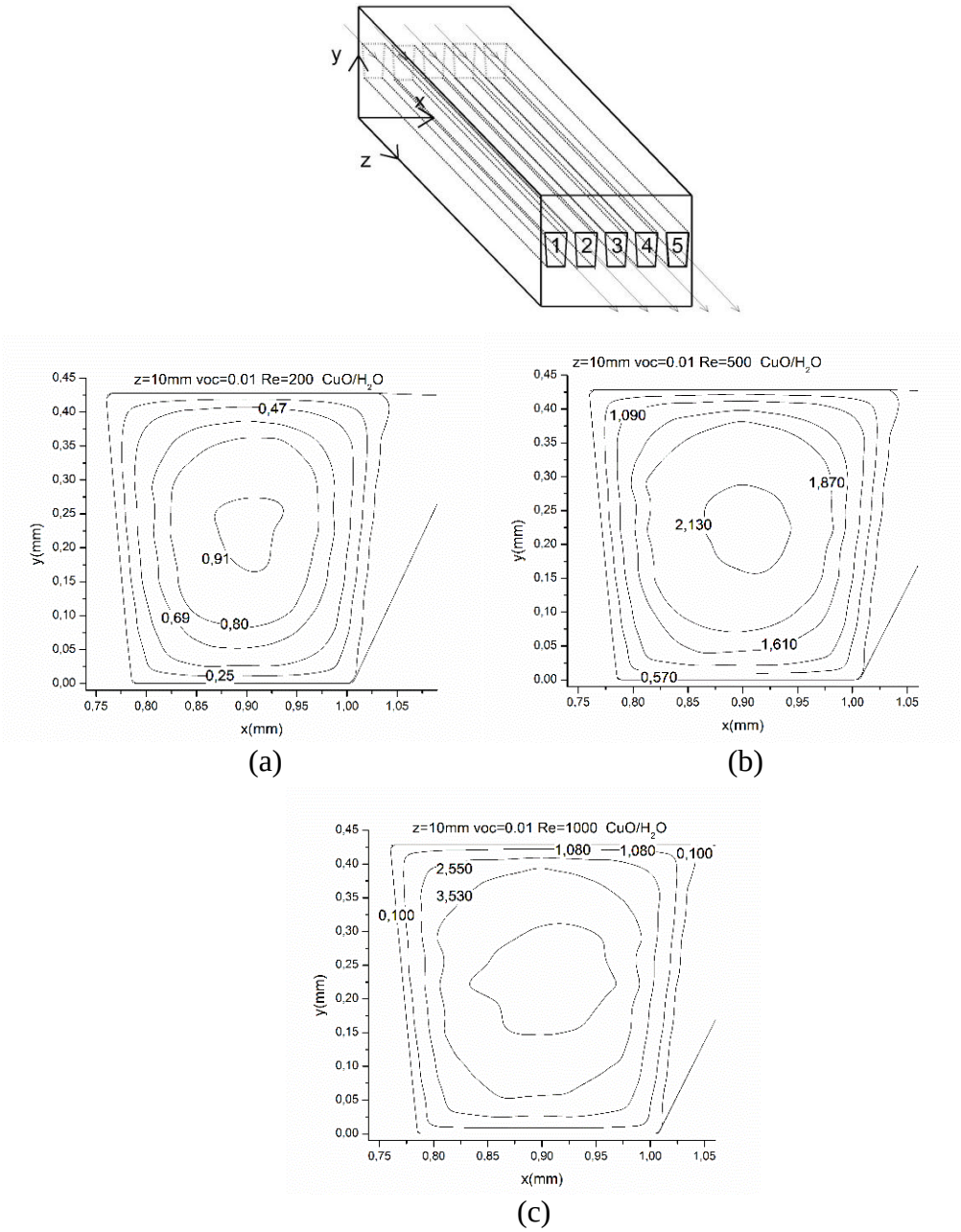
kesitteki hız konturları değişmektedir. Bunun sebebi ise hız sınır tabakasının gelişmeye devam etmesidir.



Şekil 5.38. Beş adet yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalda Re=500 ve %1 hacimsel oranı için kanal girişinden itibaren (a) 2,5mm, (b) 5mm, (c) 8mm ve (d) 10mm'deki hız konturları

Akış hızının hız konturları üzerindeki etkisi Şekil 5.39'da gösterilmiştir. Şekil 5.39'da z=10mm (çıkış kesiti)'deki hız konturları beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanal için voc=%1 hacimsel oranında

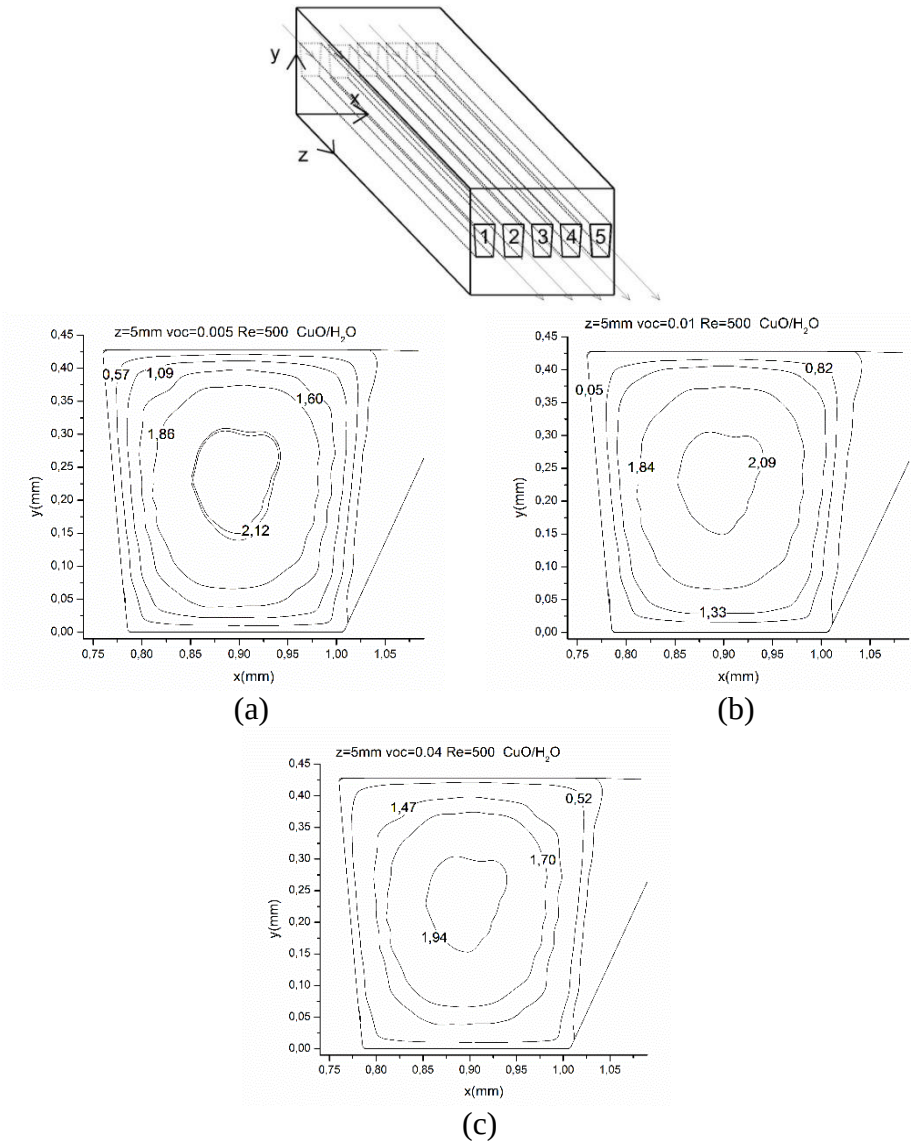
Re=200, Re=500 ve Re=1000 için verilmiştir. Görüldüğü üzere Reynolds sayısı değiştikçe çıkış kesitindeki hız konturları farklılık göstermektedir.



Şekil 5.39. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalda z=10mm'de %1 hacimsel oranı için sıcaklık konturları (a) Re=200 (b) Re=500 ve (c) Re=1000

Nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin hız konturu üzerindeki etkisi Şekil 5.40'da beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu yamuk kesitli mikrokanalın z=5mm'deki kesiti için verilmiştir. Hız konturları nanoakışkanın hacimsel yüzdesinin voc=%0,5, %1 ve %4 değerlerinde Re=500 için çizilmiştir. Nanoakışkanlarda,

nanoparçacıkların hacimsel oranının artması, nanoakışkanın yoğunluğunun ve nanoakışkanın viskozite değerinin artışına neden olmaktadır. Fakat, nanoakışkanın yoğunluğundaki artış oranı viskozitesine göre fazla olduğundan dolayı nanoakışkanın çeşitli hacimsel oranları için test kanalı kesitinde, hacimsel oranları arttıkça akışkanın hızının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.40. Beş adet yamuk kesitli mikrokanaldan oluşan ısı değiştiricisindeki üç nolu mikrokanalın z=5mm'deki hız konturları (a) voc=%0,5, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4

5.2.3. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al2O3-su ve CuO-su nanoakışkanı için elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının kıyaslanması

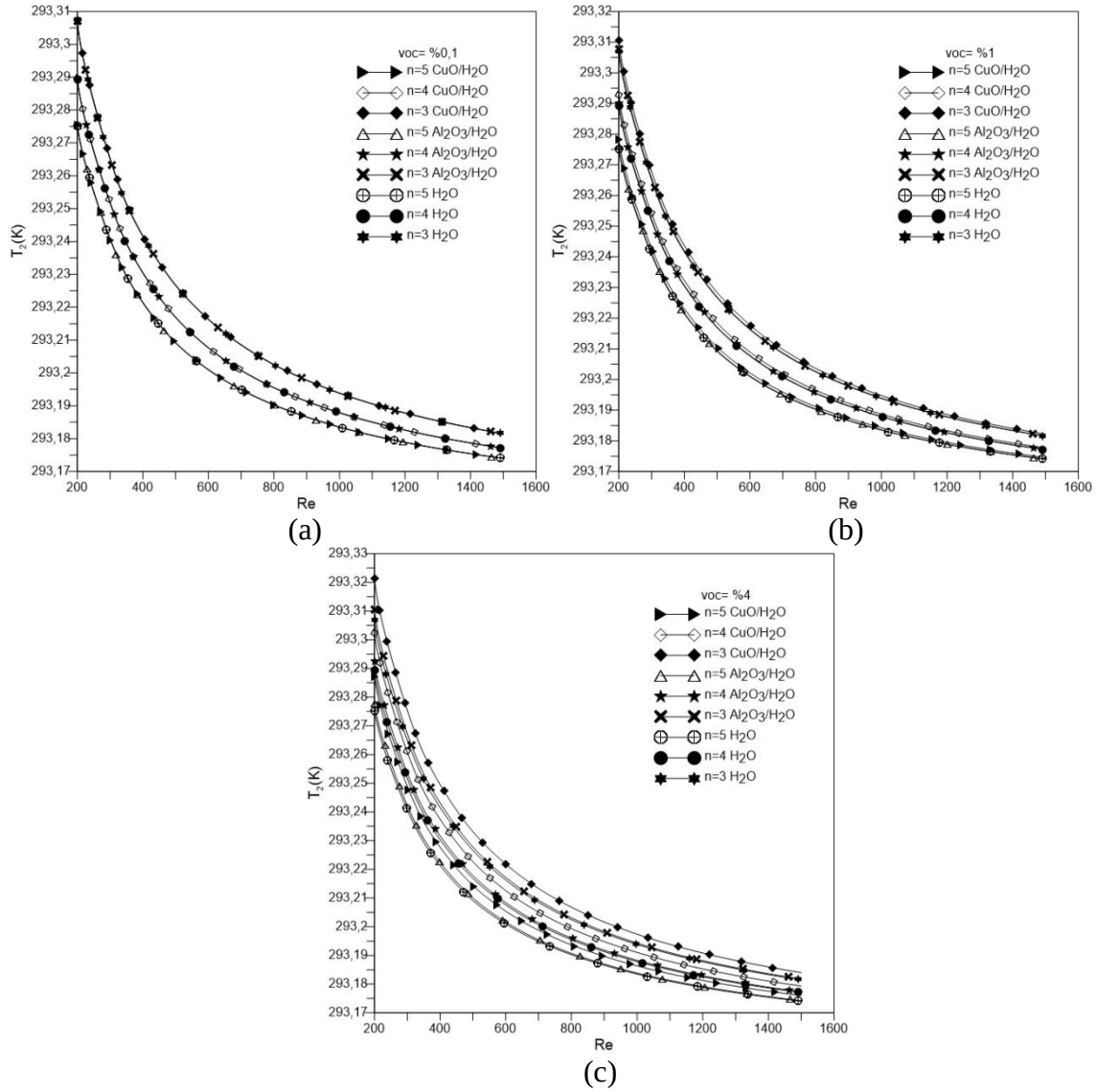
Bu kısımda yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için elde edilen sayısal çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışma, ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının n=3-5, Reynolds sayısının Re=200-1500 ve nanoakışkanların hacimsel yüzdesinin voc=%0-%4 aralığındaki değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Üç, dört ve beş adet yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisindeki mikrokanallar Şekil 5.4'de sıra ile numaralandırıldığı gibidir. Şekil 5.4'de görüldüğü gibi üç, dört ve beş adet mikrokanal soldan sağa doğru artan numara ile numaralandırılmıştır.

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının ve nanoakışkanın tipinin yamuk kesitli mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.41'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 ve nanoakışkanların CuO-su, Al_2O_3-su olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için (voc=%0,1, %1 ve %4) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için kanal sayısı artınca nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır. Ayrıca düşük hacimsel yüzde oranlarında (örn: voc=%0,1) nanoakışkanların kanaldan çıkış sıcaklıkları ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısına bağlı olmadığı ve hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Hacimsel yüzde oranı arttıkça CuO-su nanoakışkanın çıkış sıcaklığının Al_2O_3-su nanoakışkanına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere voc=%0,1 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının çıkış sıcaklığı suya göre sırasıyle %3,17E-05, %2,66 E-05 ve %2,27 E-05, voc=%1 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının çıkış sıcaklığı suya göre sırasıyle %3,15E-04, %2,64 E-04 ve %2,25 E-04 ve voc=%4 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının çıkış sıcaklığı suya göre sırasıyle %1,23E-03, %1,03 E-03 ve %8,8 E-04 artış meydana gelmiştir. Aynı şekilde voc=%0,1 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının çıkış sıcaklığı suya göre sırasıyle %1,34E-05, %1,21E-05 ve %1,1E-05, voc=%1 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının çıkış sıcaklığı suya göre sırasıyle %1,31E-03, %1,18E-03 ve %1,11E-03, voc=%0,4 ve Re=200

olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının çıkış sıcaklığı suya göre sırasıyle %4,95E-03, %4,44E-03 ve %2,51E-03 artış görülmektedir.

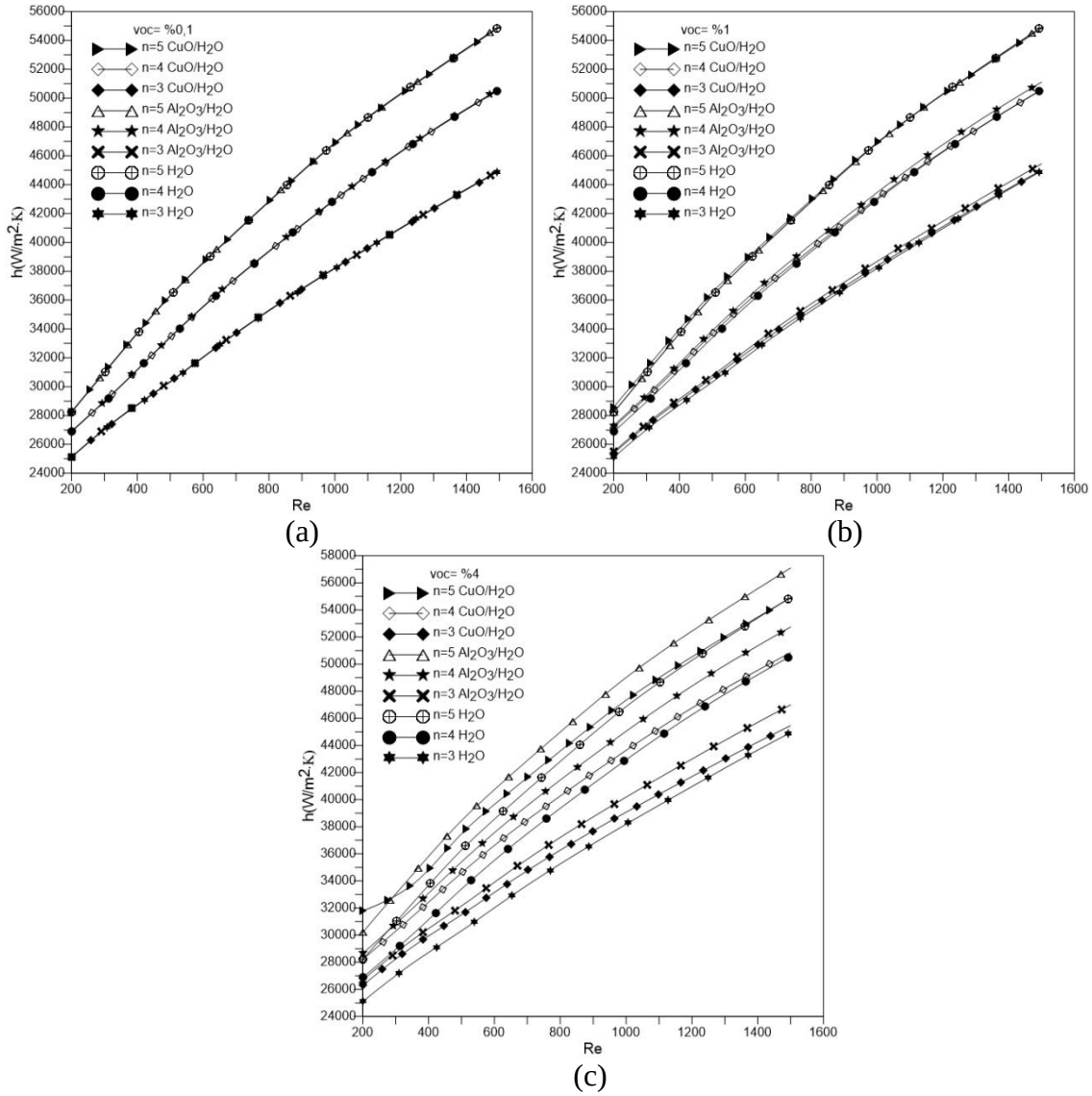
Çıkış sıcaklığının Şekil 5.41'de görüldüğü üzere artan Reynolds sayısıyla nanoakışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır.



Şekil 5.41. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının ve nanoakışkan türünün nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi

Isı değiştiricisindeki nanoakışkanın türünün ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görmek için Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için ısı transfer katsayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.42'de mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranında voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sabit Reynolds sayısında kanal sayısının artması ile ortalama ısı transfer katsayısında artış meydana gelmiştir. Ayrıca sabit Reynolds sayısı ve sabit mikrokanal sayısı için nanoakışkanların hacimsel yüzde oranları arttıkça Al_2O_3-su nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısının CuO-su nanoakışkanına göre yüksek olduğu görülmektedir.

Şekilde görüldüğü gibi voc=%0,1 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı, suyun ısı transferi katsayısına göre sırasıyle %0,15, %0,16 ve %0,17, voc=%1 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı suyun ısı transferi katsayısına göre sırasıyle %1,55, %1,63 ve %1,73 ve voc=%4 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı suyun ısı transferi katsayısına göre sırasıyle %6,29, %6,62 ve %7,06 artış meydana gelmiştir. Aynı şekilde voc=%0,1 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı suyun ısı transferi katsayısına göre sırasıyle %0,11, %0,12 ve %0,13, voc=%1 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı suyun ısı transferi katsayısına göre sırasıyle %1,14, %1,19 ve %1,29, voc=%0,4 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı suyun ısı transferi katsayısına göre sırasıyle %4,76, %5,01 ve %6,59 artış görülmektedir.

