

**HİDRODİNAMİK VE ISIL OLARAK GELİŞMEKTE OLAN
ALTIGEN KESİTLİ BİR KANALDA ISI TRANSFERİNİN
İNCELENMESİ**

Funda EROĞUL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2010

ANKARA

FUNDA EROĞUL tarafından hazırlanan HİDRODİNAMİK VE ISIL OLARAK GELİŞMEKTE OLAN ALTİGEN KESİTLİ BİR KANALDA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Oğuz TURGUT

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Oğuz TURGUT

.....

(Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Nevzat ONUR

.....

(Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. İrfan AR

(Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi)

.....

Tarih:/...../.....

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Funda EROĞUL

**HİDRODİNAMİK VE ISIL OLARAK GELİŞMEKTE OLAN
ALTIGEN KESİTLİ BİR KANALDA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Funda EROĞUL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2010**

ÖZET

Bu çalışmada hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan akış koşullarında, sabit yüzey sıcaklığına sahip ve sabit ısı akısı uygulanan altıgen kesitli kanalda laminar akış ve ısı transferinin üç boyutlu sayısal analizi üç farklı akışkan için gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu süreklilik, momentum ve enerji denklemleri Ansys Fluent 6.3.26 paket programı kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çalışma Reynolds sayısının 100 ile 800 değer aralığı için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada akışkan olarak hava ($Pr \approx 0,7$), su ($Pr \approx 7,6$) ve etilen glikol ($Pr \approx 236$) kullanılmıştır. Akışkan özellikleri sabit olarak kabul edilmiştir. Ortalama Nusselt sayıları ve ortalama Darcy sürtünme katsayıları Reynolds sayısının fonksiyonu olarak sunulmuştur. Yerel Nusselt sayıları ve Darcy sürtünme faktörleri kanal boyunca mesafenin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Hız ve sıcaklık dağılımları kanal boyunca farklı koşullarda sunulmuştur. Hava, su ve etilen glikol akışkanları ile yapılan sayısal hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mevcut sonuçların literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.065
Anahtar Kelimeler :Laminer akış, altıgen kesitli kanal, zorlanmış konveksiyon, fluent, ısı transferi
Sayfa Adedi : 136
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Oğuz TURGUT

**INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICALLY AND THERMALLY
DEVELOPING FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER IN A
HEXAGONAL DUCT
(M.Sc. Thesis)**

Funda EROĞUL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2010**

ABSTRACT

In this study three dimensional laminar forced convective flow and heat transfer in a hexagonal channel are investigated for three different fluids under hydrodynamically and thermally developing flow conditions. Three dimensional continuity, momentum and energy equations are solved numerically using commercial CFD code Ansys Fluent 6.3.26. Numerical study is carried out for Reynolds number range of 100 through 800. Air ($Pr \approx 0,7$), water ($Pr \approx 7,6$) and ethylene glycol ($Pr \approx 236$) are used as working fluids. Fluid properties are taken as constant. Average Nusselt number and Darcy friction factors are presented as a function of Reynolds number. Local Nusselt numbers and Darcy friction factors are plotted as a function of distance along the channel. Velocity and temperature profiles are presented along the channel for different conditions. Results obtained from numerical calculations are compared to each other. It is seen that recent results are compatible with the literature.

Science Code : 914.1.065

Key Words : Laminar flow, hexagonal channel, forced convection, heat transfer, fluent

Page Number : 136

Adviser : Assist. Prof. Dr. Oğuz TURGUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince ayırdığı değerli zamanı, desteği ve katkıları ile beni yönlendiren, hiçbir yardımı esirgemeyen danışmanım ve hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Oğuz Turgut’a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında kıymetli tecrübelerinden faydalandığım ve değerli yardımları ile beni yönlendiren hocam Sn. Prof. Dr. Nevzat Onur’a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında Fluent paket programının kullanımında verdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı Sn. Arş. Gör. Y. Müh. Kamil Arslan’a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen Roketsan’daki çalışma arkadaşlarım ve Sn. Suzan Koç’a teşekkürlerimi borç bilirim.

Eğitimim süresince her türlü destek ve imkanı sağlayan, manevi destekleriyle hep yanımda olan, rahmetli canım babam Birtan Eroğul başta olmak üzere Eroğul ailesi değerli üyeleri Nahide, Fulya, Muhlis, Fatma ve Hülya Eroğul’a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. ÇALIŞMANIN AMACI VE PROBLEMİN FİZİKSEL TANIMI.....	9
4. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON VE ÇÖZÜM YÖNTEMİ.....	12
4.1. Problemin Tanımı.....	12
4.2. Temel Denklemler.....	13
4.3. Sınır Koşulları.....	15
4.4. Sayısal Çözüm Yöntemi.....	16
4.4.1. Hücre (Mesh) oluşturma ve hücre optimizasyonu.....	16
4.4.2. Hücre (Mesh) yapısı.....	17
4.4.3. Çözücü modelinin ve diğer eşitliklerin seçimi.....	18
4.4.4. Akışkan özellikleri.....	18
4.4.5. Sayısal interpolasyon şemaları.....	19
4.4.6. Relaksasyon faktörleri.....	19

	Sayfa
4.4.7. Yakınsama kriterlerinin belirlenmesi	20
4.5. Hesaplanacak Değerler.....	21
4.5.1. Ortalama Nusselt sayısı	21
4.5.2. Ortalama Darcy sürtünme faktörü.....	23
4.5.3. Yerel Nusselt sayısı	23
4.5.4. Yerel Darcy sürtünme faktörü.....	24
4.5.5. Reynolds sayısı.....	24
4.5.6. Boyutsuz sıcaklık.....	25
5. SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	27
5.1. Hava İçin ($Pr=0,7$) Sonuçlar.....	27
5.1.1. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında hava akışkanı için sonuçlar ...	27
5.1.2. Sabit yüzey ısı akısı sınır şartında hava akışkanı için sonuçlar	42
5.1.3. Altıgen kesitli kanalda hava akışkanı için sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sonuçlarının kıyaslanması	55
5.2. Su İçin ($Pr=7,6$) Sonuçlar.....	58
5.2.1. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında su akışkanı için sonuçlar	58
5.2.2. Sabit ısı akısı sınır şartında su akışkanı için sonuçlar	73
5.2.3. Altıgen kesitli kanalda su akışkanı için sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu sonuçlarının kıyaslanması	86
5.3. Etilen Glikol İçin ($Pr=236$) Sonuçlar.....	89
5.3.1. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında etilen glikol için sonuçlar	89
5.3.2. Sabit yüzey ısı akısı sınır şartında etilen glikol akışkanı için sonuçlar	104