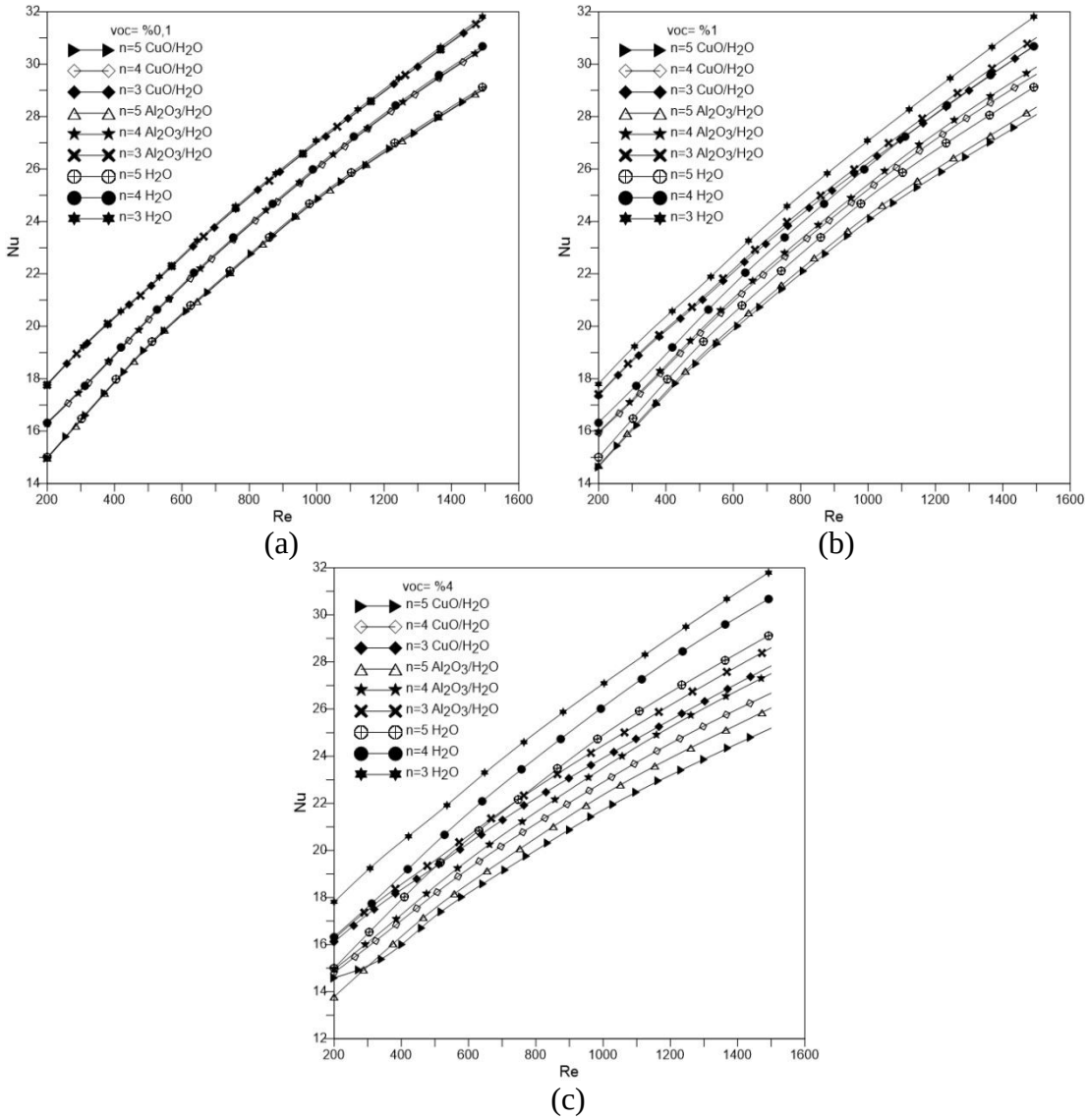


Şekil 5.42. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Isı değiştiricisindeki nanoakışkanın türünün ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın Nusselt sayısı üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın Nusselt sayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.43'de nanoakışkanın Al_2O_3-su ve CuO-su, mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sabit Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması ile Nusselt sayısı azalmıştır. Ayrıca nanoakışkanların hacimsel yüzde oranları arttıkça sabit mikrokanal sayısı için Al_2O_3-su nanoakışkanının Nusselt sayısı CuO-su nanoakışkanına göre azalmıştır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; Nusselt sayısı (Nu) akışkanın ısı transferi katsayısına (h) ve ısıl

iletkenlik katsayısına (k) bağlıdır. Sabit Reynolds sayısında Al_2O_3-su nanoakışkanın ısı transfer katsayısı ve ısıl iletkenlik katsayısı, CuO-su nanoakışkanına göre daha fazladır. Ayrıca ısıl iletkenlik katsayısının artış oranı ısı transfer katsayısının artış oranına göre daha fazla olduğundan dolayı Al_2O_3-su nanoakışkanının Nusselt sayısı CuO-su nanoakışkanına göre azalma göstermektedir.

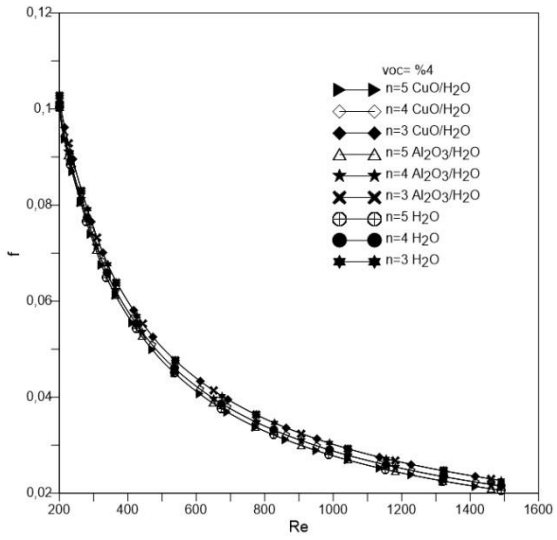
Şekilde görüldüğü gibi voc=%0,1 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının Nusselt sayısı, suyun Nusselt sayısına göre sırasıyle %0,22, %0,21 ve %0,21, voc=%1 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının Nusselt sayısı, suyun Nusselt sayısına göre sırasıyle %2,24, %2,14 ve %2,06 ve voc=%4 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının Nusselt sayısı, suyun Nusselt sayısına göre sırasıyle %8,75, %8,37 ve %8,08 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde voc=%0,1 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının Nusselt sayısı, suyun Nusselt sayısına göre sırasıyle %0,25, %0,24 ve %0,23, voc=%1 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının Nusselt sayısı, suyun Nusselt sayısına göre sırasıyle %2,49, %2,44 ve %2,35, voc=%4 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının Nusselt sayısı, suyun Nusselt sayısına göre sırasıyle %9,53, %9,31 ve %8,89 azalmıştır.



Şekil 5.43. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi

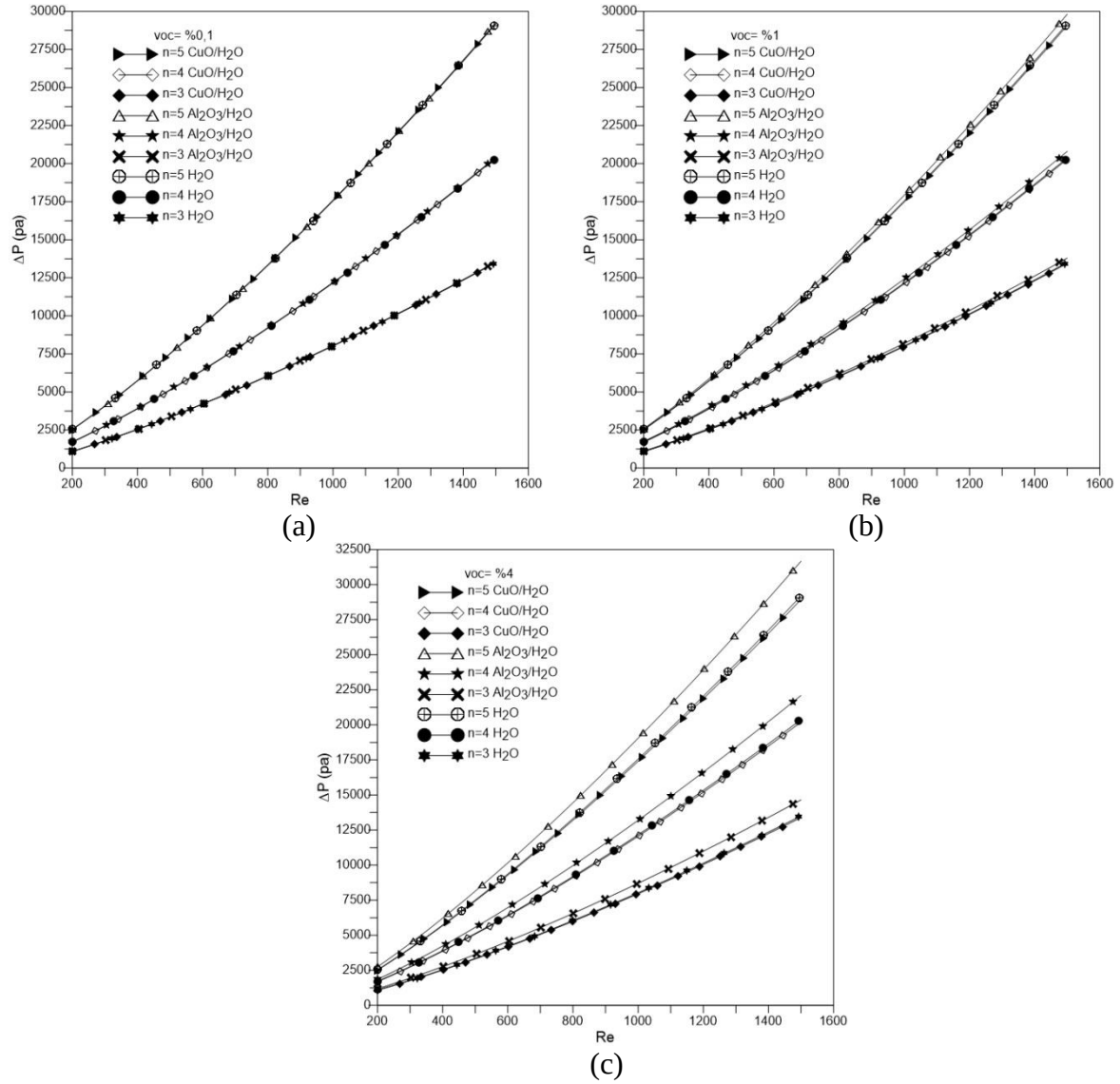
Isı değiştiricisindeki nanoakışkan türünün ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörünün Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.44'de Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda %4 hacimsel yüzde oranı için gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sabit Reynolds sayısı için kanal sayısı artınca ortalama Fanning sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir. Reynolds sayısı arttıkça Fanning sürtünme katsayısı azalmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi voc=%0,4 ve Re=200 olduğu durumda n=3, 4 ve 5 için Al_2O_3-su nanoakışkanının Faning sürtünme katsayısı, suyun Faning sürtünme katsayısına göre

sırasıyle %0,054, %0,046 ve %0,006 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde voc=%4 ve Re=200 olduğu durumda n=3,4 ve 5 için CuO-su nanoakışkanının Faning sürtünme katsayısı, suyun Faning sürtünme katsayısına sırasıyle %0,036, %0,046 ve %0,009 azalmıştır. Ayrıca nanoakışkan türünün sürtünme faktörü üzerinde etkili olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.44. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki nanoakışkan türünün ve mikrokanal sayısının nanoakışkanın ortalama Fanning sürtünme faktörü üzerindeki etkisi

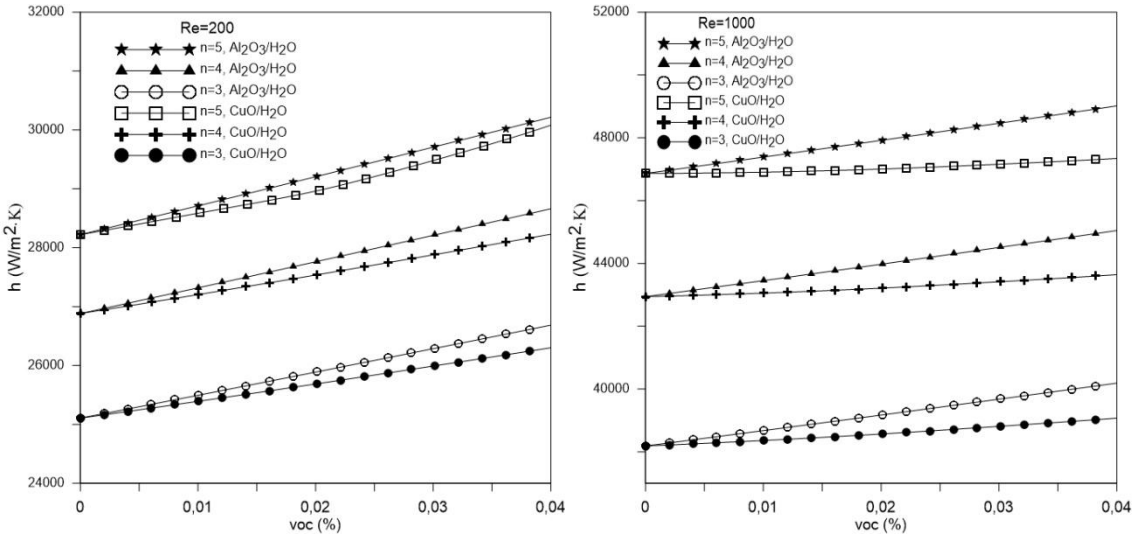
Isı değiştiricisindeki nanoakışkanın türünün ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın basınç düşümü üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın basınç düşümü Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.45'de nanoakışkanın Al_2O_3-su ve CuO-su, mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda üç farklı hacimsel yüzde oranı için voc=%0,1, %1 ve %4 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere mikrokanaldaki basınç düşümü sabit Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının artması ile artmıştır. Ayrıca nanoakışkanların hacimsel yüzde oranları arttıkça sabit mikrokanal sayısı için Al_2O_3-su nanoakışkanının basınç düşümünün CuO-su nanoakışkanının basınç düşümüne göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.45. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için üç farklı (a) voc=%0,1, (b) voc=%1 ve (c) voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısının basınç düşümü üzerindeki etkisi

Isı değiştiricisindeki nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görmek için Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için ısı transfer katsayısı nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının fonksiyonu olarak Şekil 5.46'da mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda iki farklı Reynolds sayısında Re=200 ve 1000 için gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sabit Reynolds sayısında nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artması ile ortalama ısı transfer katsayısında artış meydana gelmiştir. Ayrıca sabit hacimsel yüzde oranında kanal sayısının yüksek olması durumunda yüksek ısı transferi katsayısı elde edildiği görülmektedir. Al_2O_3-

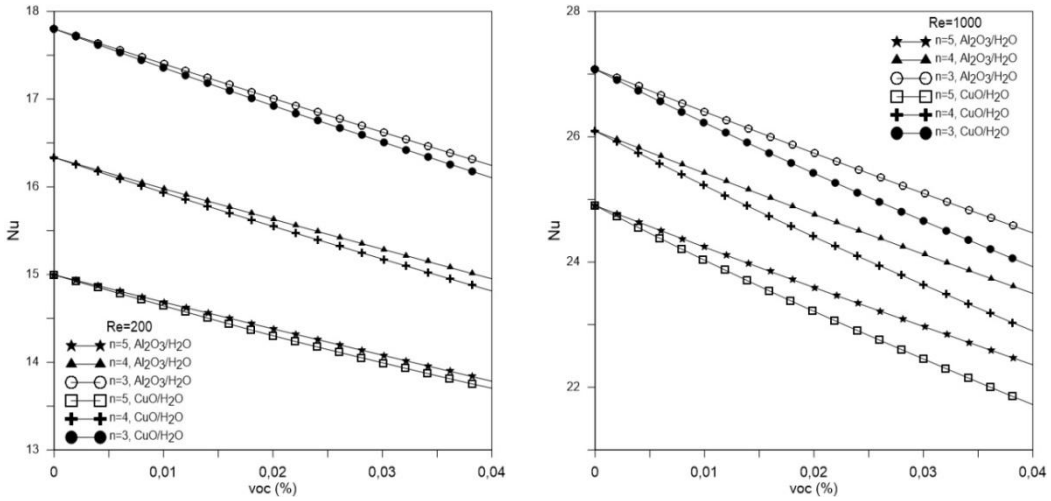
su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı CuO-su nanoakışkanı ısı transferi katsayısından yüksektir.



(a) (b)

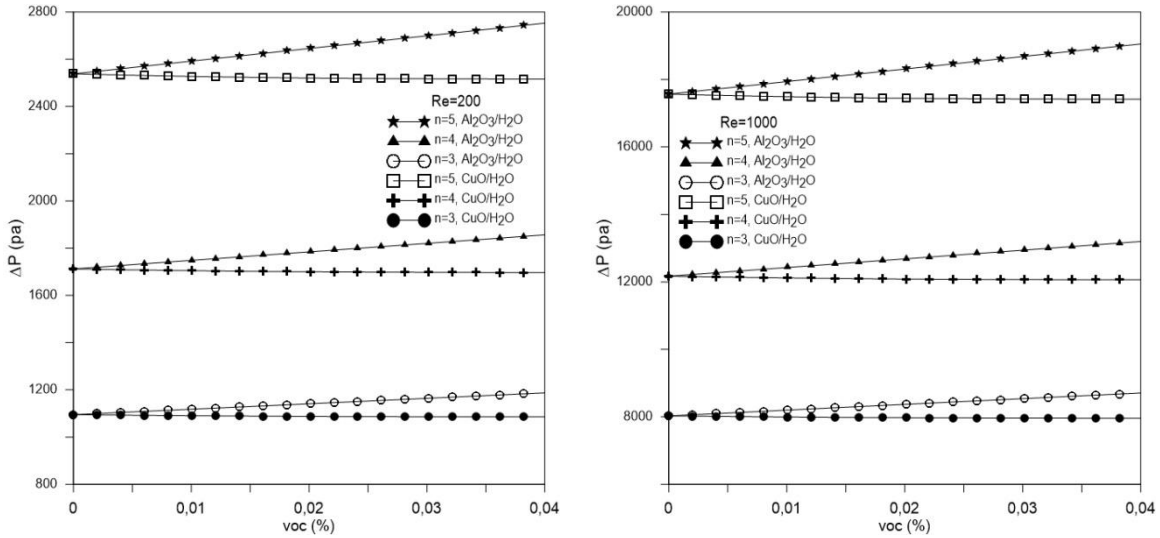
Şekil 5.46. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a) Re=200 ve (b) Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi

Isı değiştiricisindeki nanoakışkanın hacimsel oranının ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın Nusselt sayısı üzerindeki etkisini görmek için nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısı nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının fonksiyonu olarak Şekil 5.47'de nanoakışkanın Al_2O_3-su ve CuO-su, mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda Reynolds sayısı Re=200 ve 1000 için gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sabit Reynolds sayısında nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artması ile Nusselt sayısı azalmıştır. Ayrıca Şekil 5.47'de görüldüğü üzere nanoakışkanın sabit hacimsel yüzde oranında artan kanal saysı ile Nusselt sayısı azalmıştır. Yine görüldüğü üzere Al_2O_3-su nanoakışkanı için elde edilen Nusselt sayısı CuO-su nanoakışkanınkinden daha düşüktür.



Şekil 5.47. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a) Re=200 ve (b) Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki Nusselt sayısının nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı ile değişimi

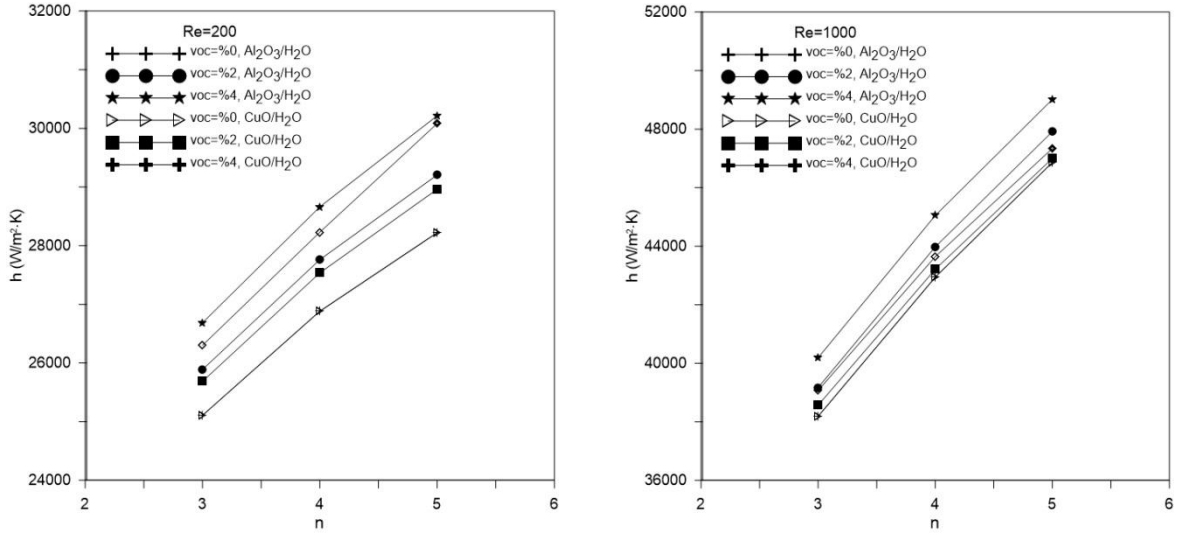
Isı değiştiricisindeki nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının ve yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın basınç düşümü üzerindeki etkisini görmek için, nanoakışkanın basınç düşümü hacimsel yüzde oranının fonksiyonu olarak Şekil 5.48'de Al_2O_3-su ve CuO-su için mikrokanal sayısının n=3, 4 ve 5 olması durumunda iki farklı Reynolds sayısı için Re=200 ve 1000 gösterilmiştir. Görüldüğü üzere mikrokanaldaki basınç düşümü sabit Reynolds sayısında nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının artması ile artmıştır. Yalnız bu artış CuO-su nanoakışkanı için düşük olup Al_2O_3-su nanoakışkanı için yüksektir.



(a) (b)

Şekil 5.48. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a) Re=200 ve (b) Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki basınç düşümünün nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı ile değişimi

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının nanoakışkanın ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görmek için Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için ısı transfer katsayısı ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.49'da nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının voc=%0, %2 ve %4 olması durumunda iki farklı Reynolds sayısında Re=200 ve 1000 için gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sabit Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının artması ile ortalama ısı transfer katsayısında artış meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 5.49'da görüldüğü üzere aynı kanal sayısında Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısı CuO-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısından daha yüksektir. Yine görülmektedirki, aynı kanal sayısında nanoakışkanın içerisindeki partikül oranının artması ısı transferi katsayısını artırmıştır.



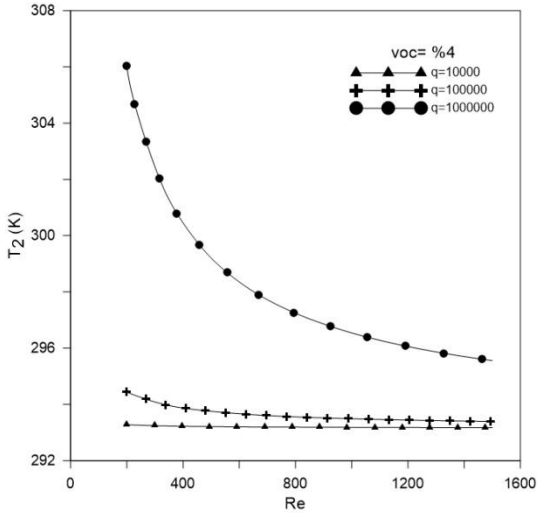
(a) (b)

Şekil 5.49. Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanları için iki farklı (a). Re=200 ve (b). Re=1000 Reynolds sayısında ısı değiştiricisindeki ısı transferi katsayısının yamuk kesitli mikrokanal sayısı ile değişimi

5.2.4. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde farklı ısı akısı olduğu durumunda elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının kıyaslanması

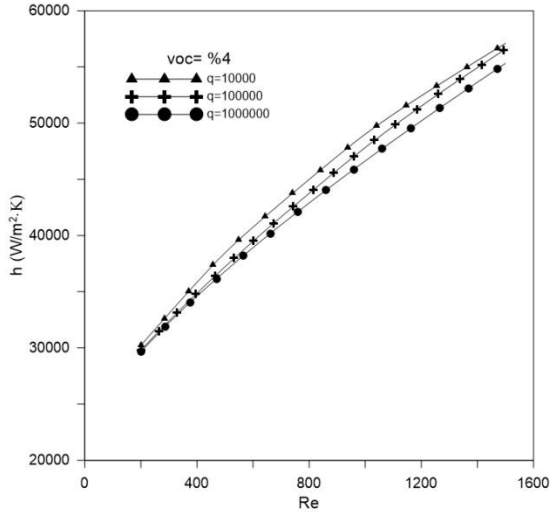
Çalışmanın bu bölümünde ısı değiştiricisinde farklı ısı akısı $\dot{q}_w^{"}$ =1×10^4, 1×10^5 ve 1×10^6 (W/m^2) olması durumunda, ısı değiştiricisindeki mikrokanal sayısı n=5 ve Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranı için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Isı değiştiricisindeki ısı akısının nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisini görmek için Al_2O_3-su nanoakışkanının mikrokanaldan çıkış sıcaklığı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.50'de mikrokanal sayısının n=5 ve nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı voc=%4 olması durumunda üç farklı ısı akısında $\dot{q}_w^{"}$=1×10^4, 1×10^5 ve 1×10^6 (W/m^2) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için ısı değiştiricisindeki ısı akısı artınca nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı artmıştır. Ayrıca Reynolds sayısı artınca nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı azalmaktadır ve yüksek ısı akısında azalma oranı daha yüksektir.



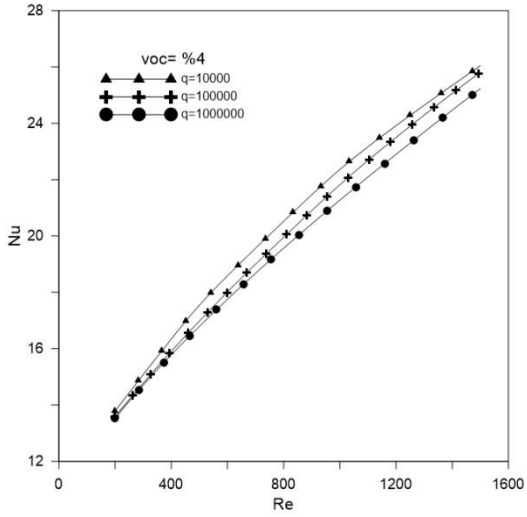
Şekil 5.50. Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki farklı ısı akısı için nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi

Isı değiştiricisindeki ısı akısının nanoakışkanın kanaldaki ortalama ısı transferi katsayısı üzerindeki etkisini görmek için Al_2O_3-su nanoakışkanın ortalama ısı transferi katsayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.51'de mikrokanal sayısının n=5 ve nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı voc=%4 için üç farklı ısı akısında $\dot{q}''_w$=1×10^4, 1×10^5 ve 1×10^6 (W/m^2) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için ısı değiştiricisine verilen ısı akısı artınca nanoakışkanın ortalama ısı transferi katsayısı azalmıştır. Bu ise ısı akısının artması durumunda katı içerisindeki ısının akışkana yeterince aktarılamadığı şeklinde açıklanabilir.



Şekil 5.51. Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki farklı ısı akısı için nanoakışkanın ortalama ısı transferi katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Isı değiştiricisindeki ısı akısının nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisini görmek için Al_2O_3-su nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısı Reynolds sayısının fonksiyonu olarak Şekil 5.52'de mikrokanal sayısının n=5 ve nanoakışkanın hacimsel yüzde oranı voc=%4 için üç farklı ısı akısında $\dot{q}''_w$=1×10^4, 1×10^5 ve 1×10^6 (W/m^2) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, sabit Reynolds sayısı için ısı değiştiricisindeki ısı akısı artınca nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısı azalmıştır. Bu azalış miktarı az olmakla beraber azalışın nedeni, ısı değiştiricisine verilen ısı akısı arttığında nanoakışkanın bu ısıyı yeterince alamadığı biçiminde yorumlanabilir.



Şekil 5.52. Al_2O_3-su nanoakışkanının voc=%4 hacimsel yüzde oranında ısı değiştiricisindeki farklı ısı akısı için nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen bu çalışmada, içerisinde nanoakışkanın geçtiği yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi içerisindeki akış alanı ve mikrokanalın dış kısmındaki katı kısım, akış ve ısı transferi için sayısal olarak incelenmiştir. Isı transferi ve akış özellikleri Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanı için laminar akış şartlarında sabit yüzey ısı akısı sınır şartında gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal çalışmada, Reynolds sayısının ($200 \leq Re \leq 1500$), nanoakışkanın tipinin (Al_2O_3-su ve CuO-su), nanoakışkanın hacimsel yüzde oranının (%0 $\leq$ voc $\leq$ %4) ve mikro ısı değiştiricideki kanal sayısının (n=3-5) akış ve ısı transferine etkisi incelenmiştir. Sayısal çalışma ANSYS FLUENT 15.1 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisi 3, 4 ve 5 adet yamuk kesitli mikrokanal için Şekil 2.1'de görüldüğü gibidir. Yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinin üst yüzeyinde sabit 10 000'lik bir ısı akısı uygulanmıştır.

Isı değiştiricisinde kanal sayısı arttıkça nanoakışkanın kanaldan çıkış sıcaklığı ve Nusselt sayısı (Nu) azalmıştır, fakat ısı transfer katsayısında (h) ve basınç düşümünde artış görülmüştür.

Isı değiştiricisinin aynı mikrokanal sayısında olması durumunda yüksek hacimsel yüzde oranları için Al_2O_3-su nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığının ve Nusselt sayısının (Nu) CuO-su nanoakışkanına göre daha düşük olduğu, fakat ısı transfer katsayısının (h) ve basınç düşümünün ise yüksek olduğu görülmüştür. Nanoakışkan türünün sürtünme faktörü üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir. Çizelge 6.1'de Al_2O_3-su ve CuO-su nanoakışkanlarının ısı transferine etkisi saf suya göre farklı durumlar için %4 hacimsel oranında yüzde olarak gösterilmiştir. Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi Re=200 ve voc=%4 için Al_2O_3-su nanoakışkanı beş kanallı, dört kanallı ve üç kanallı ısı değiştiricisinde ısı transferini saf suya göre sırasıyla %7,06, %6,62 ve %6,29 artmıştır. Aynı şekide CuO-su nanoakışkanında sırasıyla %6,59, %5,01, %4,76 artış olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1. Al2O3-su ve CuO-su nanoakışkanları için 3-5 kanal sayısındaki voc=%4 için ısı transferi katsayısının (h) saf suya göre değişimi

Nanoakışkan	Re	n=3, voc=%4	n=4, voc=%4	n=5, voc=%4
Al2O3-su	200	6,29%	6,62%	7,06%
	350	6,20%	6,38%	6,51%
	500	6,03%	6,00%	5,96%
	650	5,79%	5,63%	5,50%
	800	5,54%	5,30%	5,07%
	1000	5,24%	4,91%	4,59%
	1150	5,03%	4,65%	4,35%
	1300	4,82%	4,45%	4,17%
	1400	4,69%	4,34%	4,06%
	1500	4,57%	4,24%	3,95%
CuO-su	200	4,76%	5,01%	6,59%
	350	4,38%	4,39%	4,27%
	500	3,91%	3,57%	3,30%
	650	3,37%	2,89%	2,52%
	800	2,88%	2,32%	1,81%
	1000	2,32%	1,63%	1,02%
	1150	1,94%	1,20%	0,63%
	1300	1,57%	0,86%	0,32%
	1400	1,35%	0,67%	0,13%
	1500	1,15%	0,51%	0,05%

Çizelge 6.1'de görüldüğü üzere düşük Reynolds sayılarında saf suya göre nanoakışkanın ısı transferi katsayısındaki artış miktarı daha fazladır. Ayrıca görüldüğü üzere aynı Reynolds sayısı ve aynı hacimsel yüzde oranında Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transferi katsayısının CuO-su nanoakışkanına göre daha fazladır.

Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transfer katsayısının CuO-su nanoakışkanının ısı transfer katsayısına göre düşük Reynolds sayısında (Re=200 için) n=3, 4 ve 5 için 1,32, 1,32 ve 1,07 katı daha fazla olduğu görülmüştür. Yüksek Reynolds sayılarında (Re=1500) için ise Al_2O_3-su nanoakışkanının ısı transfer katsayısının CuO-su nanoakışkanının ısı transfer katsayısına göre n=3,4 ve 5 için 3,97, 8,3 ve 79 katı olduğu görülmüştür.

Bundan sonraki bu konu hakkında yapılacak çalışmalarda hibrid nanoakışkanların ısı transferlerine etkisi ve mikrokanalların pürüzlü olduğu durum incelenebilir.

KAYNAKLAR

Ahuja, A.S. (1975). Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. I. Experiments and results. *Journal of Applied Physics,* 46(8), 3408-3416.

Ahuja, A.S. (1982). Thermal design of a heat exchanger employing laminar flow of particle suspensions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25(5), 725-728.

Azizi, Z., Alamdari, A., and Malayeri, M.R. (2015). Convective heat transfer of Cu–water nanofluid in a cylindrical microchannel heat sink. *Energy Conversion and Management*, 101, 515-524.

Chandrasekar, M., Suresh, S., and Bose, A. C. (2010). Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al 2 O 3/water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science,* 34(2), 210-216.

Choi, S.U.S., Eastman, J.A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME International Mechanical Engineering Congress & Expositio, San Francisco, CA*, 12-17.

Choi, S.U.S. (1995, November). Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, developments and applications of non-newtonian flows. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition,* 66, 99-105.

Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P. and Choi, S.U.S. (2005). Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al2O3) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters,* 87(15), 153107.

Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W. (2003). Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 125, 567-574.

Duangthongsuk, W., Wongwises, S. (2009). Measurements of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO2 (21 nm)/water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science,* 33, 706-714.

Esmaeilnejad, A., Aminfar, H. and Neistanak, M.S. (2014). Numerical investigation of forced convection heat transfer through microchannels with non-newtonian nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences,* 75, 76-86.

Ghale, Z .Y., Haghshenasfard, M., and Esfahany, M.N. (2015). 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, 122-129.

Hamilton, R.L., Crosser, O.K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals,* 1(3), 187-191.

Hong, T.K., Yang, H.S. and Choi, C.J. (2005). Study of the enhanced thermal conductivity of fe nanofluids. *Journal of Applied Physics,* 97, 064311.

Hung, T.C., Yan, W.M., Wang, X.D. and Chang, C.Y. (2012). Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2559–2570.

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine. A.S. (2006). *Fundamentals of heat transfer*. New York: John Wiley & Sons.

Kandlikar, S, Garimella, S., Li, D. and King, M.R. (2006). *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. Oxford*: Elsevier.

Kandlikar, S.G., Grande, W.J. (2003). Evolution of microchannel flow passages–thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Engineering*, 24(1), 3–17, 2003.

Khanafer, K. Vafai, K. and Lightstone, M. (2003). Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 46, 3639-3653.

Koo, J., Kleinstreuer, C. (2005). Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 48, 2652–2661.

Koyuncuoğlu, A., Jafari, R., Okutucu-Özyurt, T. and Külah, H. (2012). Heat transfer and pressure drop experiments on CMOS compatible microchannel heat sinks for monolithic chip cooling applications. *International Journal of Thermal Sciences,* 56, 77-85.

Lee, J., Mudawar, I. (2007). Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 50, 452–463.

Lee, P.S., Garimella, S., and Liu, D. (2005). Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 48, 1688–1704.

Lelea, D., Laza, L. (2014). The water based Al_2O_3 nanofluid flow and heat transfer in tangential microtube heat sink with multiple ınlets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69, 264-275.

Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E. and Shengqi, X. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology,* 196, 89-101.

Maiga, E.B., Nguyen. C.T., Galanis, N. and Roy. G. (2004). Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube. *Superlattices and Microstructures,* 35,543 - 557.

Malavandi, A., Ganji, D.D. (2014). Mixed convective heat transfer of water/alumina nanofluid ınside a vertical microchannel. *Powder Technology,* 263, 37-44.

Manay, E., Şahin, B., Akyürek, E.F., ve Çomaklo, Ö. (2012). Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Derneği,* 53, 38-42.

Maxwell. J.C., (1873). *A treatise on electricity and magnetism.* Oxford: Clarendon Press.

Mehendale, S.S., Jacobi, A.M. and Shah, R.K. (2000), Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews,* 53, 175-193.

Mohammed, H.A., Gunnasegaran, P. and Shuaib, N.H. (2010). Heat transfer in rectangular microchannels heat sink using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1496-1503.

Mohammed, H.A., Gunnasegaran, P. and Shuaib, N.H. (2011). Influence of various base nanofluids and substrate materials on heat transfer in trapezoidal microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 38, 194-201.

Mohammed, H.A., Gunnasegaran, P. and Shuaib, N.H. (2011). The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 38, 767-773.

Nimmagadda, R., Venkatasubbaiah, K. (2015). Conjugate heat transfer analysis of micro-channel using novel hybrid nanofluids (Al2O3 + Ag/Water). *European Journal of Mechanics B/Fluids,* 52, 19-27.

Pak, B.C., Cho, Y.I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer: A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion,* 11(2), 151-170.

Prasher. R., Phelan P.E., and Bhattacharya. P. (2006). Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (Nanofluid). *Nano Letters,* 6(7), 1529-1534.

Rimbault, B., Nguyen, C.T. and Galanis, N. (2014). Experimental investigation of CuO-water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences,* 84, 275-292.

Sohel, M.R., Saidur, R., Sabri, M.F.M., Kamalisarvestani, M., Elias, M.M. and İjam, A. (2013). Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular micro-channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 75–81.

Tuckerman, D.B., Pease, R.F.W. (1981, May), High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE electron device letters,* 2(5), 126-129.

Vafaei, S., Wen, D. (2014). Critical Heat Flux of nanofluids ınside a single microchannel: Experiments and correlations. *Chemical Engineering Research and Design,* 92, 2339-2351.

Vajiha, R.S, Das, D.K and Mahagaonkar, B.M. (2009). Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. *Petroleum Science and Technology*, 27, 612–624.

Wu, X., Wu, H. and Cheng, P. (june 2009). Pressure drop and heat transfer of Al_2O_3-H_2O nanofluids through silicon microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, 105020.

Xu, J., Song, Y., Zhang, W., Zhang, H. and Gan, Y. (december 2008). Numerical Simulations of Interrupted and Conventional Microchannel Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer***,** 51, 5906-5917.

Yang, Y.T., Tsai K.T., Wang Y.H. and Lin S.H. (2014). Numerical study of microchannel heat sink performance using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 27–35.

Zhou, S.Q., Ni, R. (2008). Measurement of the specific heat capacity of water based Al2O3 nanofluid. *Applied Physics Letters*, 92, 093123-1.

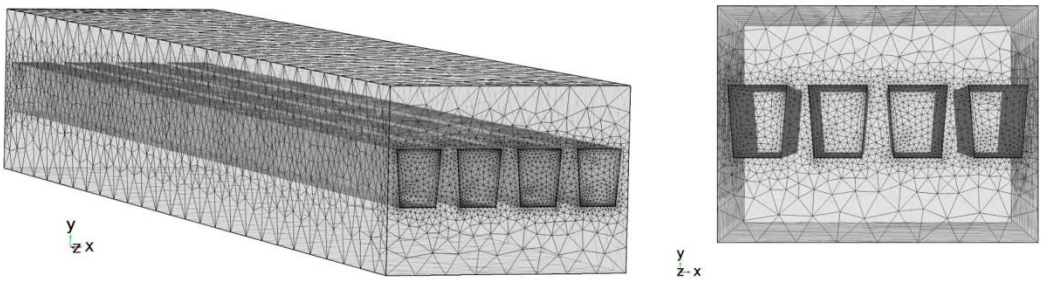
EKLER

EK-1. Al_2O_3-su nanoakışkanı için

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda, Re=1500 ve voc=%4 hacimsel oranındaki Al_2O_3-su nanoakışkanı için sonuçların çözüm ağından bağımsız olma durumları Ek Çizelge 1'de verilmiştir.