Sayfa

5.3.3. Altıgen kesitli kanalda etilen glikol akışkanı için sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşullarının kıyaslanması.....	117
5.4. Hava, Su ve Etilen Glikol İçin Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	120
5.4.1. Sabit sıcaklık	120
5.4.2. Sabit ısı akısı	123
5.4.3. Sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sonuçlarının değerlendirilmesi...	126
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	131
KAYNAKLAR.....	133
ÖZGEÇMİŞ.....	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1.	Çalışmada kullanılan relaksasyon faktörleri.....20
Çizelge 4.2.	Fluent programında kullanılan yakınsama kriterleri.....20
Çizelge 5.1.	Hava akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulunda ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin için hücre sayısına bağlı olarak değişimi.....27
Çizelge 5.2.	Sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması30
Çizelge 5.3.	Hava akışkanının sabit ısı akısı duvar koşulu için elde edilen ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi42
Çizelge 5.4.	Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanı için elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması45
Çizelge 5.5.	Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanına ait ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi58
Çizelge 5.6.	Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür sonuçları ile karşılaştırılması.....61
Çizelge 5.7.	Sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi73
Çizelge 5.8.	Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması76
Çizelge 5.9.	Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi89
Çizelge 5.10.	Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması92

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.11.	Ortalama Nusselt Sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi.....104
Çizelge 5.12.	Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması.....107
Çizelge 5.13.	Sabit sıcaklık koşulu için tüm akışkanlara ait tam gelişmiş akış şartlarındaki yerel Nusselt ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....123
Çizelge 5.14.	Sabit ısı akısı koşulu için tüm akışkanlara ait tam gelişmiş akış şartlarındaki yerel Nusselt ve Darcy sürtünme faktörü değerleri.....126
Çizelge 5.15.	Tüm akışkanlara ait elde edilen analiz sonuçları (a) hava akışkanı, (b) su akışkanı, (c) etilen glikol akışkanı.....127
Çizelge 5.16.	Çalışmada incelenen farklı Prandtl sayısına sahip akışkanlara ait ısı ve hidrodinamik kanal giriş uzunlukları.....128

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Altıgen kesitli kanalın (a) genel görünümü (b) kesit görünümü ve (c) simetrik görünümü.....	11
Şekil 4.1. Koordinat sistemi ve altıgen kanal geometrisi kesiti.....	13
Şekil 4.2. Altıgen kesitli kanaldaki eksenel-simetrik, izometrik akış alanı görünüşü.....	18
Şekil 5.1. Hava akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi.....	28
Şekil 5.2. Hava akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi.....	29
Şekil 5.3. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanı için kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	30
Şekil 5.4. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanı için ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi.....	31
Şekil 5.5. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	32
Şekil 5.6. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	33
Şekil 5.7. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	33
Şekil 5.8. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde farklı x-mesafelerinde sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	34
Şekil 5.9. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde farklı x-mesafelerinde sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	34

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. Hava akışkanının $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için hız profilleri.....	35
Şekil 5.11. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için hava akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	36
Şekil 5.12. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için hava akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	36
Şekil 5.13. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	38
Şekil 5.14. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanın $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$	38
Şekil 5.15. Sabit sıcaklık koşulunda hava akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y - z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	39
Şekil 5.16. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı y -kesitlerinde kanal boyunca sıcaklık dağılımları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	40
Şekil 5.17. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y - z kesitindeki sıcaklık dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	41
Şekil 5.18. Hava akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi.....	43
Şekil 5.19. Hava akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanına ait kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	45
Şekil 5. 21. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanı için elde edilen Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi	46
Şekil 5.22. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	47
Şekil 5.23. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	48
Şekil 5.24. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	48
Şekil 5.25. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	49
Şekil 5.2.6 $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	49
Şekil 5.27. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri	50
Şekil 5.28. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için hava akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	51
Şekil 5.29. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için hava akışkanının farklı x- mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 5.30. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	53
Şekil 5.31. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	54
Şekil 5.32. Sabit ısı akısı koşulunda hava akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	54
Şekil 5.33. Hava akışkanı için ortalama Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırılması.....	55
Şekil 5.34. Hava akışkanı için yerel Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması.....	56
Şekil 5. 35. Hava akışkanı için ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayıları ile değişiminin sabit sıcaklık ve ısı akısı koşulu için karşılaştırılması.....	56
Şekil 5.36. Hava akışkanı için yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit sıcaklık ve ısı akısı koşulu için farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması.....	57
Şekil 5.37. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi	59
Şekil 5. 38. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi	60
Şekil 5.39. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	61
Şekil 5.40. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi	62

Şekil	Sayfa
Şekil 5. 41. Re=100 için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	63
Şekil 5.42. Re=800 için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri.....	64
Şekil 5.43. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için su akışkanına ait hız profilleri.....	64
Şekil 5.44. Re=100 için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri.....	65
Şekil 5.45. Re=800 için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri.....	65
Şekil 5.46. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	66
Şekil 5.47. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde Re=100 için su akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi	67
Şekil 5.48. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde Re=800 için su akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi	67
Şekil 5.49. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının Re=800 için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	68
Şekil 5. 50. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının Re=100 için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,1$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	69

Şekil	Sayfa
Şekil 5. 51. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanına ait farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	70
Şekil 5.52. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının $Re=800$ için farklı y-z kesitlerinde kanal boyunca sıcaklık dağılımları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	71
Şekil 5.53. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki sıcaklık dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	72
Şekil 5.54. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi	74
Şekil 5.55. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi	75
Şekil 5.56. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	76
Şekil 5.57. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi.....	77
Şekil 5.58. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri.....	78
Şekil 5.59. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x- mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	79
Şekil 5.60. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	79
Şekil 5.61. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	80

Şekil	Sayfa
Şekil 5.62. Re=800 için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	80
Şekil 5.63. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için su akışkanına ait hız profilleri	81
Şekil 5.64. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde Re=100 için su akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi	81
Şekil 5.65. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde Re=800 için su akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi	82
Şekil 5.66. Sabit ısı akısı duvar koşullarında su akışkanının Re=800 için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	83
Şekil 5.67. Sabit ısı akısı duvar koşullarında su akışkanının Re=100 için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	84
Şekil 5.68. Sabit ısı akısı duvar koşullarında su akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları (a) Re=100, (b) Re=400, (c) Re=800	85
Şekil 5.69. Su akışkanının ortalama Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayıları için karşılaştırması.....	86
Şekil 5.70. Su akışkanı için yerel Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) Re=100, (b) Re=800 karşılaştırması.	87
Şekil 5.71. Su akışkanının ortalama Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayıları için karşılaştırması.....	87

Şekil	Sayfa
Şekil 5.72. Su akışkanı için yerel Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması.....	88
Şekil 5.73. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi	90
Şekil 5.74. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi.....	91
Şekil 5.7.5 Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	92
Şekil 5.76. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi	93
Şekil 5.77. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri	94
Şekil 5.78. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri	95
Şekil 5.79. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri.....	95
Şekil 5.80. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x- mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri.....	96
Şekil 5.81. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri.....	96
Şekil 5.82. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri.....	97

Şekil	Sayfa
Şekil 5.83. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için etilen glikol akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	98
Şekil 5.84. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için etilen glikol akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	98
Şekil 5.85. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	99
Şekil 5.86. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	100
Şekil 5.87. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y - z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	101
Şekil 5.88. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının $Re=100$ için farklı y - z kesitlerinde kanal boyunca sıcaklık dağılımları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	102
Şekil 5.89. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y - z kesitindeki sıcaklık dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$	103
Şekil 5.90. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi.....	105
Şekil 5.91. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi.....	106
Şekil 5.92. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	107
Şekil 5.93. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi.....	108