Ek Çizelge 1. Üç ve dört adet yamuk kesitli mikrokanallı ısı değiştiricisinde üç farklı çözüm ağı için sonuçlar

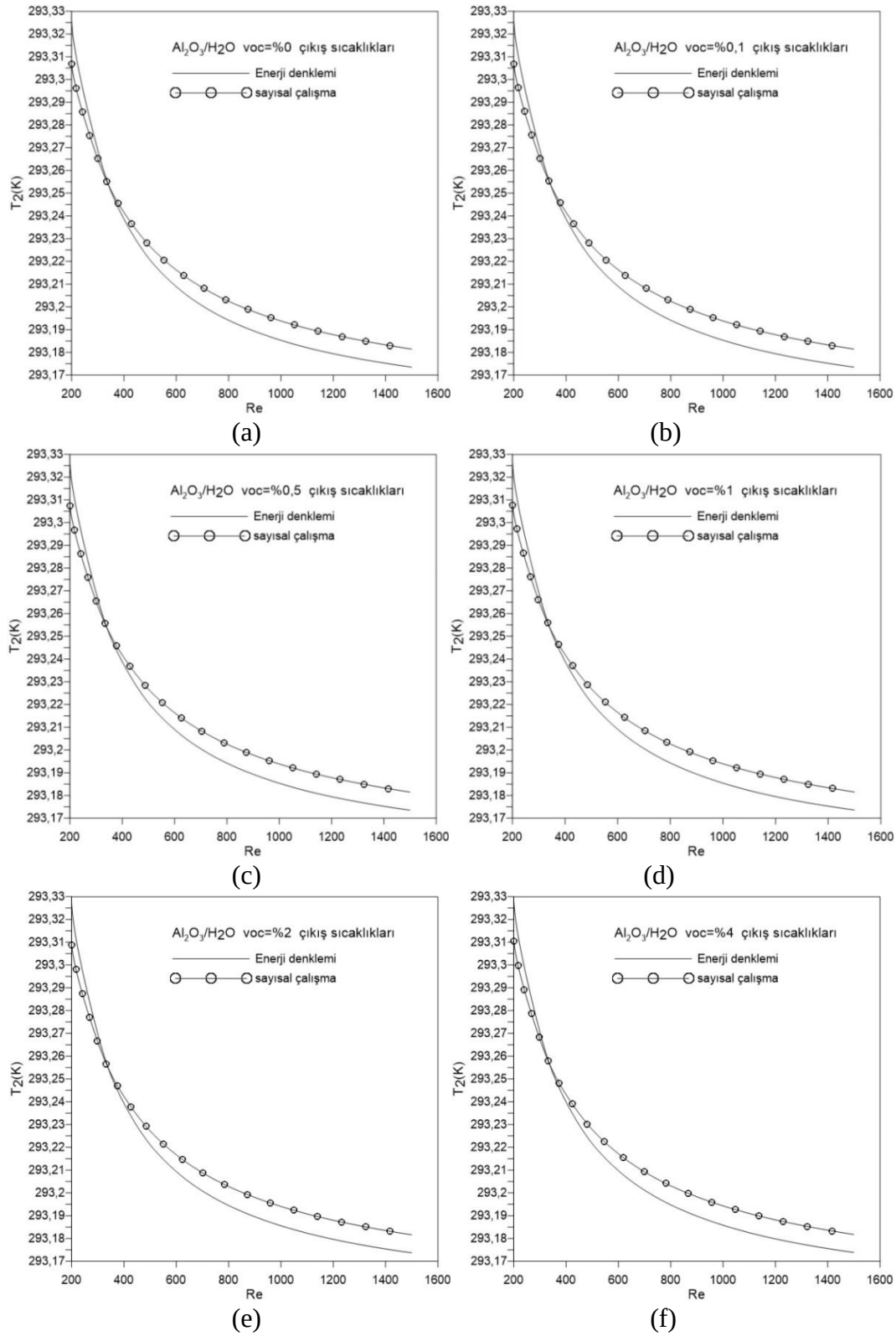
Kanal sayısı n	Hücre sayıları	Akışkanın çıkış sıcaklığı T_2 (K)	Duvar sıcaklığı T_w (K)	Isı transfer katsayısı h ($W/m^2 \cdot K$)	Nusselt sayısı Nu	Sürtünme faktörü f
Üç	107893	293,18	293,25	46707,43	28,43	0,022
	207778	293,18	293,25	46997,31	28,61	0,023
	534729	293,18	293,25	47003,05	28,61	0,022
Dört	119779	293,17	293,22	54831,65	27,21	0,020
	224513	293,18	293,22	52732,85	27,51	0,021
	598729	293,18	293,23	52135,01	27,20	0,022



Ek Şekil 1. n=4 için hücre görüntüsü

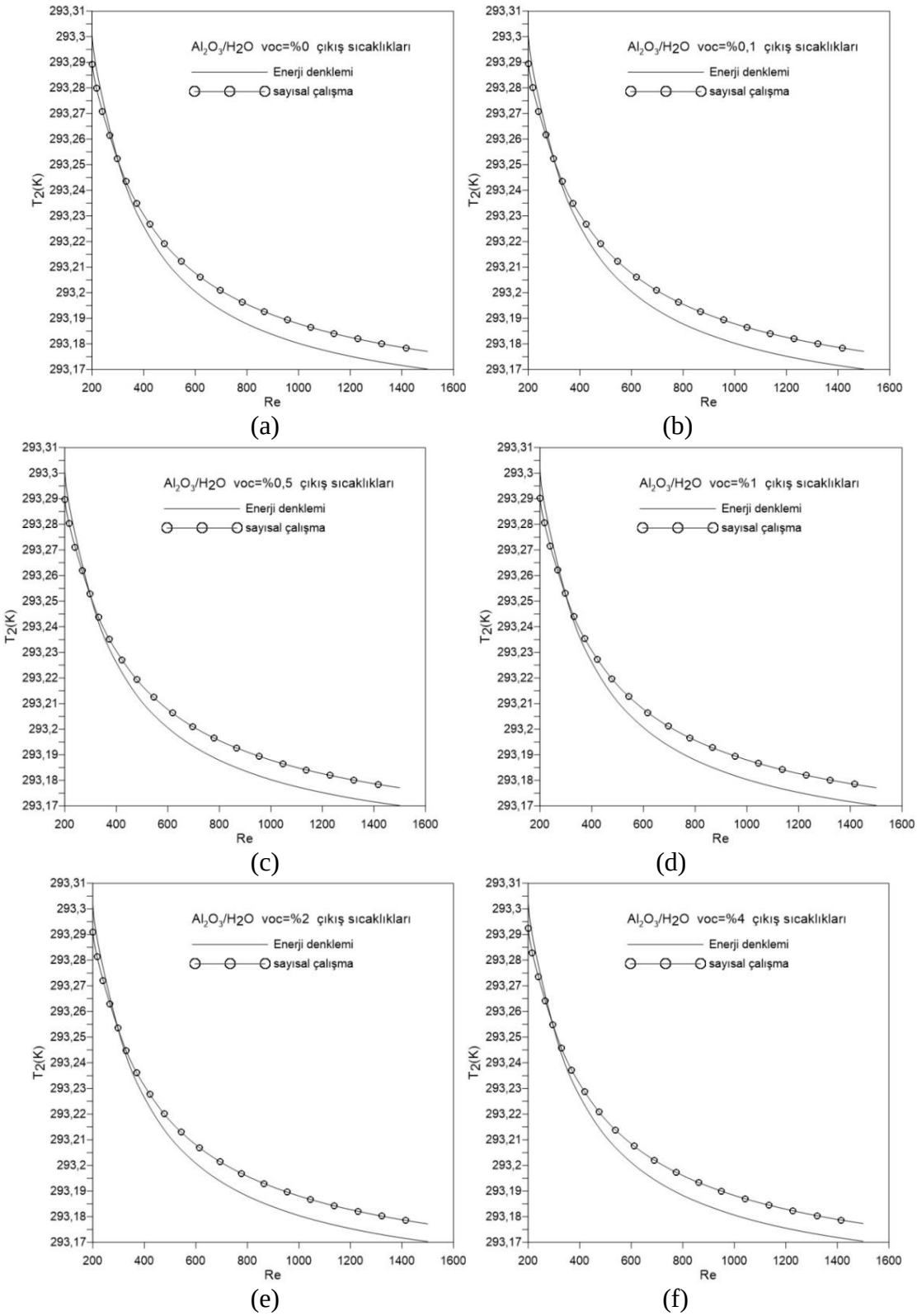
Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda farklı hacimsel yüzde oranlarında nanoakışkanın mikrokanaldan çkış sıcaklıkları sırası ile Ek Şekil 2 ve Ek Şekil 3'de verilmiştir.

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için



Ek Şekil 2. n=3 için Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4

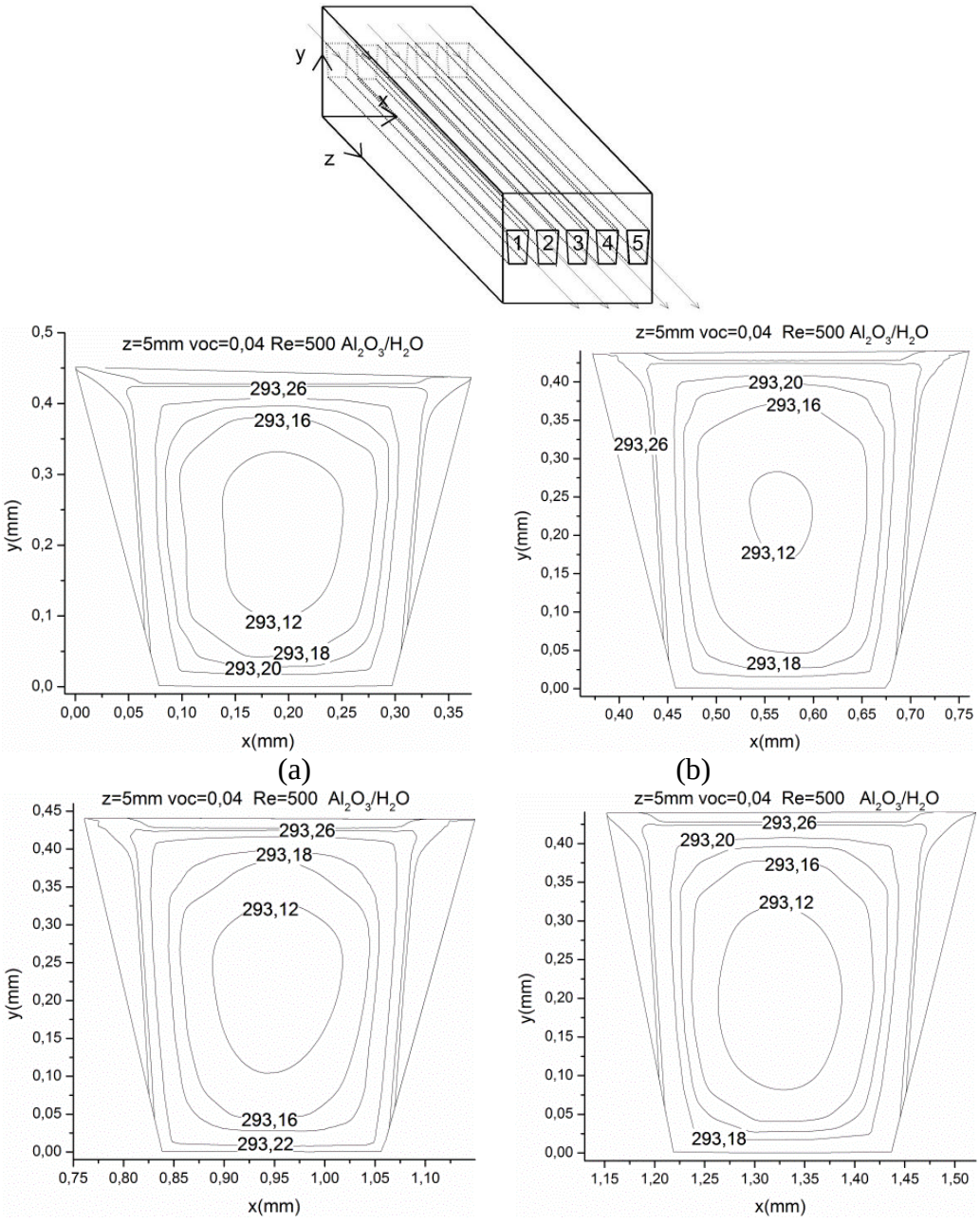
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için



Ek Şekil 3. Al_2O_3-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4

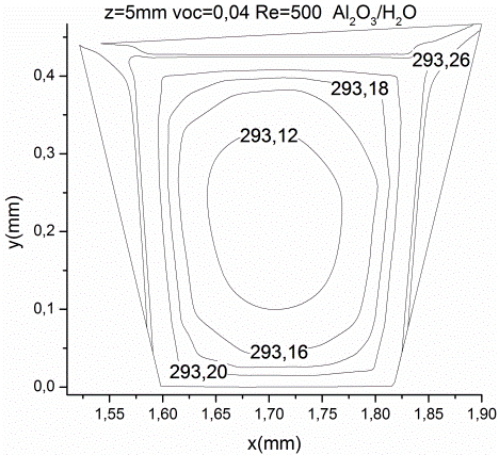
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Sıcaklık konturları; Re=500, voc=%4, n=5 ve z=5mm için



Ek Şekil 4. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için a. birinci kanal, b. ikinci kanal, c. üçüncü kanal, d. dördüncü kanal ve e. beşinci kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

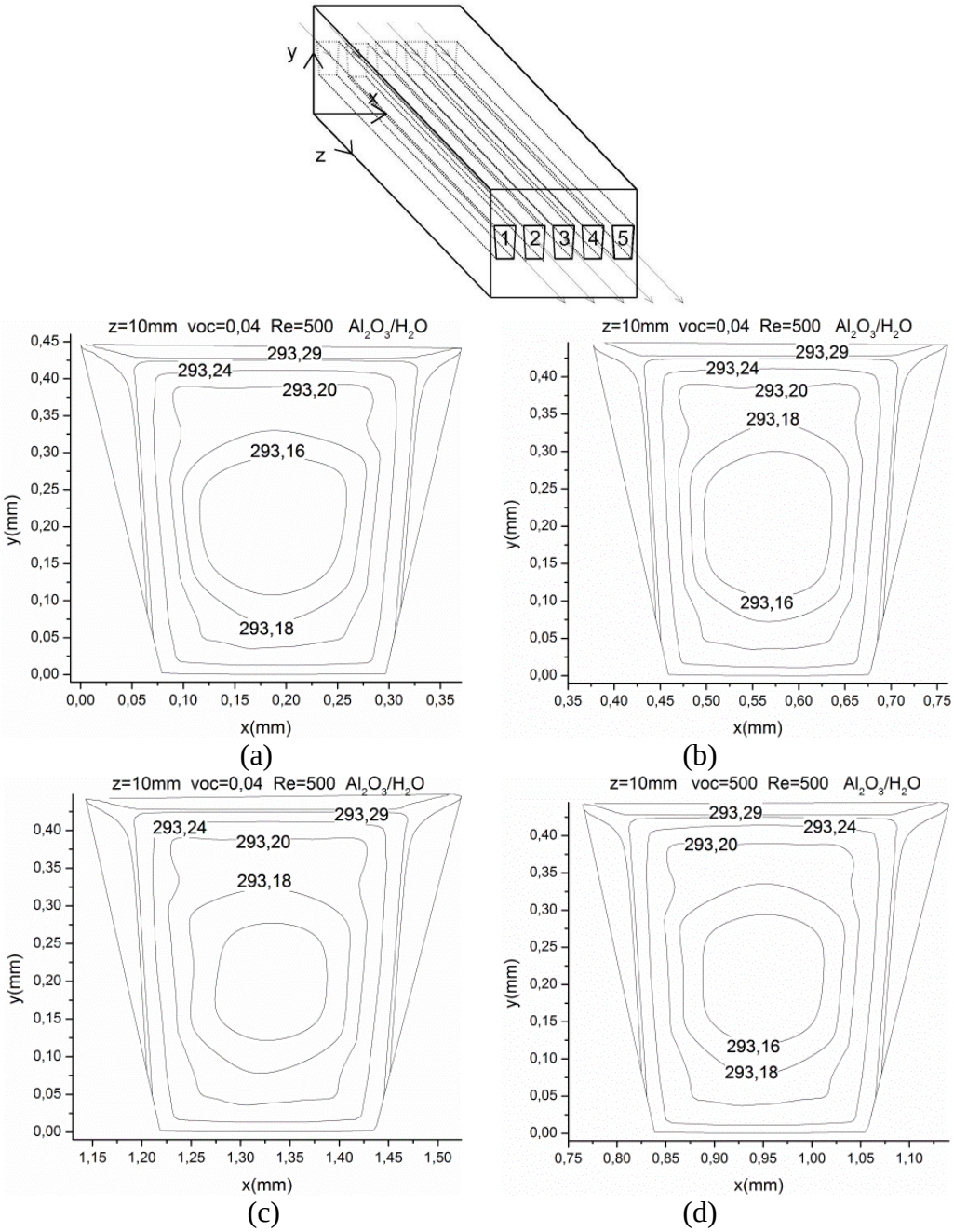


(e)

Ek Şekil 4. (Devam) Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için a. birinci kanal, b. ikinci kanal, c. üçüncü kanal, d. dördüncü kanal ve e. beşinci kanal için sıcaklık konturları

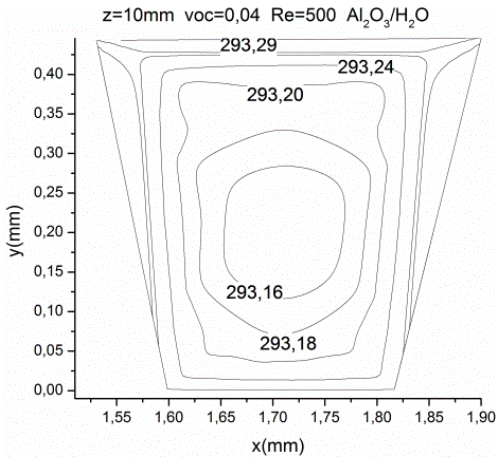
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=500, voc=%4, n=5 ve z=10mm için



Ek Şekil 5. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için a. birinci kanal, b. ikinci kanal, c. üçüncü kanal, d. dördüncü kanal ve e. beşinci kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

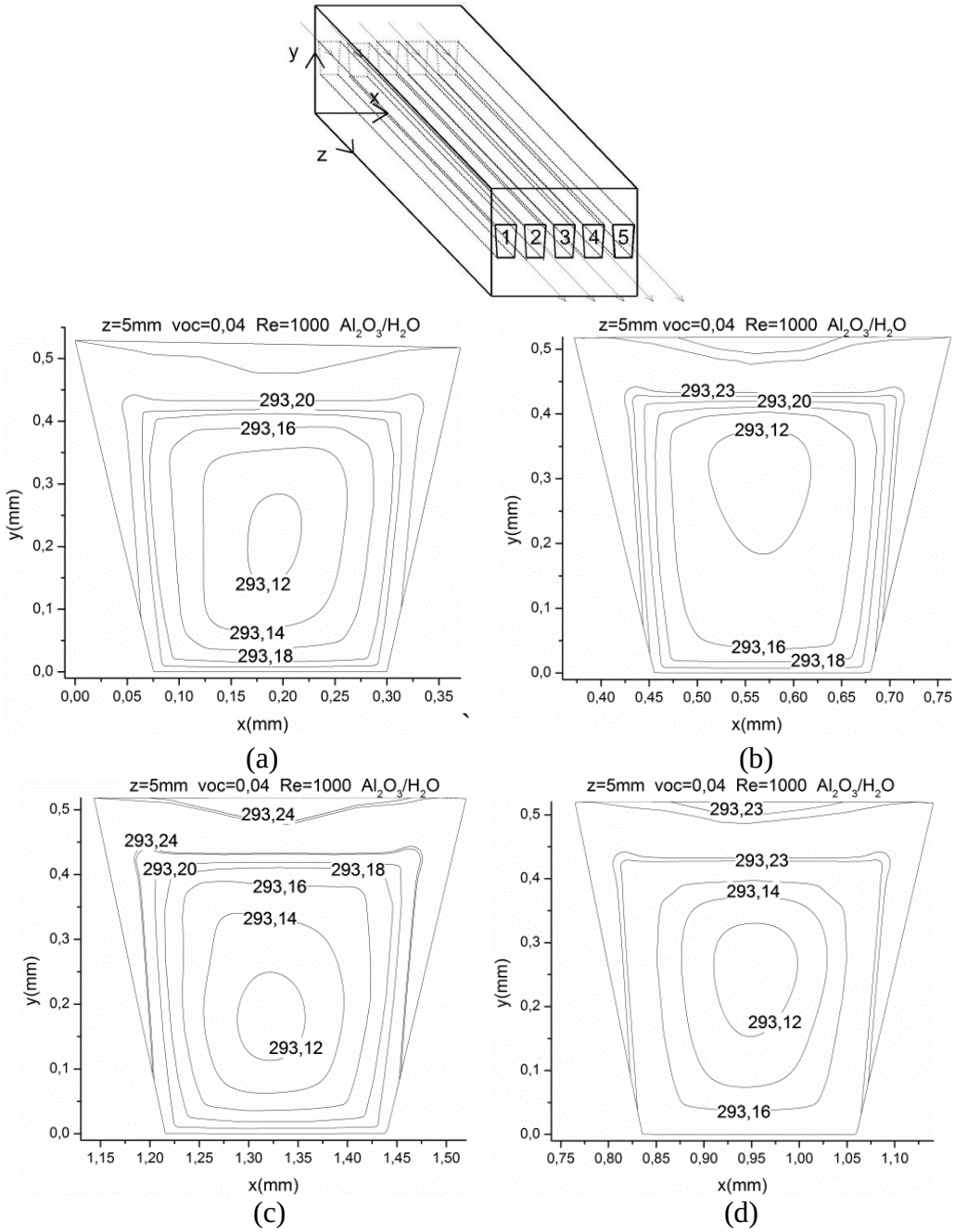


(e)

Ek Şekil 5. (Devam) Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için a. birinci kanal, b. ikinci kanal, c. üçüncü kanal, d. dördüncü kanal ve e. beşinci kanal için sıcaklık konturları

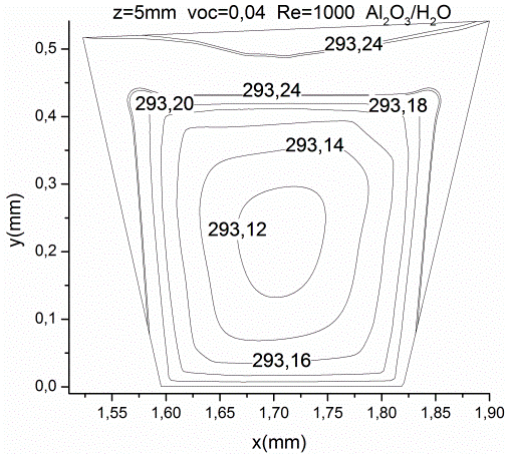
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=1000, voc=%4, n=5 ve z=5mm için



Ek Şekil 6. Kanalın 5mm kesitinde Re=1000, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

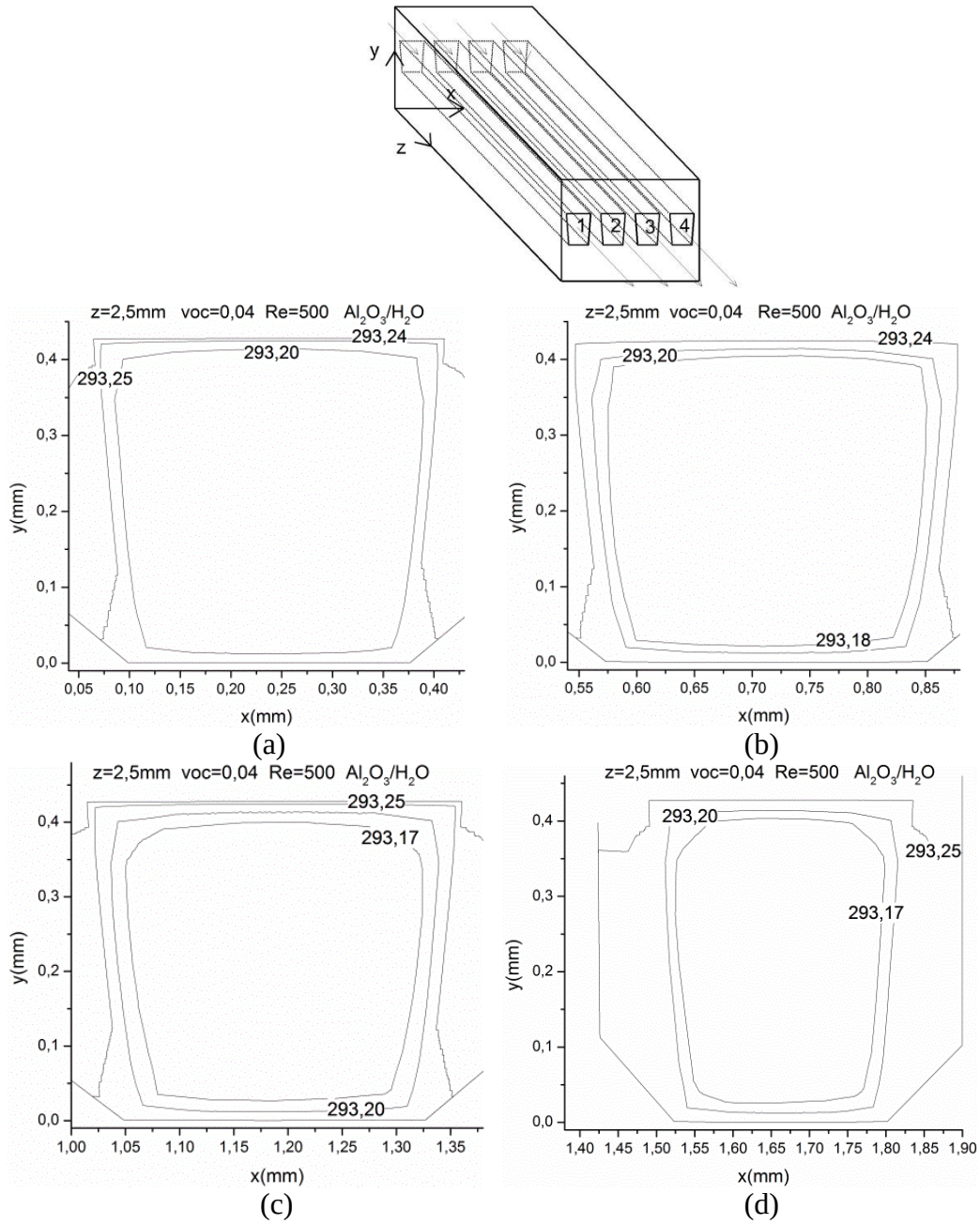


(e)

Ek Şekil 6. (Devam) Kanalın 5mm kesitinde Re=1000, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

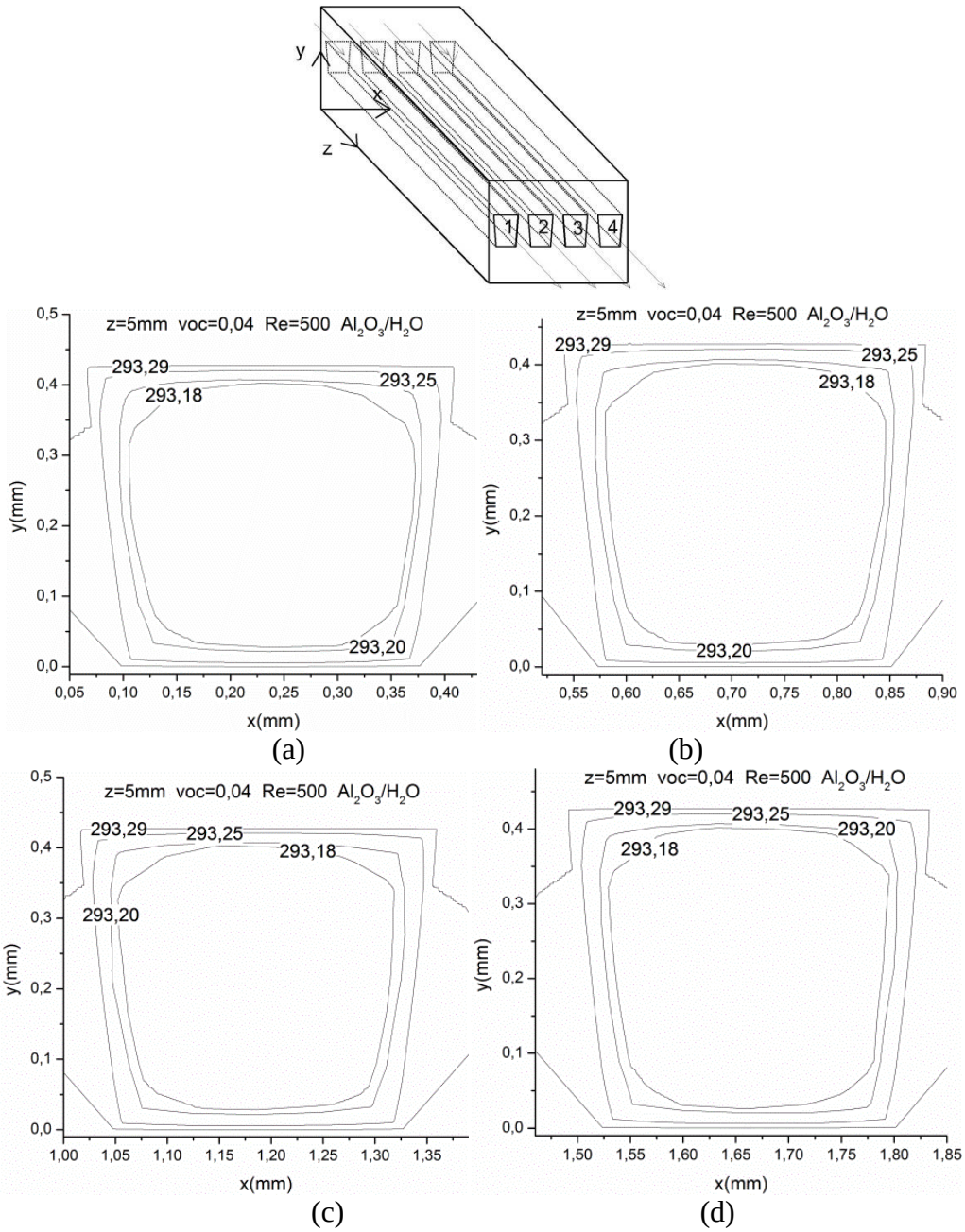
Re=500, voc=%4, n=4 ve z=2,5mm için



Ek Şekil 7. Kanalın 2,5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal ve (d)dördüncü kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

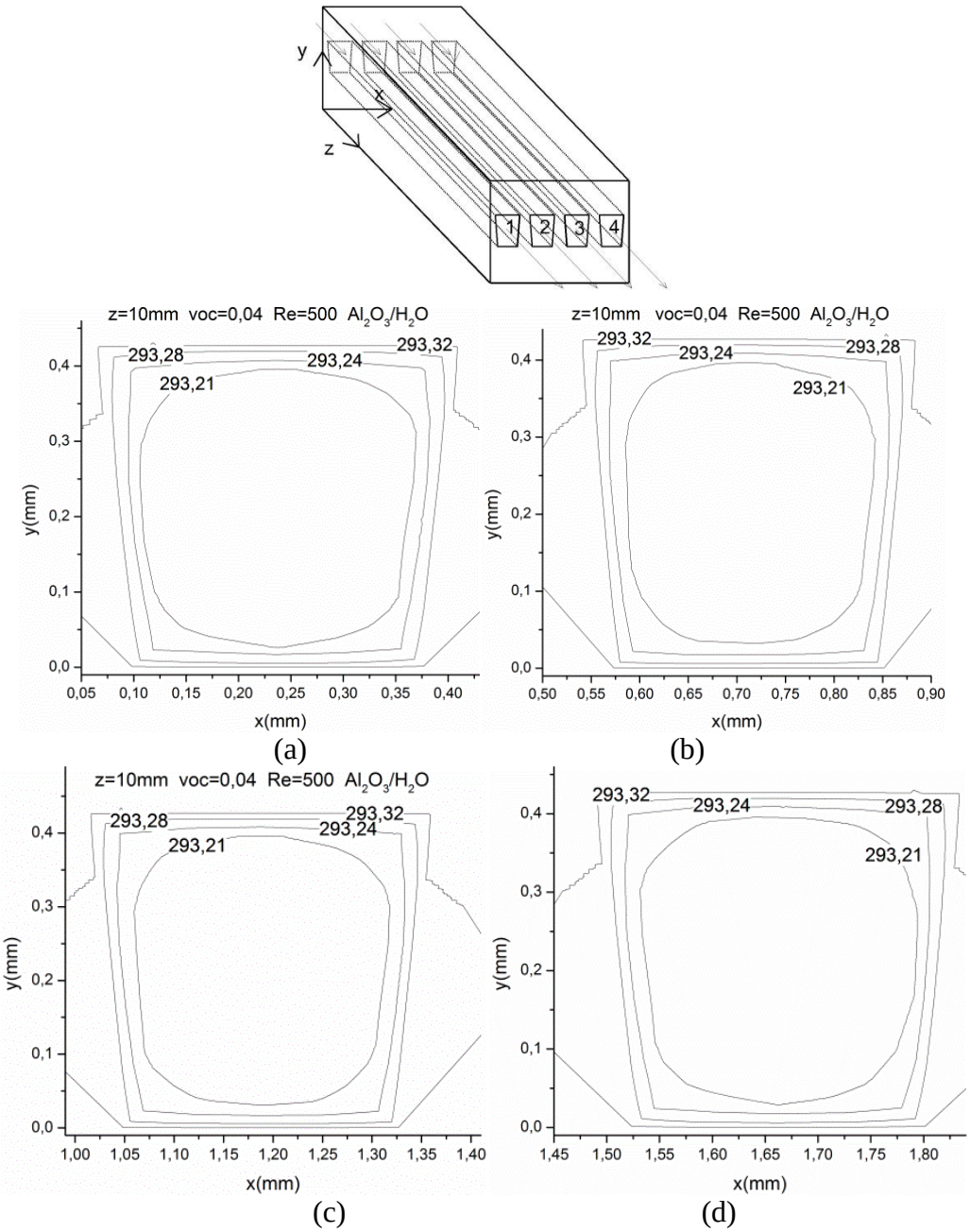
Re=500, voc=%4, n=4 ve z=5mm için



Ek Şekil 8. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal ve (d) dördüncü kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

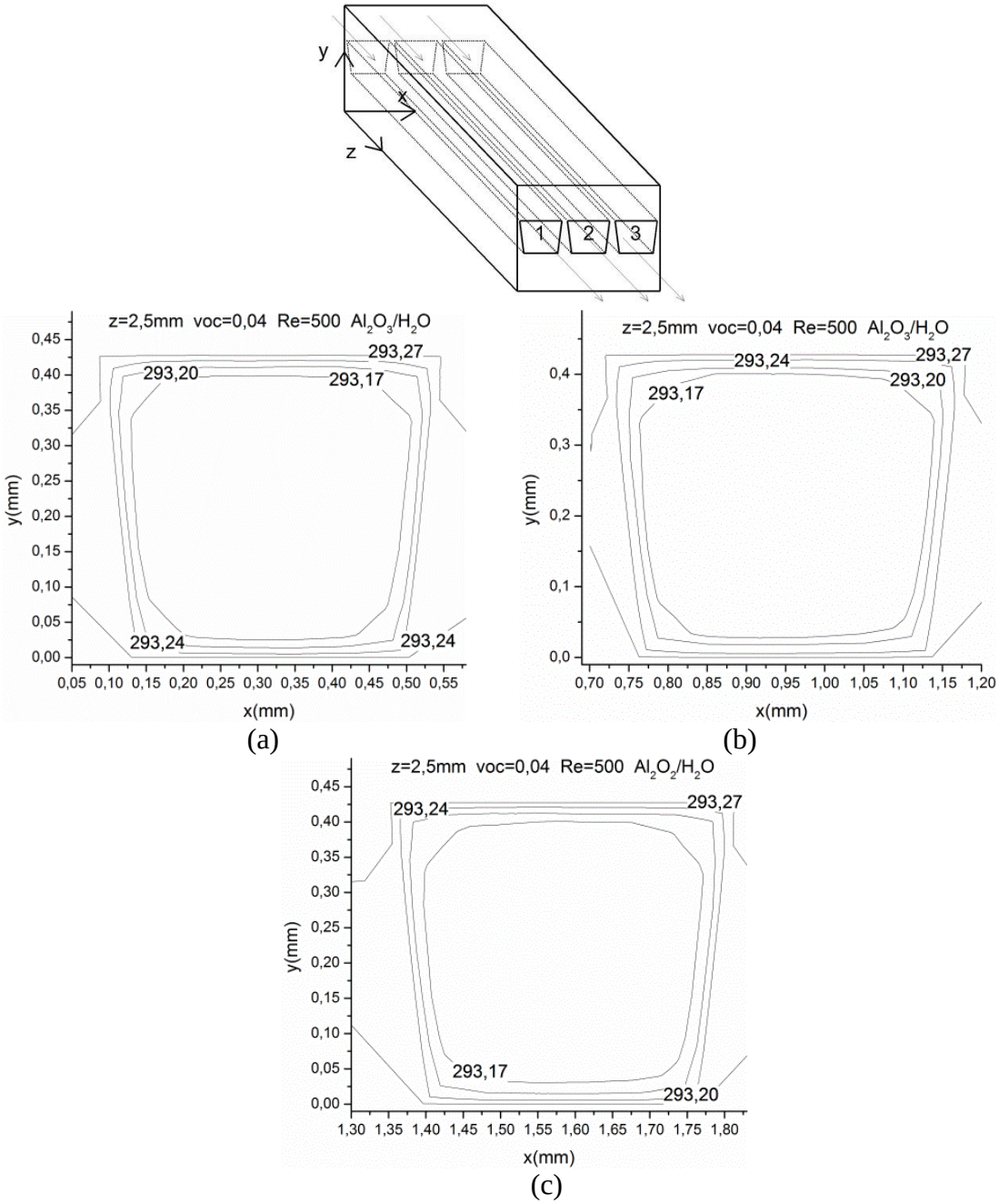
Re=500, voc=%4, n=4 ve z=10mm için



Ek Şekil 9. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal ve (d) dördüncü kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

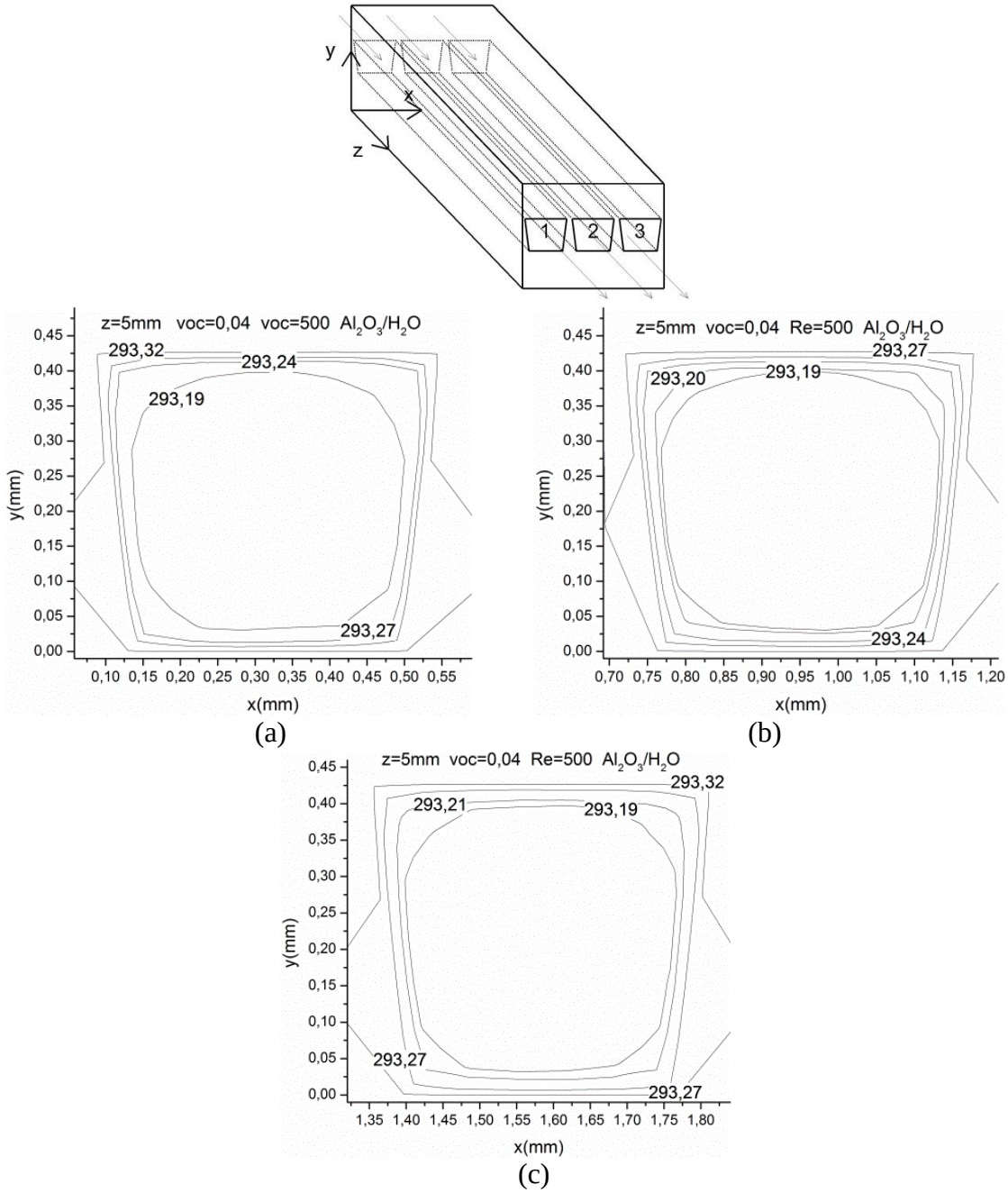
Re=500, voc=%4, n=3 ve z=2,5mm için



Ek Şekil 10. Kanalın 2,5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal ve (c) üçüncü kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

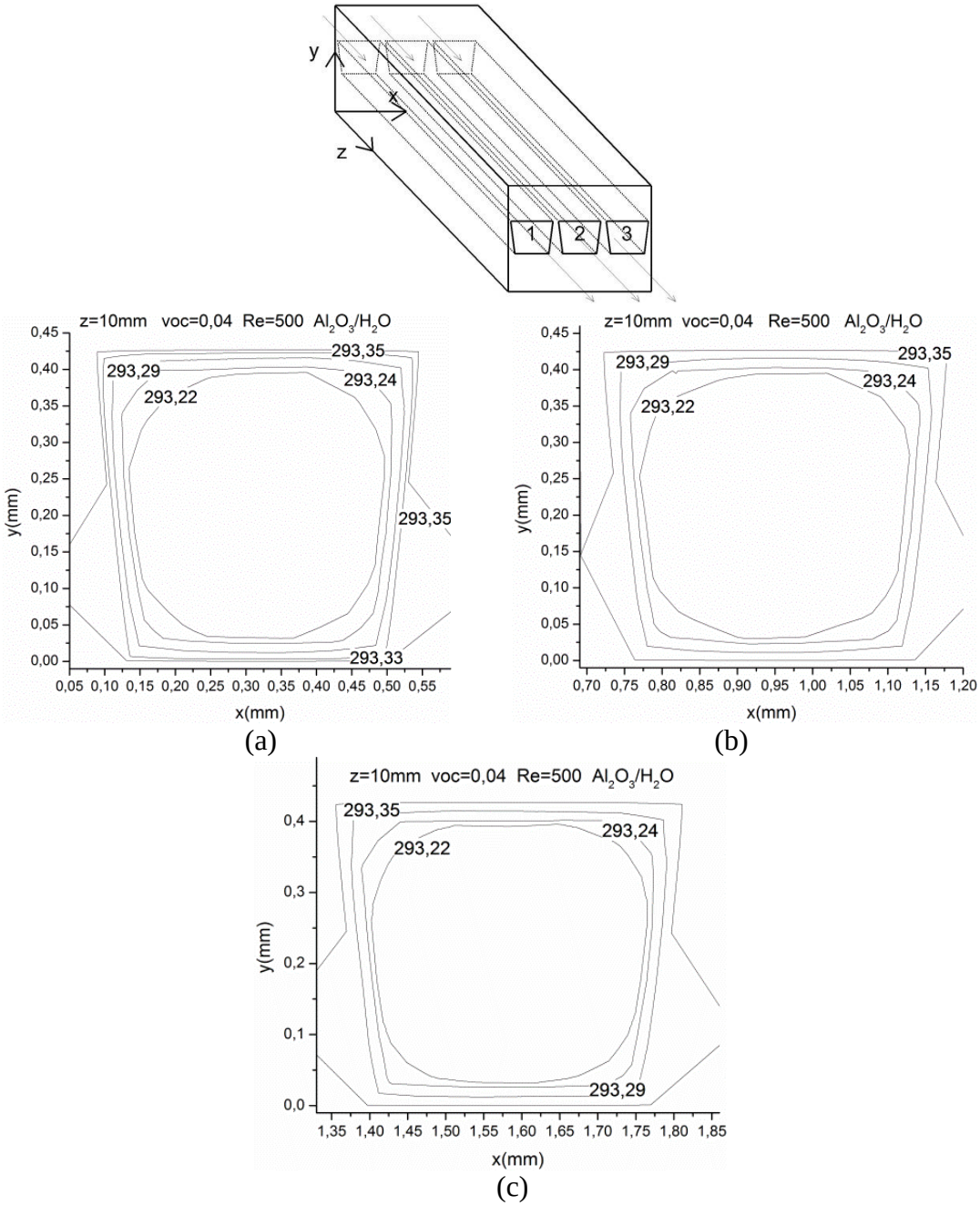
Re=500, voc=%4, n=3 ve z=5mm için



Ek Şekil 11. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal ve (c) üçüncü kanal için sıcaklık konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