Şekil	Sayfa
Şekil 5.94. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x- mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri	109
Şekil 5.95. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri	109
Şekil 5.96. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x- mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri.....	110
Şekil 5.97. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri	110
Şekil 5.98. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri	111
Şekil 5.99. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri.....	111
Şekil 5.100. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için etilen glikol akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi.....	113
Şekil 5.101. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için etilen glikol akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi	113
Şekil 5.102. Sabit ısı akısı duvar koşulunda etilen glikolün $Re=800$ için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	114
Şekil 5.103. Sabit ısı akısı duvar koşulunda etilen glikolün $Re=100$ için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$	115
Şekil 5.104. Sabit ısı akısı duvar koşulunda etilen glikolün farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları.....	116

Şekil	Sayfa
Şekil 5.105. Etilen glikol akışkanı için ortalama Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması.....	117
Şekil 5.106. Etilen glikol akışkanı için yerel Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması	118
Şekil 5.107. Etilen glikol akışkanı için ortalama Darcy sürtünme faktörünün sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması.....	118
Şekil 5.108. Etilen glikol akışkanı için yerel Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması	119
Şekil 5.109. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait farklı Reynolds sayılarına karşılık gelen ortalama Nusselt değerleri.....	121
Şekil 5.110. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Nusselt değerlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırılması	121
Şekil 5.111. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı akışkan için Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi.....	122
Şekil 5.112. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Darcy sürtünme faktörlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırılması	122
Şekil 5.113. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait farklı Reynolds sayılarına karşılık gelen ortalama Nusselt değerleri	124
Şekil 5.114. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Nusselt değerlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırılması.....	124
Şekil 5.115. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı akışkan için Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi	125

Şekil	Sayfa
Şekil 5.116. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Darcy sürtünme faktörlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırılması.....	125
Şekil 5.117. Kanal girişinden itibaren $x=0,1$ m mesafesinde sabit sıcaklık duvar koşulu için hava, su ve etilen glikol akışkanlarına ait (a) hidrodinamik ve (b) ısıl sınır tabakası kalınlıkları.....	129
Şekil 5.118. Kanal girişinden itibaren $x=0,1$ m mesafesinde sabit ısı akısı duvar koşulu için hava, su ve etilen glikol akışkanlarına ait (a) hidrodinamik ve (b) ısıl sınır tabakası kalınlıkları.....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Altıgen kesitli kanalın bir kenarının uzunluğu, m
A_c	Kesit alanı, m^2
A_s	Kanal yüzey alanı, m
c_p	Sabit basınçta özgül ısı, $kJ / kg.K$
D_h	Hidrolik çap, m
f_m	Ortalama Darcy sürtünme faktörü
f_x	Yerel Darcy sürtünme faktörü
h_m	Ortalama ısı transfer katsayısı, $W/m^2. K$
h_x	Yerel ısı transfer katsayısı, $W/m^2. K$
k	Isı iletim katsayısı, $W/m.K$
L	Kanal uzunluğu, m
L_h, L_T	Hidrodinamik ve ısı kanal giriş uzunlukları, m
$\dot{m}$	Kütleli debi, kg/s
Nu_m	Ortalama Nusselt sayısı
Nu_x	Yerel Nusselt sayısı
Re	Reynolds sayısı
P	Basınç, Pa
$\bar{P}$	Ortalama basınç, Pa
$\bar{P}_i, \bar{P}_o$	Kanal girişindeki ve çıkışındaki ortalama basınç, Pa
U	Kesit alanında havanın ortalama hızı, m/s
ρ	Yoğunluk, kg/m^3

Simgeler	Açıklama
T	Sıcaklık, K
$T_{giriş}$	Kanal girişindeki sıcaklık, K
T_m	Ortalama sıcaklık, K
T_b	Ortalama akışkan sıcaklığı, K
T_{mi}	Kanal girişindeki ortalama sıcaklık, K
T_{mo}	Kanal çıkışındaki ortalama sıcaklık, K
T_w	Duvar sıcaklığı, K
U_m	Akışkanın kanal içindeki ortalama hızı, m/s
U_x	x-mesafesindeki ortalama hız, m/s
u	x-yönündeki hız bileşeni, m/s
v	y-yönündeki hız bileşeni, m/s
w	z-yönündeki hız bileşeni, m/s
q''	Sabit ısı akısı, W/m ²
q_x''	x-mesafesindeki ısı akısı, W/m ²
$\dot{Q}$	Toplam ısı transferi, W
ΔT_{ln}	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı, K
ΔP	Basınç düşümü, Pa
μ	Dinamik viskozite, kg/m.s
δ, δ_T	Hidrodinamik ve ısı sınır tabakası kalınlıkları, m
ϕ	Disipasyon fonksiyonu
ν	Kinematik viskozite, m ² /s
τ_w	Eksenel yönde ortalama yüzey kayma gerilme değeri, N/m ²
$\tau_{w,x}$	x-mesafesinde eksenel yönde ortalama yüzey kayma gerilme değeri, N/m ²

Kısaltmalar	Açıklama
H	Sabit yüzey akısı sınır şartı
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MEMS	Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
T	Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı

1. GİRİŞ

Belirli bir geometriye sahip kanal içindeki akış davranışı ve kanal içindeki akışkanın hareketi sonucu meydana gelen ısı transferi miktarının belirlenmesi mühendislik çalışmaları için büyük öneme sahiptir. Kompakt ısı değiştiricileri, nükleer reaktör, soğutma endüstrisi, gaz türbini uygulamalarında sistemlerin çalışması sonucu açığa çıkan ısıнын hızlı ve etkili bir biçimde dış çevreye aktarılmasına ve sistem sıcaklığının belirli bir seviyede tutulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsedilen endüstriyel uygulamaların verimli şekilde çalıştırılabilmesi için sistemden aktarılacak ısı transferi miktarının ve uygun koşulları sağlayacak kanal geometrisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu uygulamalarda yaygın olarak dairesel olmayan kanal geometrileri tercih edilmektedir. Tercih edilen kanal geometrileri içinde altıgen kesitli kanal geometrisi de yer almaktadır. Bu çalışmada altıgen kesitli kanalda akış ve ısı transferi, endüstriyel uygulamalara ait tasarım çalışmalarında kullanılması sebebiyle hava, su ve etilen glikol gibi farklı soğutucu akışkanlar için detaylı olarak incelenmiştir.

Altıgen kesitli kanal geometrisi endüstriyel uygulamalarda kompakt ısı değiştiriciler, yalıtım uygulamaları, direnç özelliği gösteren eyleyici (actuator) / sensör sistemleri başta olmak üzere mikro-akışkan cihazların tasarımı ve kullanımında da tercih edilen bir geometri tipidir. Mikro akışkan cihazlarda bu geometrinin kullanım sebebi seçilen kanal malzemesine ait kristalografik özelliklerdir. Özellikle altıgen kanal kesitine sahip, direnç özelliği gösteren harekete geçirici / sensör sistemlerinde akışkan özellikleri ve akış hız dağılımı ve termodinamik özelliklerinin belirlenmesi için kanal içindeki akış ve ısı transferi ile basınç düşümü değerlerinin incelenmesi gerekmektedir [1]. Kompakt ısı değiştiricilerinde de ısı transferini arttırmak amacıyla altıgen kesitli kanal geometrisi tercih edilmektedir. Bu geometrideki ısı değiştiricilerinde kanal çapı kanal uzunluğuna göre oldukça küçüktür. Dolayısıyla L/D_h oranı oldukça fazladır. Böylelikle altıgen kesitli kanal içerisindeki akışın kanal girişinden itibaren davranışı ve ısı transferinin incelenmesi neticesinde elde edilen sonuçların kompakt ısı değiştiricisi tasarım çalışmalarında kullanılması mümkün olabilmektedir.