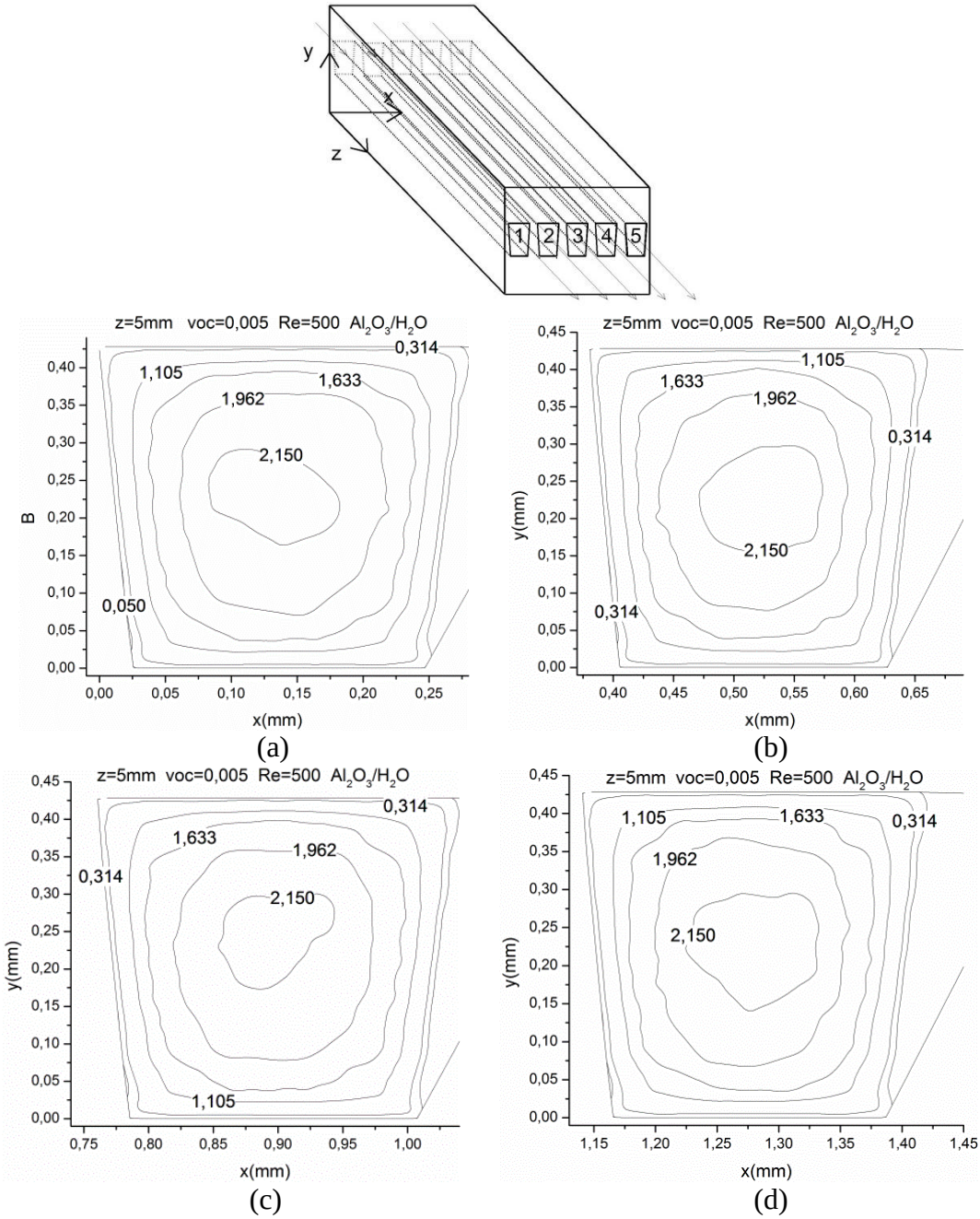
Re=500, voc=%4, n=3 ve z=10mm için



Ek Şekil 12. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal ve (c) üçüncü kanal için sıcaklık konturları

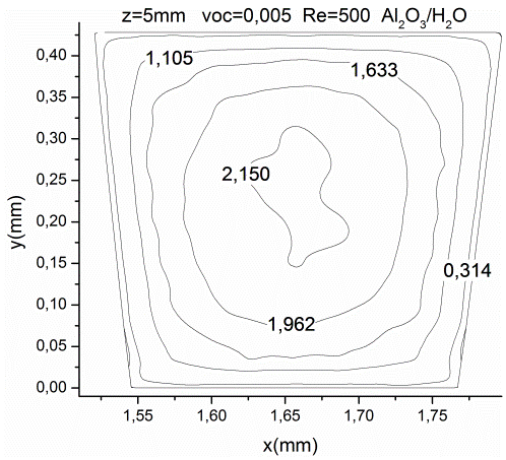
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Hız konturları; Re=500, voc=%0,5, n=5 ve z=5mm için



Ek Şekil 13. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %0,5 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

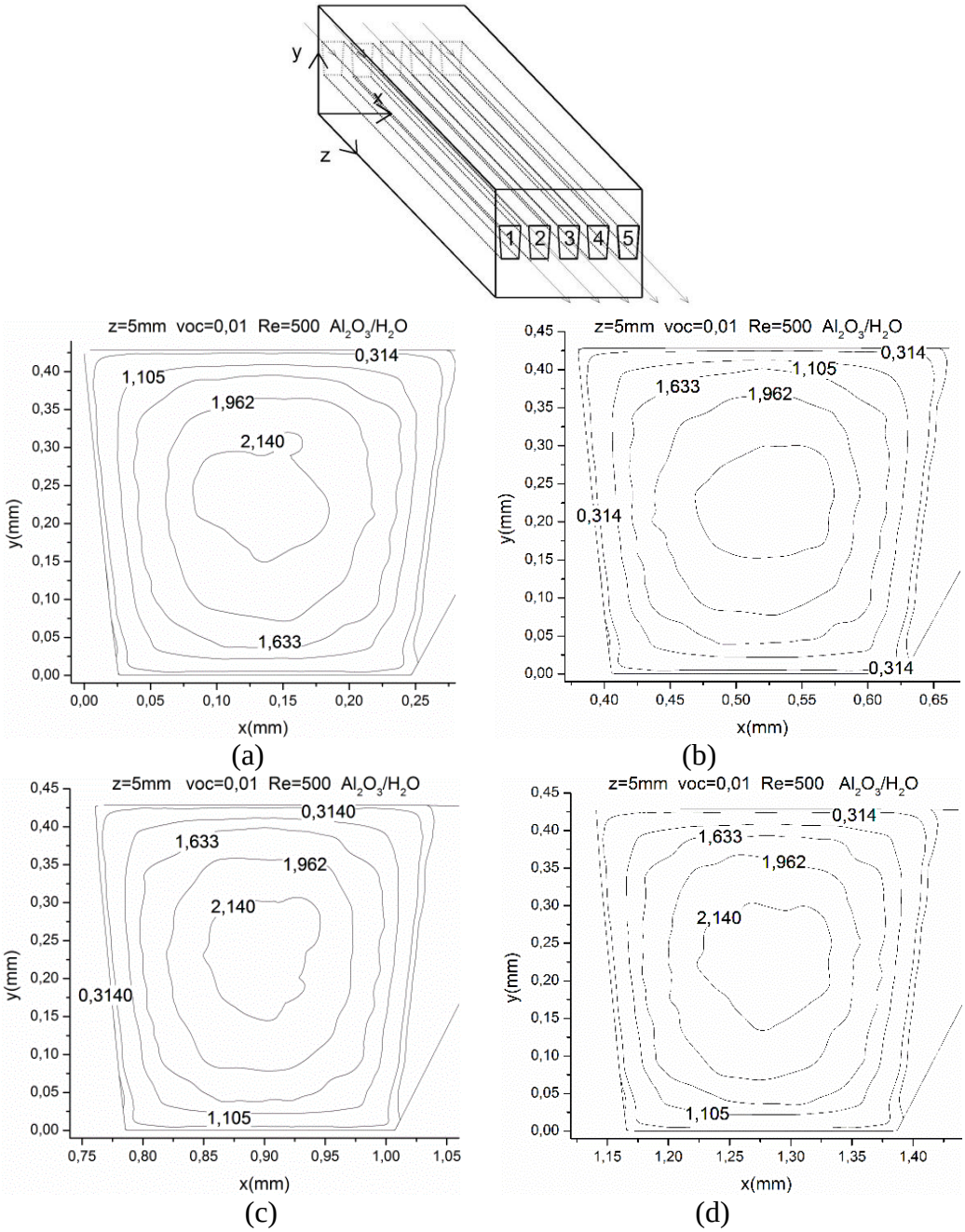


(e)

Ek Şekil 13. (Devam) Kanalın 5mm kesiti znde Re=500, %0,5 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

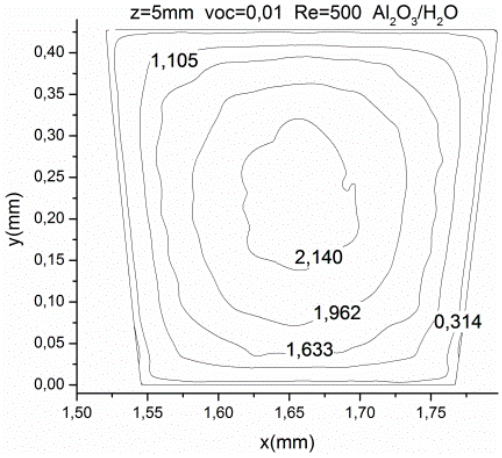
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=500, voc=%1, n=5 ve z=5mm için



Ek Şekil 14. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %1 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

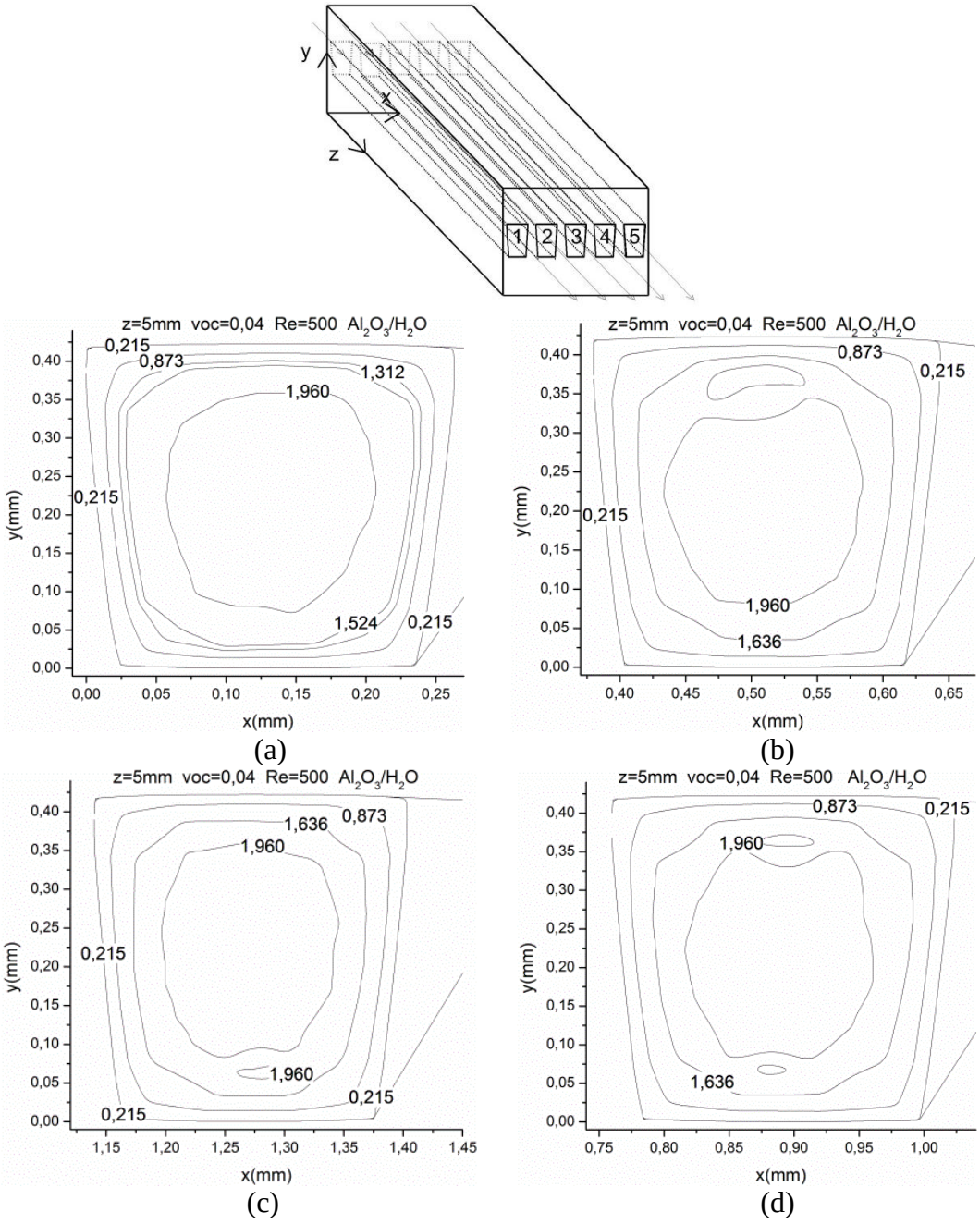


(e)

Ek Şekil 14. (Devam) Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %1 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve e. beşinci kanal için hız konturları

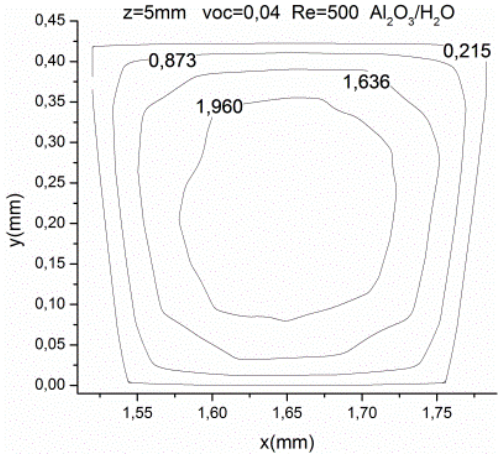
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=500, voc=%4, n=5 ve z=5mm için



Ek Şekil 15. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

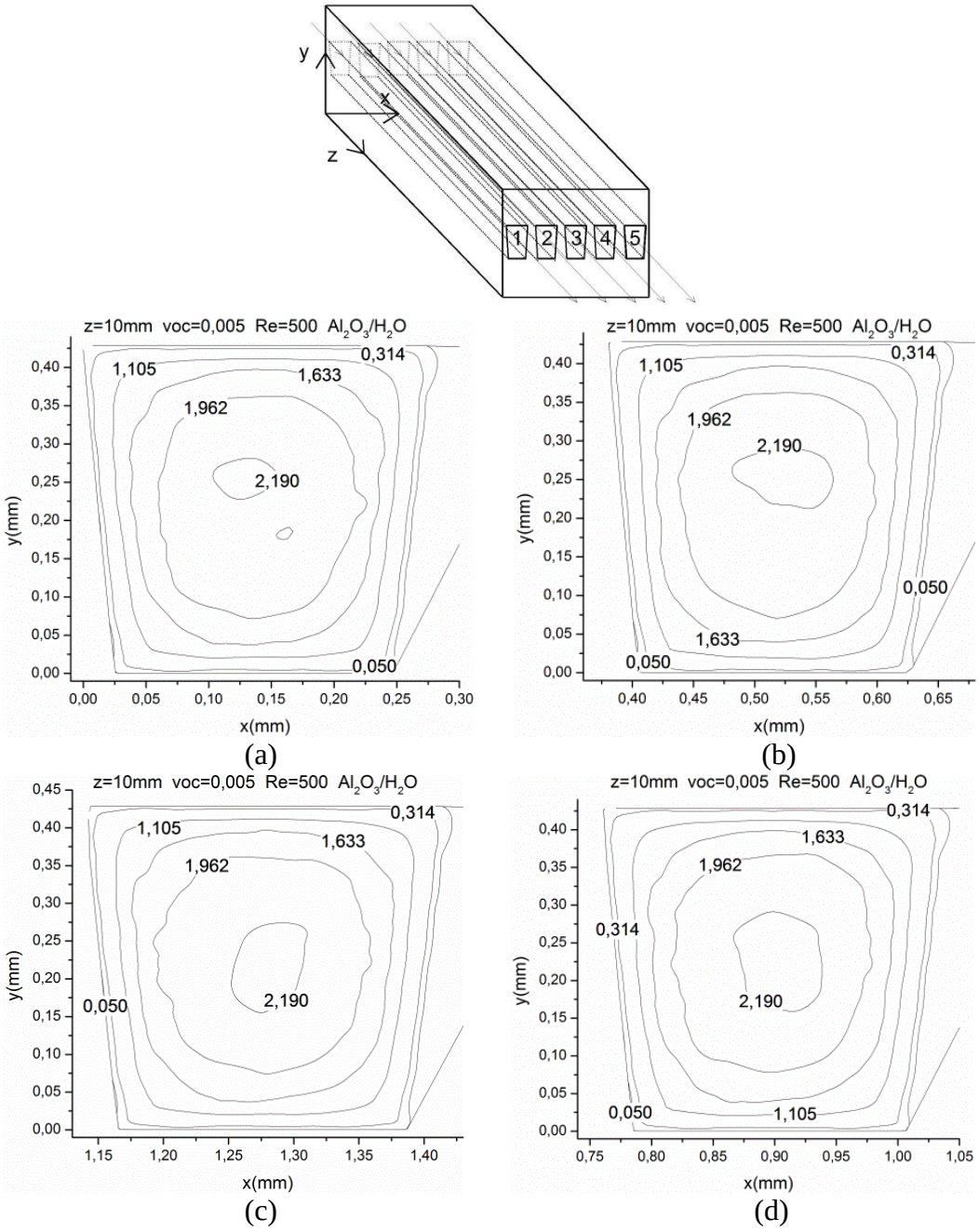


(e)

Ek Şekil 15. (Devam) Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

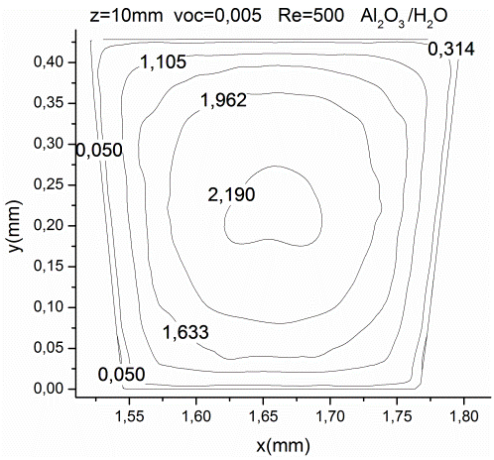
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=500, voc=%0,5, n=5 ve z=10mm (çıkış kesiti) için



Ek Şekil 16. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %0,5 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

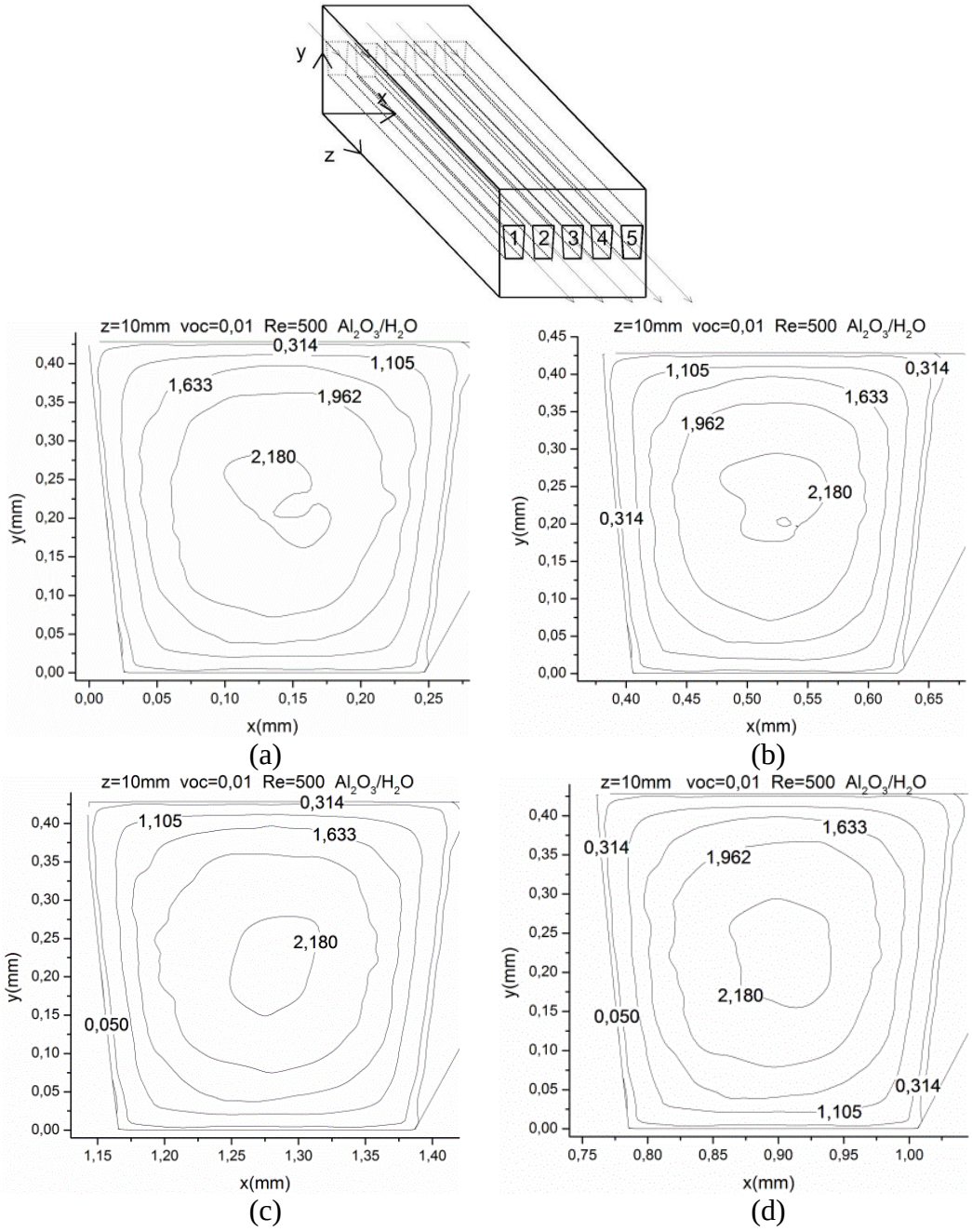


(e)

Ek Şekil 16. (Devam) Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %0,5 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

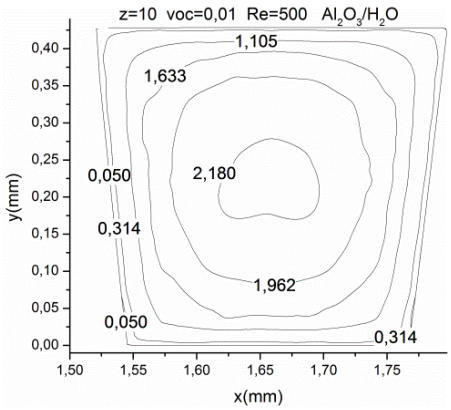
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=500, voc=%1, n=5 ve z=10mm (çıkış kesiti) için



Ek Şekil 17. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %1 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

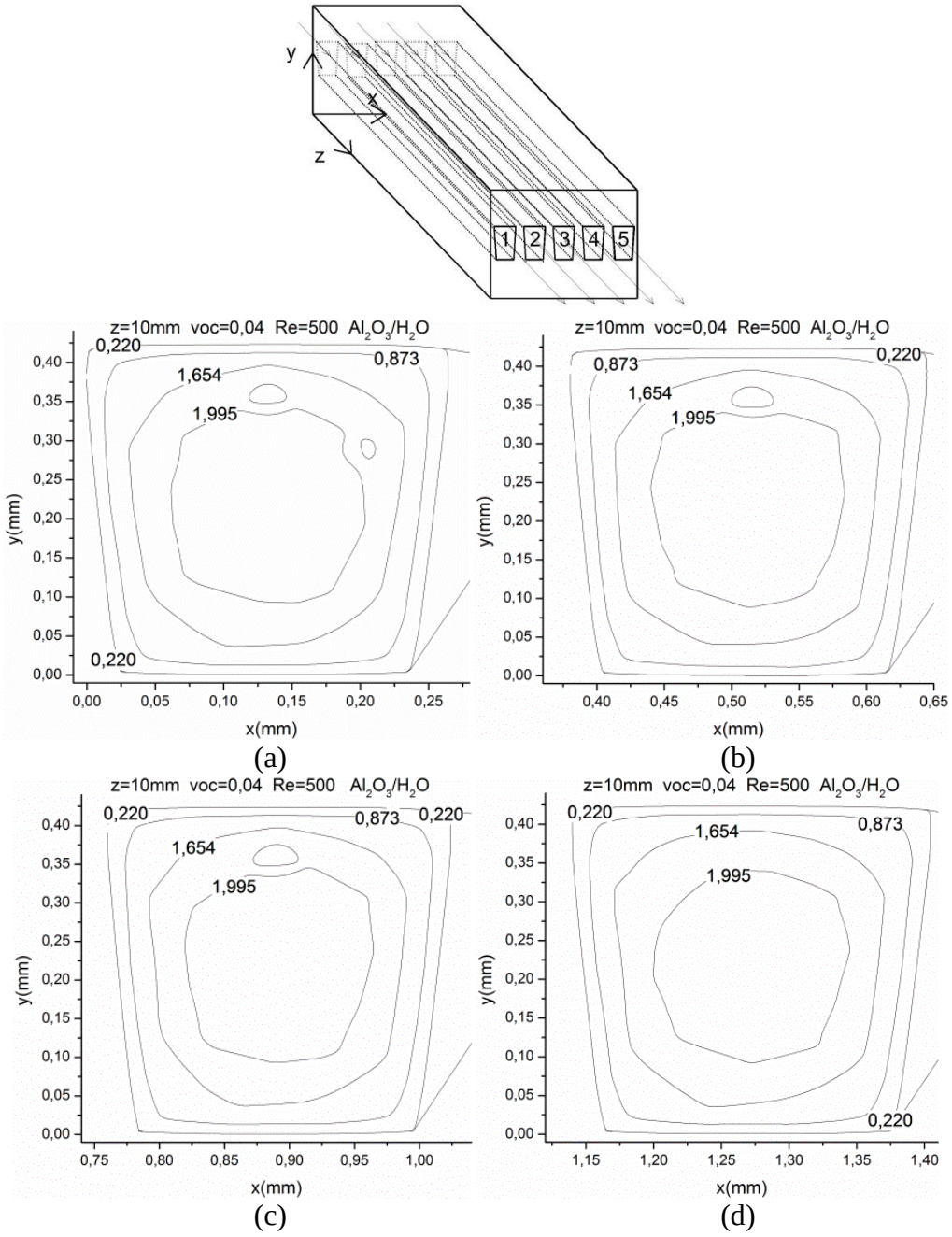


(e)

Ek Şekil 17. (Devam) Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %1 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

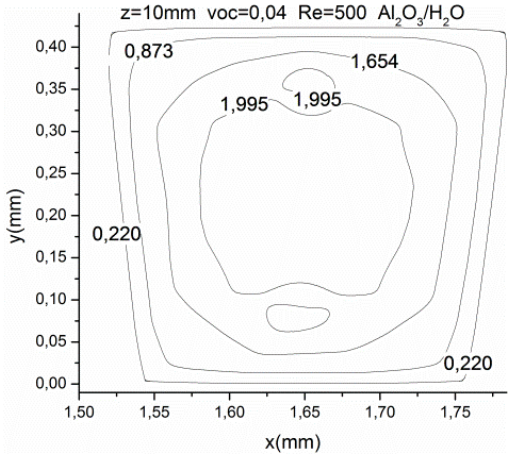
EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

Re=500, voc=%4, n=5 ve z=10mm (çıkış kesiti) için



Ek Şekil 18. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

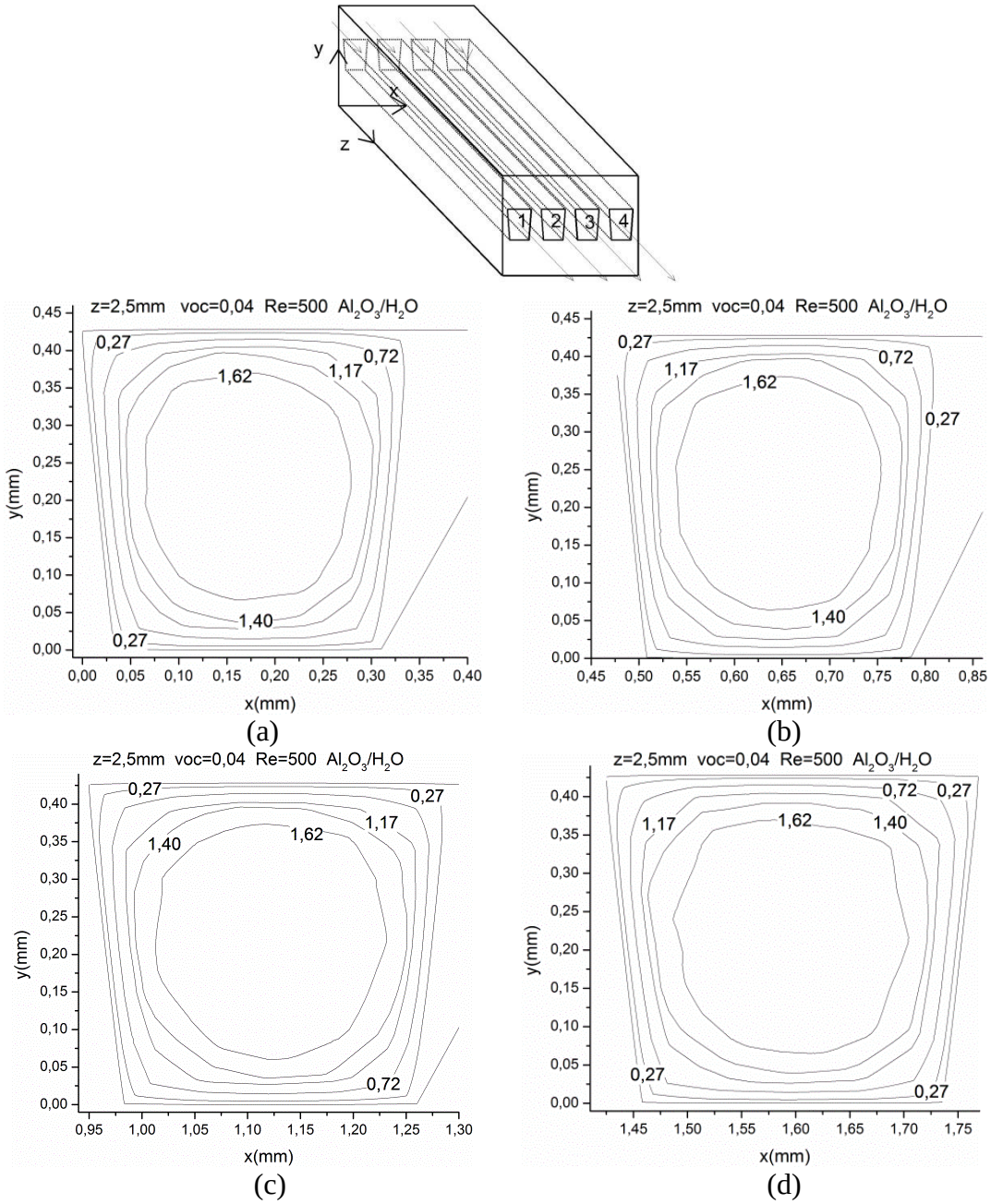


(e)

Ek Şekil 18. (Devam) Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal, (d) dördüncü kanal ve (e) beşinci kanal için hız konturları

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

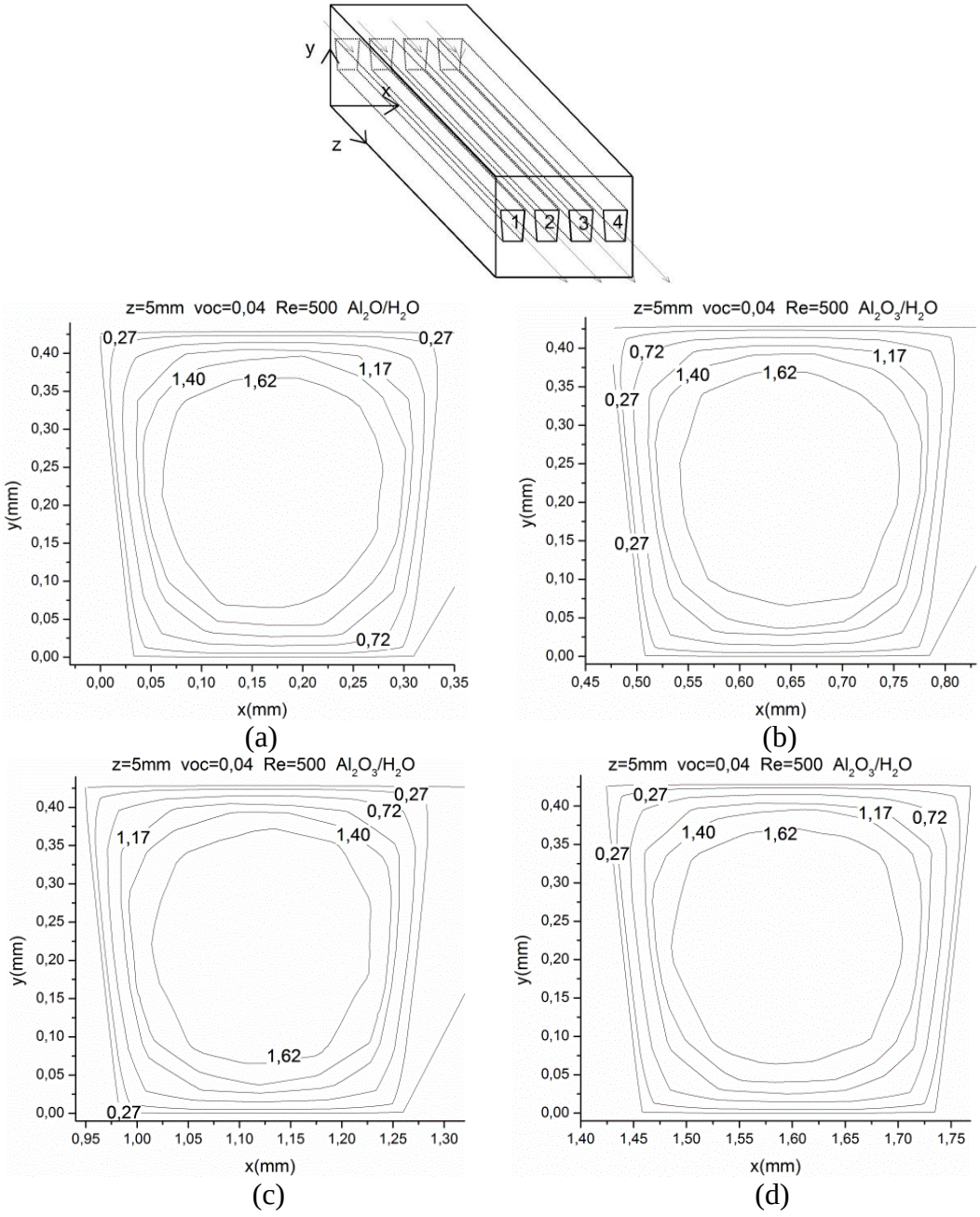
Re=500, voc=%4, n=4 ve z=2,5mm için



Ek Şekil 19. Kanalın 2,5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal ve (d) dördüncü kanal

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

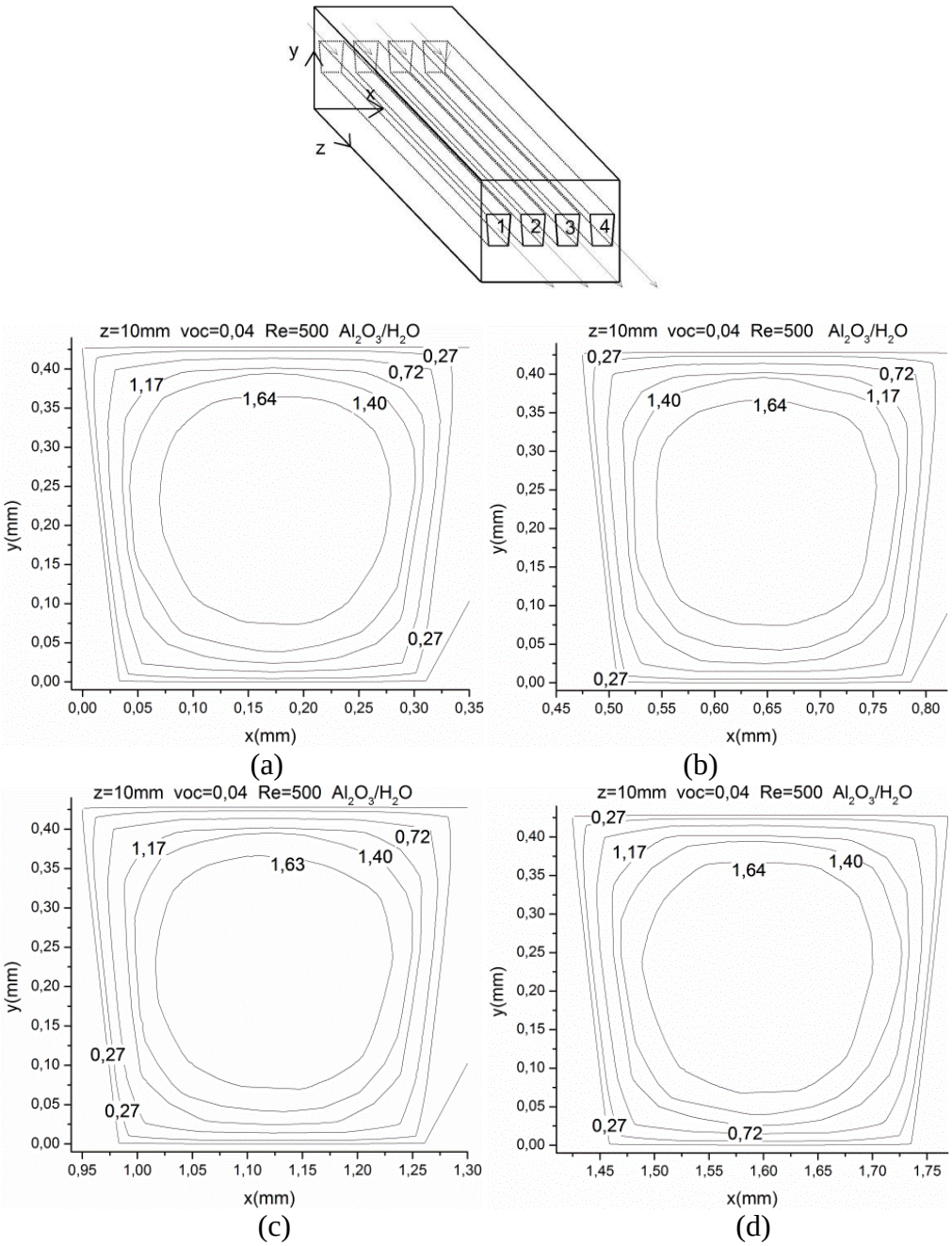
Re=500, voc=%4, n=4 ve z=5mm için



Ek Şekil 20. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal ve (d) dördüncü kanal