Altıgen kesitli kanal içerisine zorlanmış konveksiyon yolu ile düşük hızlarda akışkan gönderildiğinde, kanal içerisinde farklı Prandtl sayılarındaki akışkanların tam gelişmiş akış koşullarına ulaşma mesafeleri birbirinden farklı olmakta ve bu durum ısı değiştirici tasarımında seçilen kanal geometrisine ait boyutsal ölçülerin belirlenmesini kritik hale getirmektedir. Literatür araştırması neticesinde altıgen kesitli kanallar ile ilgili çalışmaların halen yetersiz olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada altıgen kesitli kanal içinde hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan farklı Pr sayısına sahip hava, su ve etilen glikol akışkanlarının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulları ile laminar koşullar altında, kanal içindeki akış ve ısı transferi karakteristiği üç boyutlu ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada momentum, süreklilik ve enerji denklemleri üç boyutlu olarak Ansys Fluent 6.3.26 ticari programı kullanılarak çözülmüştür.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Altıgen kesitli kanal geometrisinde tam gelişmiş, sıkıştırılamaz laminar akış için hız alanları Damean ve Regtien tarafından incelenmiştir. Bu geometriye sahip kanal eyleyici (actuator) / sensör yapısı olarak akışkan özellikleri, hız alanları ve akış özelliklerinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan altıgen kesit geometrisine sahip yapı silikon teknolojisi kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada hız alanını düzgün bir biçimde tanımlamak için analitik formülasyonlar oluşturulmuştur. Bu şekilde yapının diğer tasarım aşamalarında özellikle ısı transferi analizinde kullanılabileceği düşünülmüştür. Hız alanı belirlenmesi için nokta-eşleşme metodu (point-matching method) ve genelleştirilmiş integral transform metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen metotların mikro ve makro boyutlarda dairesel kesitli olmayan geometrilerin tasarlanmasında kullanılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca geliştirilen metotların kullanımı tam gelişmiş, laminar ve sıkıştırılamaz akışlar ve Newtonsel akışkanlar için sınırlandırılmıştır [1].

Laminar, ısı ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış, yamuk ve altıgen kesitli kanal geometrileri için sonlu farklar metodu kullanılarak modellenmiş ve bu geometriler için akış ve ısı transferi Sadasivam ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Koordinat dönüştürme tekniği kullanılarak düzensiz formdaki akış geometrisi dikdörtgensel hesaplama alanına dönüştürülmüştür. Çözümler geniş aralıktaki kanal boyu en/boy oranlarına sahip dört farklı yamuk açısı için elde edilmiştir. Pek çok uygulamada temel kısıt olarak bilinen iki farklı ısı sınır şartı ($H1$ ve T) dikkate alınmıştır. “ T ” olarak belirlenen ısı sınır şartı sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı durumunu temsil etmektedir. “ $H1$ ” olarak belirlenen ısı sınır şartı ise sabit yüzey akısı sınır şartını temsil etmektedir. Çalışmada geniş bir aralıktaki yamuk ve altıgen kesitli kanal geometrileri için hız ve sıcaklık dağılımları, sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı sonuçları sunulmuştur [2].

Sabit kesitli alana sahip değişik geometrilerdeki düz kanallarda anlık olarak gelişmekte olan zorlanmış taşınım ile laminar akışa ait parametrik çalışmalara ait sonuçlar Nonino ve arkadaşları tarafından sunulmuştur. Diğer akışkan özellikleri

sabit kabul edilerek sıcaklığa bağlı viskozitenin basınç düşüşü ve ısı transferine olan etkileri araştırılmıştır. Kanal kesit alanına bağlı olarak iki-boyutlu geometride parabolize hale getirilmiş momentum denklemleri ve enerji denklemlerinin adım adım çözümü için sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmiş uyarlaması uygulanmıştır. Kanal toplam uzunluğu ile hidrolik çap arasındaki oranın fazla olması durumunda üç-boyutlu geometriye sahip kanal için momentum ve enerji denklemlerinin eliptik formda ve kararlı durum için çözülmesi yerine sonlu elemanlar yönteminin uygulanarak iki-boyutlu geometride çözümün gerçekleştirilmesinin daha avantajlı olacağı belirtilmiştir. Farklı kesitlere sahip geometriler için; kanallarda dairesel, dikdörtgen ve eş eksenli halka geometrileri, mikro kanallarda ise yamuk ve altıgen kesitli geometriler için sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada yer alan tüm durumlar sabit sıcaklık duvar koşulları için incelenmiş olup, viskozitenin sıcaklıkla eksponansiyel olarak değiştiği kabulü yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar neticesinde düz kanalların giriş bölgesinde zorlanmış taşınım ile laminar akış için sıcaklığa bağlı viskozite etkilerinin ihmal edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır [3].

Duvar yalıtımı uygulamalarında kullanılan altıgen bal peteği hücre yapısındaki eğimli hava deliğindeki doğal konveksiyon Asako ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. İncelemede kullanılan metot düzensiz kesit alanına sahip geometrilerin cebirsel koordinat dönüştürme tekniği ile dikdörtgen geometri haline getirilmesi ve sayısal olarak çözümün gerçekleştirilmesi şeklindedir. Çalışma üç-boyutlu olarak incelenmiştir. Altıgen kesitli bal peteği yapısı için üç tip ısı duvar sıcaklığı koşulu belirlenerek, bu koşullar için sayısal çözümler elde edilmiştir. Belirlenen ısı sınır koşulları iletken, adyabatik ve kalınlığın olmadığı kabulünü yapıldığı duvar koşullarıdır. Bu koşullar altıgen bal peteği yapısının iyi bir iletken, ısı olarak yalıtılmış ve ince, zayıf bir iletken olması durumları için geçerlidir. Eğim açısının ısı transferine olan etkileri -90° ile 80° aralığında, üç farklı Rayleigh sayısı ve beş farklı en/boy oranı ve Prandtl sayısı 0.7 olan akışkan için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar eksenel ve dikey hız profilleri ile ortalama ve yerel ısı transferi katsayıları cinsinden sunulmuş olup, iki-boyutlu dikdörtgen kesitler için elde edilen değerlerle karşılaştırmaları yapılmıştır [4].