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

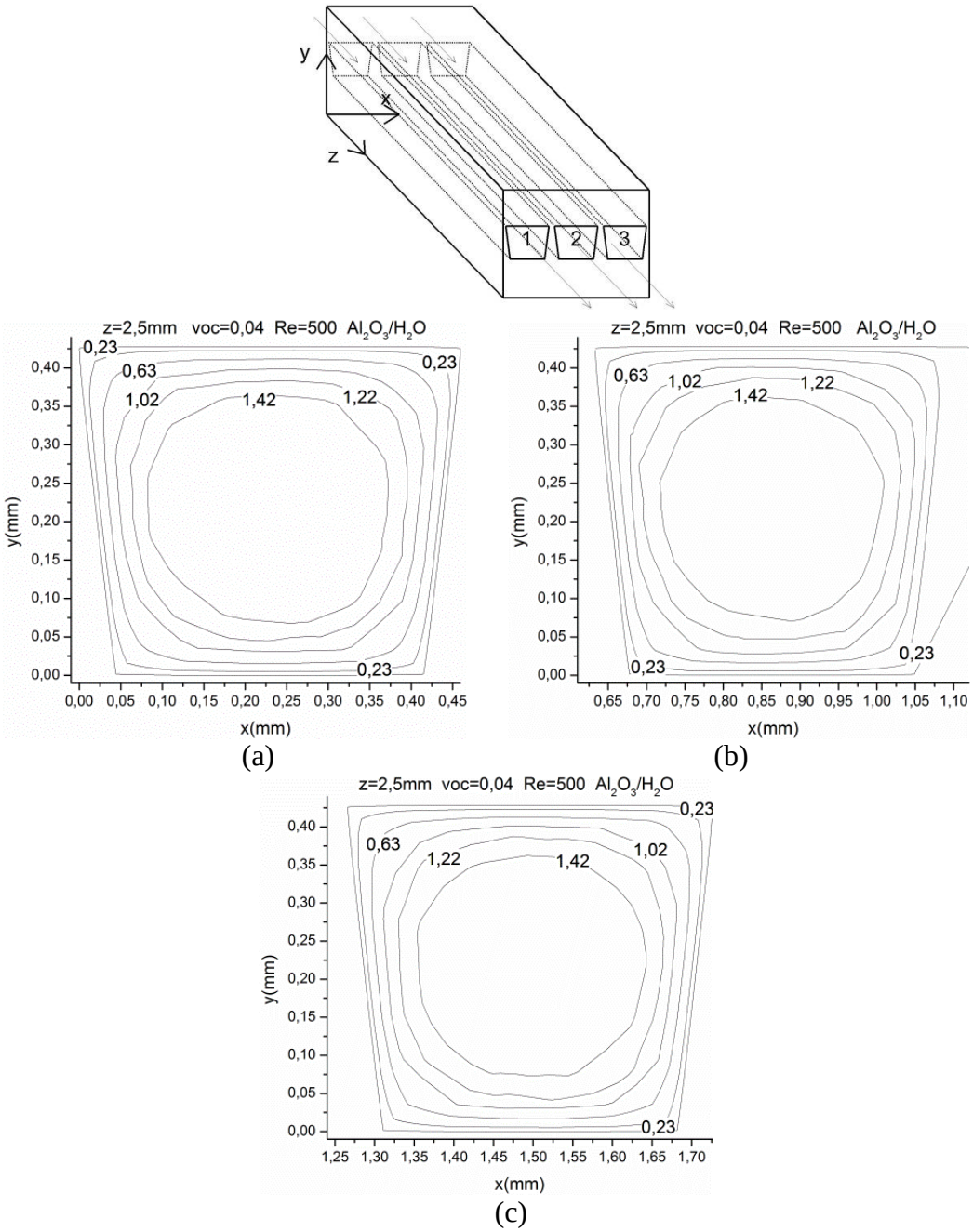
Re=500, voc=%4, n=4 ve z=10mm (çıkış kesiti) için



Ek Şekil 21. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal, (c) üçüncü kanal ve (d) dördüncü kanal

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

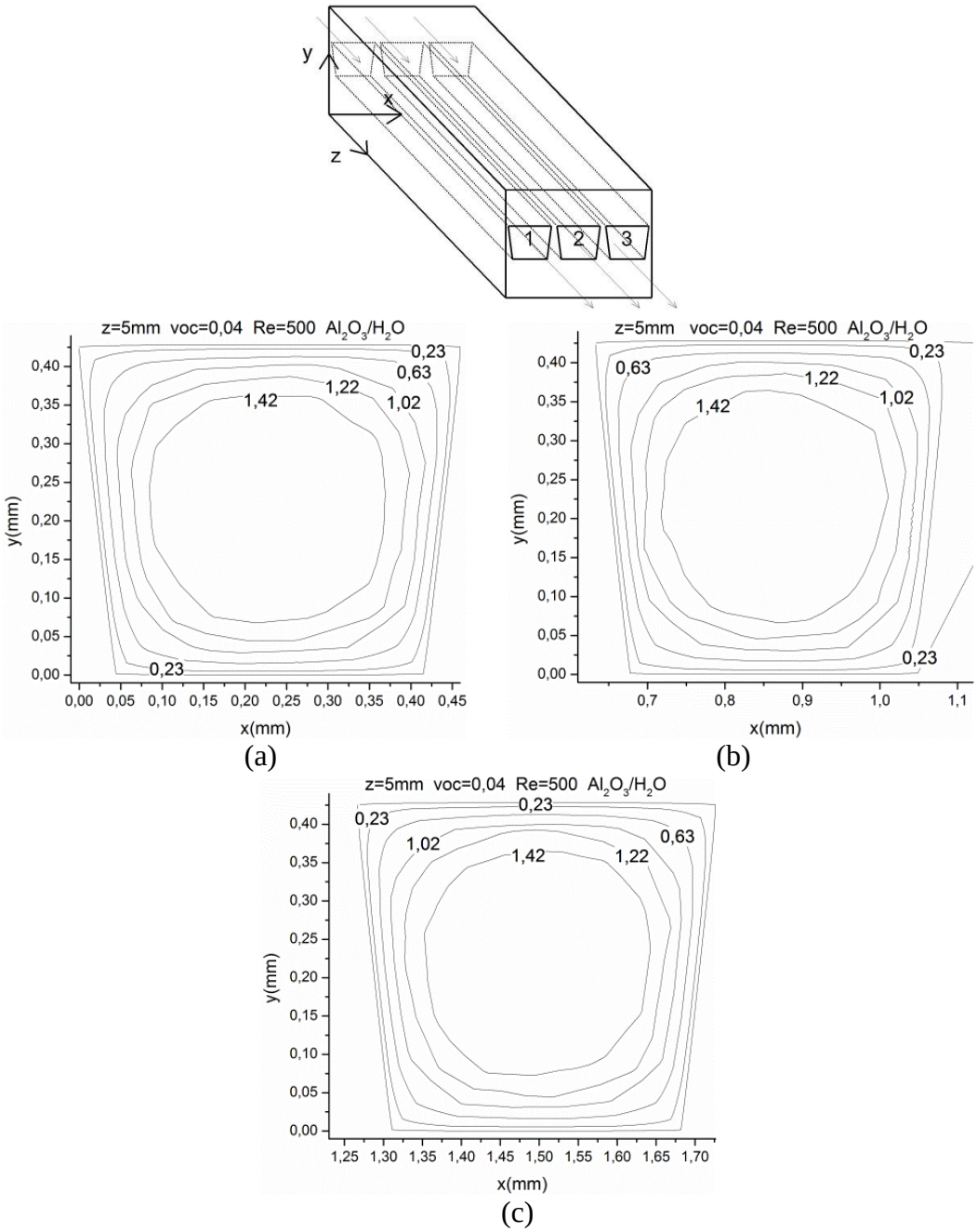
Re=500, voc=%4, n=3 ve z=2,5mm için



Ek Şekil 22. Kanalın 2,5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal ve (c) üçüncü kanal

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

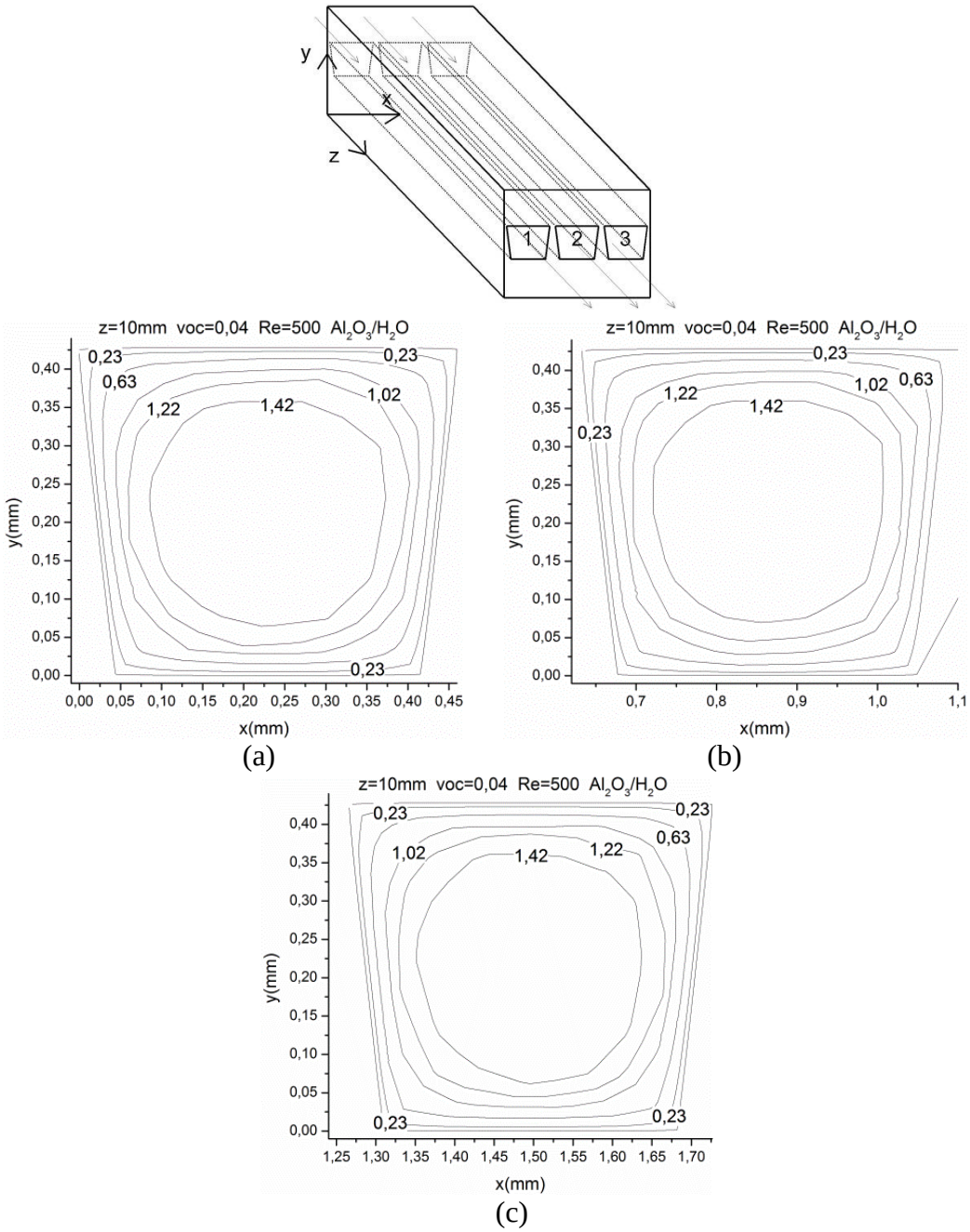
Re=500, voc=%4, n=3 ve z=5mm için



Ek Şekil 23. Kanalın 5mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal ve (c) üçüncü kanal

EK-1. (Devam) Al2O3-su nanoakışkanı için

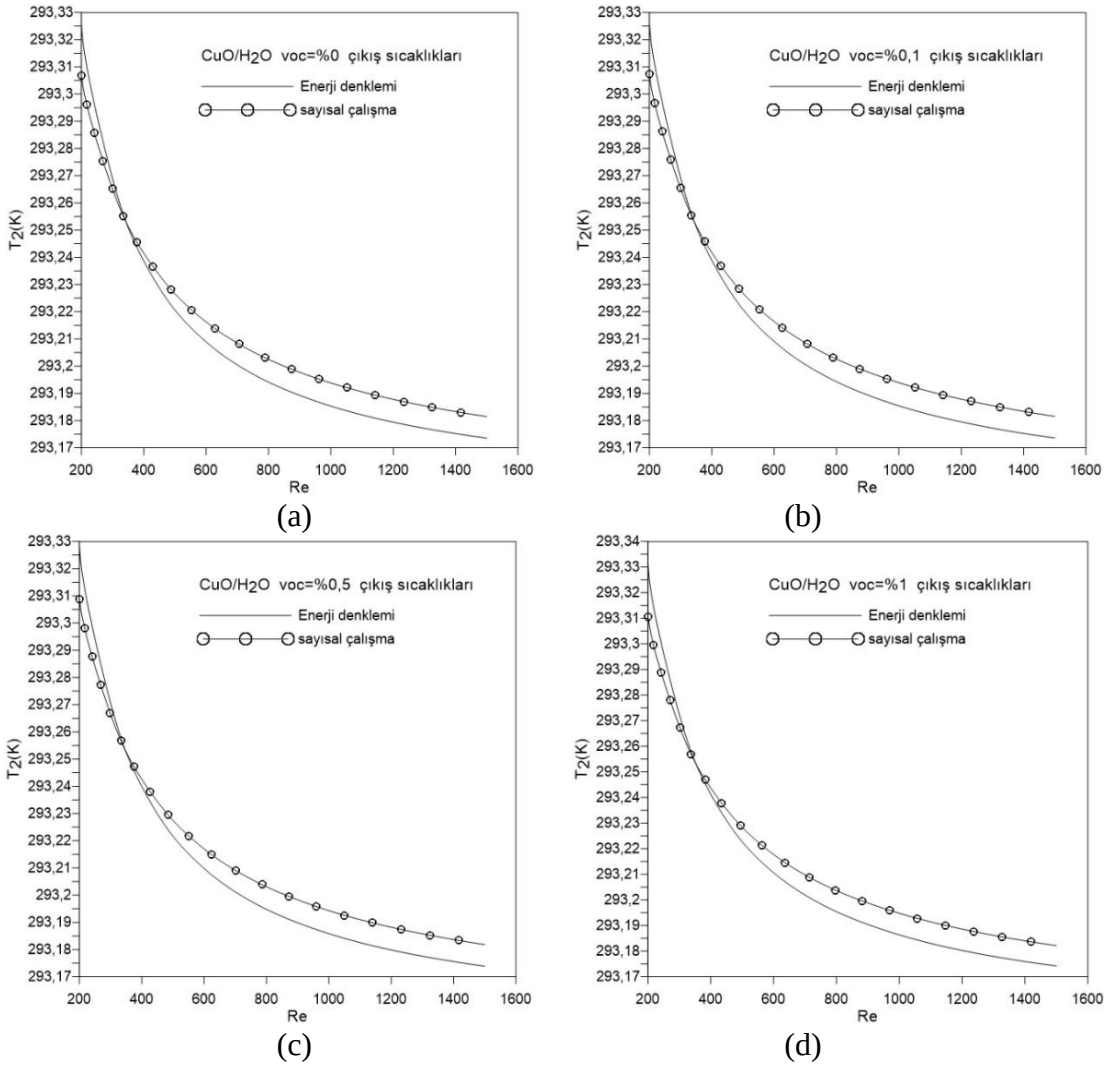
Re=500, voc=%4, n=3 ve z=10mm (çıkış kesiti) için



Ek Şekil 24. Kanalın 10mm kesitinde Re=500, %4 hacimsel oranı için (a) birinci kanal, (b) ikinci kanal ve (c) üçüncü kanal

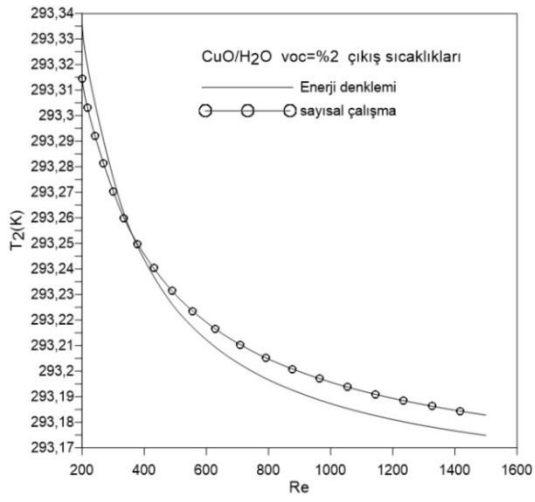
EK-2. CuO-su nanoakışkanı için sonuçlar

Isı değiştiricisindeki yamuk kesitli mikrokanal sayısının üç ve dört olması durumunda farklı yüzde hacimsel oranlarında nanoakışkanın mikrokanaldan çkış sıcaklıkları sırası ile Ek Şekil 25 ve Ek Şekil 26'de verilmiştir.

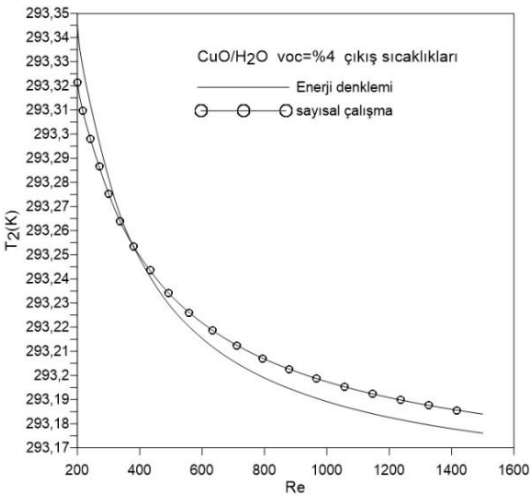


Ek Şekil 25. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, d. voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4

EK-2. CuO-su nanoakışkanı için sonuçlar



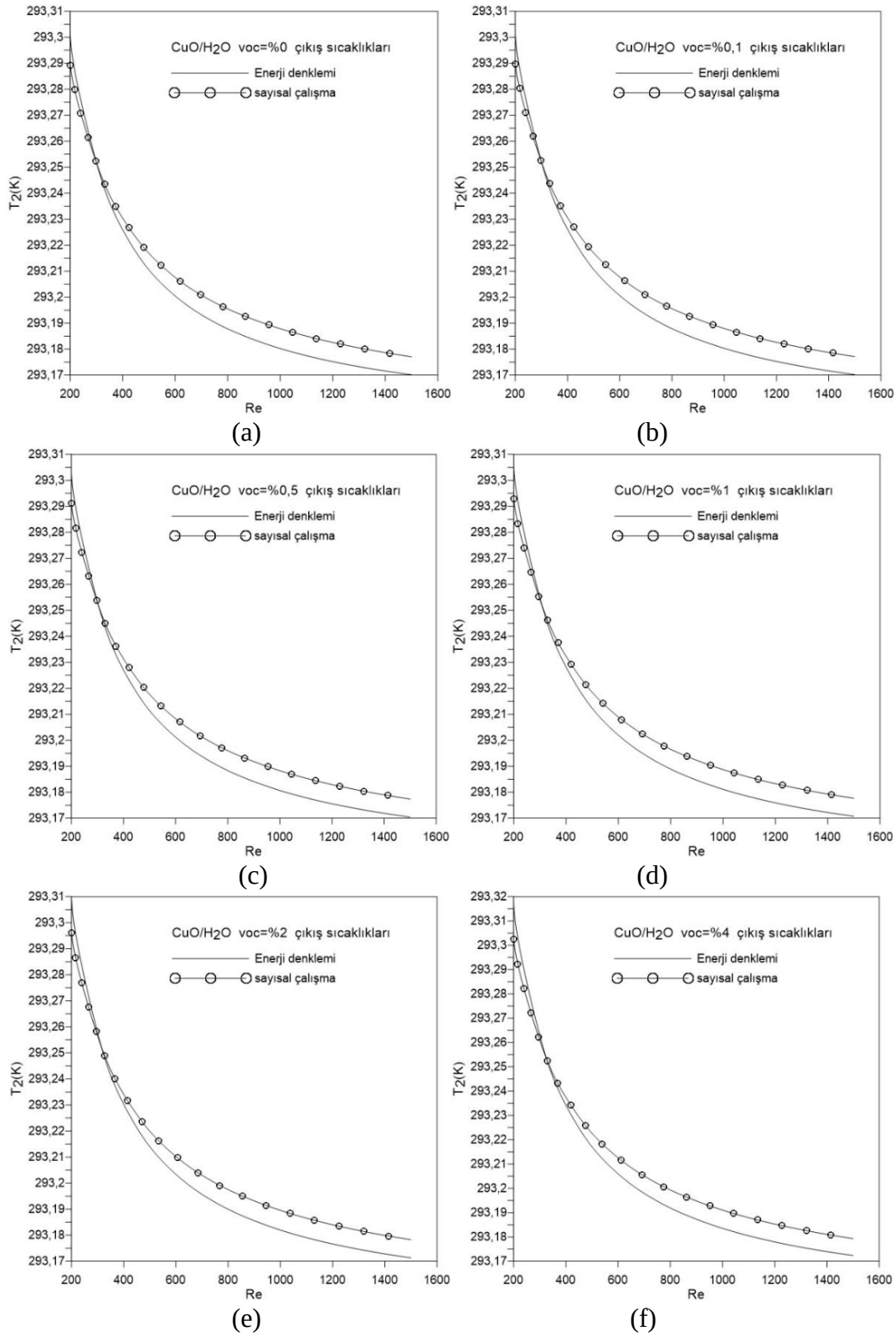
(e)



(f)

Ek Şekil 25. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, d. voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4

EK-2. CuO-su nanoakışkanı için sonuçlar



Ek Şekil 26. CuO-su nanoakışkanının farklı hacimsel yüzde oranlarındaki akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi: (a) voc=%0, (b) voc=%0,1, (c) voc=%0,5, (d) voc=%1, (e) voc=%2, (f) voc=%4

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: KHASTAR, Faraz
Uyruğu	: İranlı
Doğum tarihi ve yeri	: 01.12.1987, İran
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (535) 070 50 06
e-mail	: khastar.faraz@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Urmia Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2010
Lise	İran	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	İdealist Mühendislik	Proje Koordinatı

Yabancı Dil

İngilizce, Farsça

Yayınlar

Khastar, F. (2014). Dikdörtgen kesitli kanallarda laminar akış ve ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi. *Jurnal of Natural and Applied Science*, 18(1), 22-29.

Hobiler

Gitar, Kitap.



GAZİ GELECEKTİR..