Altıgen kesitli kanal geometrisine sahip kanalda laminar sıkıştırılmaz akış koşullarında ısı transferinin ikinci yasa analizi analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Altıgen kanalın geometrik olarak etkisi Öztop ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Kanaldaki akışkanın etkisini karşılaştırmak amacıyla akışkan olarak su ve motor yağı kullanılmıştır. Kanaldaki akışkanların sabit hız ve sabit duvar sıcaklığı sınır koşullarına sahip olduğu kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar dairesel kesitli kanal geometrisi için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar neticesinde boyutsuz entropi oluşumunun altıgen kesitli kanallarda silindirik kanallara göre dört kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca motor yağı olarak seçilen akışkanın boyutsuz entropi oluşum değerinin su akışkanına göre on kat daha fazla olduğu görülmüş ve bununla birlikte motor yağı akışkanının istenilen ısı transferi oranını sağlayabilmesi için suya göre on kat daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde kanal kesiti küçüldükçe pompalama gücünün arttığı, giriş akışkanı ile kanal duvar sıcaklığı arasındaki farkın entropi oluşumunda önemli rol oynadığı sonuçlarına da ulaşılmıştır [5].

Altıgen kesitli kanalda ve özel bir koşul olan eşkenar dörtgen kesitli kanalda tam gelişmiş laminar akış için analitik çözümler Aparecido ve arkadaşları tarafından elde edilmiştir. Düzensiz alanlarda difüzyon tipi problemlerin çözümü için genelleştirilmiş integral transform tekniği uygulamaları kullanılmıştır. Orijinal problemin tam çözümü eşleştirilmiş adi diferansiyel denklemlerin sayılabilir sistemler cinsinden elde edilmiştir. Daha sonra eşleştirilmiş sistemin basitleştirilmesi ile açık ve düşük mertebeden çözüm elde edilmiştir. Ayrıca ısı değiştiricileri ısı hidroliği alanındaki çalışmalar sistematik olarak sunulmuş ve ısı değiştirici ısı hidroliği alanındaki çalışmaların daha kesin ve yaklaşık çözümlerin uygulanabilirliğinin tahmininde kullanılmasından bahsedilmiştir [6].

<1 0 0> Silikon içerisine oyulan altıgen kesitli kanal tasarımında tam gelişmiş laminar akış koşullarında hız profili için Poiseuille (P_0) sayısının belirlenmesi Damean ve Regtien tarafından incelenmiştir. Kanal geometrisi silikon teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tipteki kanal geometrisi akışkan ve akış parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yapının temelini oluşturmaktadır.

Çalışmada altıgen kesitli kanalda en/boy oranına karşılık P_0 değerini elde etmek için prosedür geliştirilmiştir. Bu prosedürün geçerliliği farklı şekillerdeki kesitlerle doğrulanmıştır. Ayrıca ticari yazılım paketi kullanılarak kısmen daha doğru bir yolla bu prosedürün uygulanabilirliği vurgulanmıştır. Çalışmada yer alan sonuçların mikro ve makro boyutlardaki dairesel kesitli olmayana kanal geometrilerinin tasarımında uygulanabilirliği belirtilmiştir [7].

N-kenarlı çokgen kanalın giriş bölgesinde laminar, sıkıştırılamaz, zorlanmış taşınım ile ısı transferi için ısı transferi ve akış karakteristikleri üç boyutlu olarak cebirsel koordinat dönüştürme yöntemi kullanılarak Asako ve arkadaşları tarafından cebirsel olarak incelenmiştir. Akışkan kanal içerisine üniform hızda ve sıcaklıkta girmektedir. Sayısal çözümler hem sabit duvar sıcaklığı hem de sabit ısı akısı koşullarında altıgen, sekizgen, kare ve dairesel kesitler için iki farklı Prandtl sayısındaki akışkan, $Pr=0,7$ ve $Pr=8$ için elde edilmiştir. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerlerinin tam gelişmiş koşullardaki değerlerinin uygun asimptotik sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Dikdörtgen kesitli kanalda giriş uzunluğu sonuçlarının deneysel ve sayısal olarak uyumlu olduğu sonucu elde edilmiştir [8].

KOH şeklinde oyulmuş yamuk, altıgen ve dikdörtgen kesitlere sahip mikro kanallarda laminar akış rejiminden türbülanslı akış rejimine geçişte Reynolds sayısı aralığının ne olacağı “Obot-Jones” tekniği kullanılarak Morini tarafından incelenmiştir. Laminar akış rejiminden türbülanslı akış rejimine geçilmesi esnasında kesit alanı geometrisinin, en/boy oranının ve görelî pürüzlülüğün akışa etkileri vurgulanmıştır. Çalışmada akış alanı iki-boyutlu olarak incelenmiştir. Kullanılan akışkan Newtonsel, sıkıştırılamaz ve eş sıcaklık özellikte olup, akış hız profili laminar tam gelişmiş olarak tanımlanmıştır. Dairesel kesitli olmayan mikro kanallarda elde edilen Reynolds sayıları laminar rejimden türbülanslı rejime geçiş hidrolik çap konsepti kullanılarak elde edilen sayılardan biraz farklı bulunmuştur. Kritik Reynolds sayısının kesit alanı geometrisi ve görelî pürüzlülük değerinden etkilendiği görülmüştür. Bu çalışmada bahsi geçen parametrelerin etkilerini de içeren model incelenmiştir. Bu model konvansiyonel boyuttaki kanallar için elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Hidrolik çapı $40\text{ }\mu\text{m}$ ’den büyük mikro kanallar için

modelin doğrulanması daha önce yapılmış deneysel çalışmalarla modele dayanan tahminlerin karşılaştırılması ile gerçekleştirilmiştir [9].

Dairesel kesitli olmayan kanallarda laminar tam gelişmiş ve gelişmekte olan akışın hidrodinamik karakteristikleri Muzychka ve Yavanovich tarafından incelenmiştir. Isı değiştiricisi uygulamalarında kullanılan dairesele kesitli olmayan kanal geometrileri için sürtünme katsayısı ve Reynolds sayısı çarpımının kolaylıkla belirlenebilmesi için basit bir model geliştirilmiştir. Derecelendirme analizinin yardımı ve kısa ve uzun kanallarda asimptotik analiz sonuçlarının birleşimi ile tüm problemlerin kolaylıkla analiz edilebileceği modeller elde edilmiştir. Elde edilen modeller $\pm 10\%$ hata ile kanallar için doğru sonucu vermektedir. Bu model sadece en/boy oranı ve boyutsuz kanal uzunluğu parametrelerine girdi olarak ihtiyaç duymaktadır. Geliştirilen modelle çözümü ve herhangi bir verisi olmayan kanal geometrilerine ilişkin sonuçların tahminin yapılması da mümkün olmaktadır [10].

Gelişigüzel kesit alanına sahip mini ve mikro kanallarda tam gelişmiş laminar sıkıştırılmaz akış için basınç düşümü Bahrami ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Çok sayıda geometri için basınç düşümünü tahmin eden kompakt yaklaşım modeli önerilmiştir. Geliştirilen model polar eylemsizlik momenti, çevre ve alan gibi kesit alanı geometrik parametrelerinin fonksiyonu şeklindedir. Önerilen model pek çok şekil için analitik ve sayısal çözümlerle karşılaştırılmıştır. Model ayrıca deneysel verilerle de karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda alan değerinin karekökünün karakteristik özellik bakımından hidrolik çaptan daha üstün olduğu gözlenmiştir [11].

Mikro kanallar için elde edilen deneysel sonuçların açıklaması Morini tarafından konvansiyonel teori ile elde edilen (Navier-Stokes denklemleri) sürtünme faktörleri cinsinden yapılmıştır. Çalışmada kısmen de olsa mikro kanallardan akan akışkanlardaki viskoz ısınmanın rolü üzerine odaklanılmıştır. Mikro kanallardaki akışlardaki viskoz sönümlenme etkileri için değer limitinin belirlenmesi amacıyla bir ölçüt sunulmuştur. Kesit alanı geometrisinin viskoz sönümlenme üzerindeki etkisi üzerinde durulmuş ve viskoz sönümlenme etkilerinin ihmal edilemeyeceği akışlar için minimum Reynolds sayısı hidrolik çap ve farklı akışkanların kullanıldığı mikro kanal

geometrisinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Viskoz ısınma ve bunun sonucu olarak akışkan viskozitesinde görülen azalma hesaba katıldığında, Reynolds sayısı arttıkça sürtünme katsayısında görülen düşüşün açıklanmasının mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca mikro kanallar için Poiseuille sayılarını içeren deneysel sonuçların, viskoz etkiler dikkate alındığı takdirde açıklanabildiği gösterilmiştir [12].

3. ÇALIŞMANIN AMACI VE PROBLEMİN FİZİKSEL TANIMI

Altıgen kesitli kanallarda akış ve ısı transferi karakteristiklerinin incelenmesi mikro kanal uygulamalarında, kompakt ısı değiştiricisi tasarım çalışmalarında, ısı yalıtımı uygulamalarında, MEMS (Micro-electro-mechanical systems) uygulamalarında ve eyleyici (actuator) / sensör uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Bu uygulamalarda altıgen kesitli kanal geometrisinin tercih edilme sebebi diğer temel kesit alanına sahip geometrilere göre daha fazla yüzey alanına sahip olması ve bunun sonucu olarak transfer edilen ısıнын daha fazla ve etkin bir şekilde dış ortama aktarılabilmesidir. Bu çalışmanın yapılmasının temel nedeni endüstriyel uygulamalarda özellikle kompakt ısı değiştiricilerin tasarımı aşamasında gerekli olan parametrelerin belirlenmesi için yardımcı olacak bilgi ve denklemlerin elde edilmesidir. Altıgen kesitli kanalda akış üç-boyutlu olarak incelenmek suretiyle yüzey sınır şartının ve Prandtl sayısının ısı transferi ve sürtünme faktörüne olan etkisinin görülmesi istenmiştir.

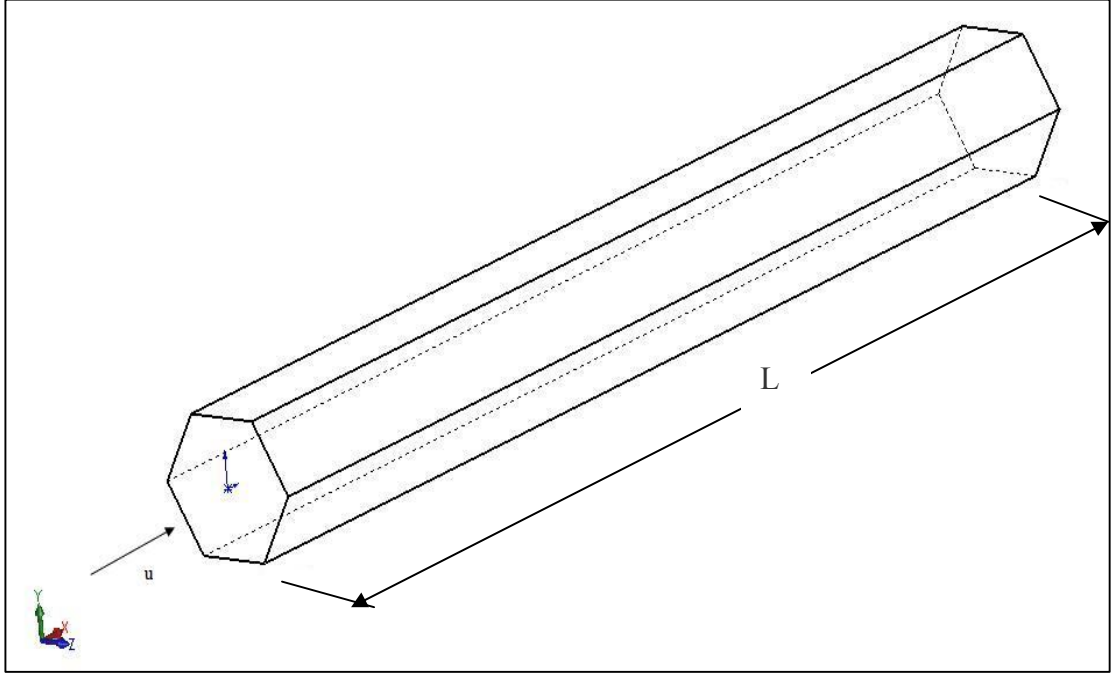
Altıgen kesitli kanalda hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan akış koşullarında, sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulları için laminar akış ve ısı transferi hava ($Pr=0,7$), su ($Pr=7,6$) ve etilen glikol ($Pr=236$) akışkanları kullanılarak üç-boyutlu sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma Reynolds sayısının $100 \leq Re \leq 800$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Duvar koşulları olarak 325 K sabit duvar sıcaklığı ve 54 W/m^2 sabit ısı akısı seçilmiştir. Farklı duvar sınır koşulları ve farklı Prandtl sayılarındaki akışkanların ısı transferi ve sürtünme faktörüne olan etkileri araştırılarak elde edilen sonuçlar literatürde tam gelişmiş koşullara ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı özellikteki akışkanlar da ısı transferi ve sürtünme faktörü özellikleri bakımından birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Kanal geometrisi düzgün altıgen olarak seçilmiş olup, kanal geometrisi Şekil 3.1 (a)'da verilmiştir. Düzgün altıgenin her bir kenarı 0,03 m uzunluğunda olup kanal boyu 2 m olacak şekilde belirlenmiştir. Kanal kesit görünümü Şekil 3.1 (b)'de verilmiştir. Kanal hidrolik çapı 0,052 m ve L/D_h oranı yaklaşık olarak 40'tır.

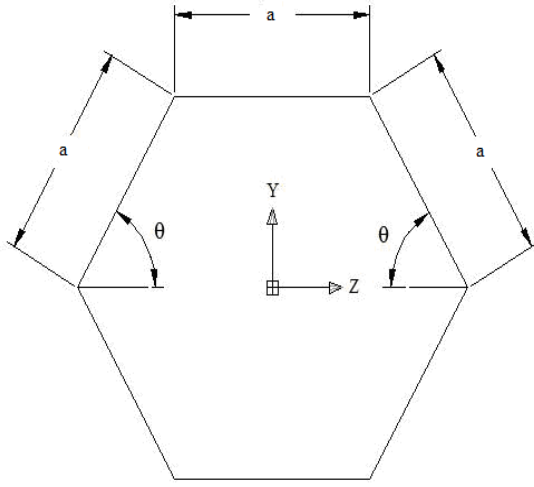
Kanal geometrisi simetrik bir yapıya sahip olmasından ötürü sayısal çalışma kanal kesitinin dörtte biri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Simetrik kanal kesit görünümü ve tanımlamaları Şekil 3.1 (c)'de verilmiştir. Simetri düzlemi $z=0$ 'daki x-y düzlemi ile $y=0$ 'da x-z düzlemidir.

Çalışmada seçilen akışkanlar kanalın sol tarafından girerek kanal dış yüzeyinden ısıyı almakta ve kanalın sağ tarafından çıkmaktadır. Farklı Prandtl sayısına sahip akışkanlar kanala 290 K sıcaklıkta girmektedir. Akışkanlar altıgen kesitli kanala hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan akış koşullarını sağlayacak şekilde girmektedir. Problem hidrodinamik ve ısı giriş problemi olarak tanımlanmıştır. Problemden laminar ve gelişmekte olan akış koşulları göz önüne alınarak bu koşullar doğrultusunda formüller düzenlenmiştir. Çözümler laminar akış, yatışkın (steady state) rejim, sıkıştırılmaz, üç- boyutlu, Newtonsel akışkan ve sabit akışkan özellikleri için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada viskoz sönümlenme etkileri ve doğal konveksiyon koşulları ihmal edilmiştir. Kanal içinde hız profili farklı Reynolds değerlerinde hesaplanmıştır. Hesaplamalar farklı Prandtl sayısına sahip akışkanlar ve farklı duvar sınır koşullarında, farklı Reynolds sayılarında tekrarlanmıştır.

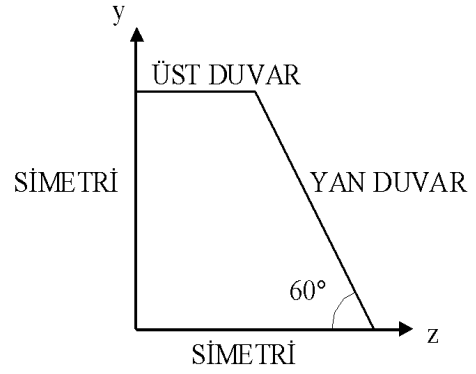
Yapılan tüm sayısal çalışmalar, sayısal akışkanlar dinamiği ticari yazılımı olan Ansys Fluent 6.3.26 paket programı kullanılarak çözülmüştür. Akış geometrisi, bu geometrinin hücrelere ayrılması ve akış sınır koşullarının belirlenmesi ise Gambit 2.4.6 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek altıgen kesitli kanalda ortalama Nusselt sayısının, ortalama Darcy sürtünme katsayısının ve yerel Nusselt sayısı ile yerel Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimleri analiz edilerek elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1. Altıgen kesitli kanalın (a) genel görünümü (b) kesit görünümü ve (c) simetrik görünümü

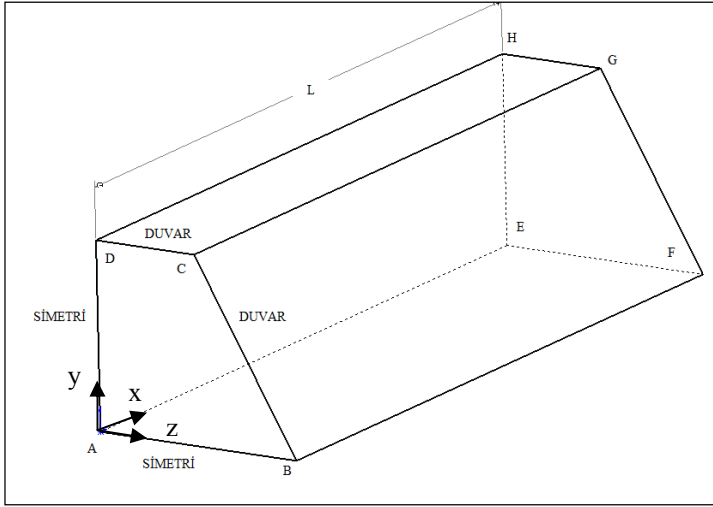
4. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON VE ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Çalışmada incelenen problemin tanımı ve problemin şematik gösterimi Bölüm 3'te verilmiştir. Çalışmada altıgen kesitli kanalda akış ve ısı transferinin Newtonsel akışkan ve laminar akış, kararlı rejim, sıkıştırılmaz, zorlanmış konveksiyon için üç-boyutlu sayısal olarak analizi incelenmiştir. Bilindiği üzere problemlerin çözümünde deneysel, sayısal ve analitik çözümler kullanılabilir. Deneysel çalışmaların daha uzun sürede gerçekleştirilmesi ve sayısal çalışmalara göre maliyetinin daha fazla olmasından ötürü bu çalışma sayısal olarak incelenmiştir. Akış ve ısı transferi ile ilgili gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri Ansys Fluent 6.3.26 programı kullanılarak çözdürülmüştür. Problemin tanımı, problemin çözümünde kullanılan temel denklemler, problemin matematiksel modeli, sınır şartları ve kabuller bu bölümün alt başlıkları olarak verilmiştir.

4.1. Problemin Tanımı

Kanal geometrisi altıgen kesitli ve üç-boyutludur. Akışkan kanal içerisine üniform hız ve sıcaklıkta girmektedir. Problemde sabit sıcaklık T ve sabit ısı akısı H olmak üzere iki tip ısı sınır şartı incelenmektedir. Akışkan olarak hava, su ve etilen glikol akışkanları kullanılmıştır.

Problemde akışkan özelliklerinin sabit olduğu, kanal içerisindeki akış laminar akış olduğu için yatışkın (steady state) rejimde olduğu, viskoz sönümler ve doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği kabulleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan koordinat sistemi ve hesaplama alanının görünümü Şekil 4.1'de verilmiştir. Problemin çözümünde kanal geometrisinin simetrik olmasından dolayı akış alanının dörtte biri incelenmiştir. Akış ve ısı karakteristiklerinin incelenmesi için süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir.



Şekil 4. 1. Hesaplama alanının görünümü

4.2. Temel Denklemler

Altıgen kesitli kanalda süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda belirtilmiştir [13].

Süreklilik denklemi

Üç-boyutlu, sıkıştırılamaz, Newtonsel, viskoz, laminar akış için (steady state) rejim koşullarında süreklilik denklemi aşağıda verilmiştir.

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

Denklemde u, x doğrultusundaki hız bileşenini; v, y doğrultusundaki hız bileşenini; w ise z doğrultusundaki hız bileşenini temsil etmektedir.

Momentum denklemleri

Üç-boyutlu, sıkıştırılamaz, viskoz, doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği, sabit akışkan özelliğine sahip laminar akış için yatışkın (steady state) rejim koşullarında momentum denkleminin x, y ve z yönündeki bileşenleri aşağıda verilmiştir.

x-momentum denklemi:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.2)$$

y-momentum denklemi:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.3)$$

z-momentum denklemi:

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.4)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemlerde ρ akışkanın yoğunluk değerini (kg/m^3); ν kinematik viskoziteyi (m^2/s); P ise basıncı (Pa) temsil etmektedir.

Enerji denklemi

Üç-boyutlu, sıkıştırılamaz, viskoz, doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği, sabit akışkan özelliğine sahip laminar akış için yataşkın (steady state) rejim koşullarında enerji denklemi;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.5)$$

olup; T sıcaklık (K); k ısı iletim katsayısı (W/m.K); c_p özgül ısıyı (J/kg.K) temsil etmektedir.

4.3. Sınır Koşulları

Temel denklemlerin çözümünde kullanılacak olan sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

Giriş Sınır Koşulu (ABCD Bölgesi)

$x=0$ koşulunda akışkan kanala T_0 sıcaklığında ve x -yönünde üniform hızla girmektedir. Hız giriş sınır koşulu için Ansys Fluent 6.3.26 yazılımında yer alan hız sınır şartı (velocity type inlet) kullanılmıştır. Yani $x=0$ için;

$$u=u_0, v=0, w=0, T=290 \text{ K} \quad (4.6)$$

olarak belirlenmiştir.

Çıkış Sınır Koşulu (EFGH Bölgesi)

$x=L$ sınır koşulunda akışkanın kanaldan çıkış koşulu için Ansys Fluent 6.3.26 yazılımında yer alan basınç sınır koşulu (pressure outlet) uygulanmıştır.

Simetri Koşulu

$y=0$ ve $z=0$ eksenleri kanal geometrisinin eksenel-simetrik olmasından dolayı simetri koşulu ile tanımlanmıştır.

$y=0$ (ABFE Bölgesi)için;

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, v=0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4.7)$$

$z=0$ (AEHD Bölgesi) için;

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w=0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (4.8)$$

olarak belirlenmiştir.

Yüzey Sınır Koşulu (BFGC ve DCGH Bölgeleri)

Kanal yüzey sınır koşulu olarak Şekil-3.1 (c)'de belirtilen yüzeyler duvar olarak kabul edilmiş ve duvarlar öncelikli olarak sabit T_w duvar sıcaklığında tutularak, daha sonra da sabit ısı akısı q'' uygulanarak incelenmiştir. Sabit duvar sıcaklığı $T_w=325$ K olarak alınmıştır. Sabit ısı akısı $q''=54$ W/m² olarak alınmıştır. Hızlar için ise kaymanın olmadığı sınır şartı kullanılmıştır. Böylece duvar için;

sabit duvar sıcaklığı yüzey sınır koşulunda;

$$u=0, v=0, w=0, T_w=325K \quad (4.9)$$

ve sabit ısı akısı yüzey sınır koşulunda;

$$u=0, v=0, w=0, q''=54 \text{ W/m}^2 \quad (4.10)$$

şeklindedir.

4.4. Sayısal Çözüm Yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla günümüzde pek çok problemin modellenerek sayısal olarak çözülebilmesi mümkün hale gelmiştir. Sayısal çalışmada Bölüm 4.2'de verilen süreklilik, momentum ve enerji denklemleri bir önceki bölümde belirtilen sınır şartları kullanılarak ANSYS Fluent 6.3.26 paket programı ile çözülmüştür.

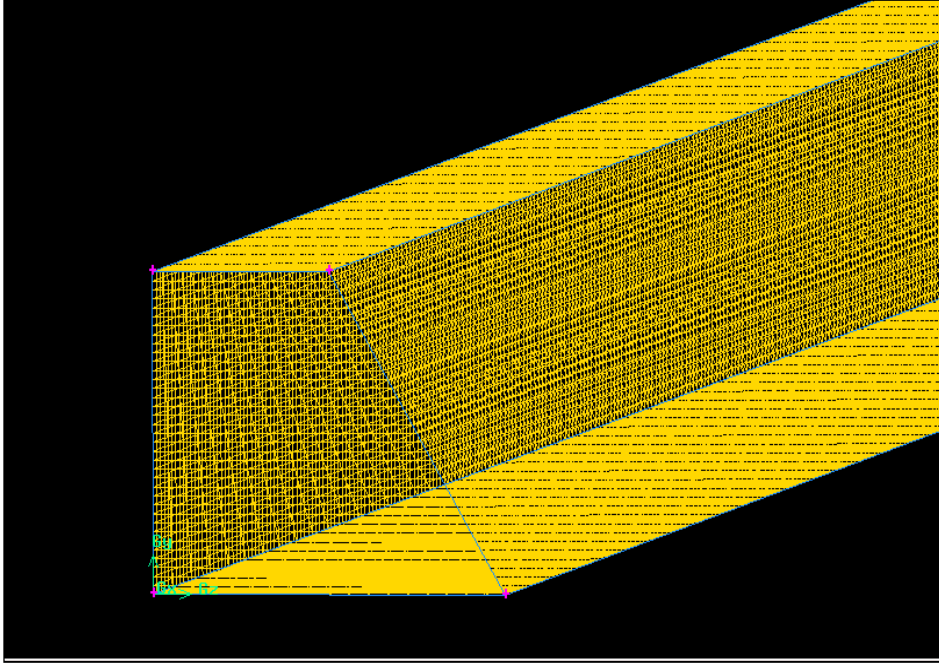
4.4.1. Hücre (Mesh) oluşturma ve hücre optimizasyonu

Çalışmada sayısal analizi yapılan akış geometrisi Gambit 2.4.6 programı kullanılarak üç- boyutlu olarak oluşturulmuştur. Sayısal çalışmada dikdörtgensel hücre yapısı

kullanılmıştır. Duvar yakınında ve akış yönünde üniform hücre yapısı uygulanmıştır. Daha detaylı bilgi için Gambit eğitim notlarından bilgi alınabilir [14]. Ansys Fluent 6.3.26 paket programı akış ve ısı transferinin sayısal çözümünde sonlu hacimler metodu kullanmaktadır. Sonlu hacimler yönteminde gerçekleştirilen ilk işlem ise akış alanının kontrol hacimlerine bölünerek bir grid (ızgara) sisteminin oluşturulmasıdır. Grid sistemi oluşturularak akış alanı küçük hücrelere bölünür ve alanın içindeki her hücrede cebirsel olarak diferansiyel denklemler elde edilir. Bu denklemler sonsuz sayıdadır. Bu nedenle denklem sayısını azaltmak için akış alanı içinde belirli sayıda hücre için cebirsel diferansiyel denklemler oluşturularak çözülmüştür. Çözüm hassasiyetinin artırılması için akış alanı içindeki hücre sayısı artırılmıştır. HAD çözüm süresi ve çözüm hassasiyeti optimum hücre sayısının belirlenmesi ile sağlanmıştır.

4.4.2. Hücre (Mesh) yapısı

Altıgen kesitli kanalda akış ve ısı transferinin incelendiği çalışmada her bir akışkan ve koşul için optimum mesh sayısı Çizelge 5.1’de belirtilen hücre (mesh) sayısına karşılık gelen Nusselt sayısı doğrultusunda belirlenmiştir. Ayrıca hücre (mesh) boyutu yerel hücre Peclet sayısına, kanal boyutuna ve bilgisayar hücre oranına bağlı olarak kısıtlanmıştır. Hücrelerin en/boy oranının 5:1 olmasına dikkat edilmiştir. Bu koşulların sağlanması durumunda çözümün doğru ve geçerli sonuçlar verdiği görülmüştür. Isı transferini boyutsuz olarak temsil eden Nusselt sayısının belirli hücre sayısına sahip akış alanında, hücre sayısı arttırılmasına rağmen değişmediği görülmüş olup, bu doğrultuda optimum hücre sayısı hava ve su akışkanları için 388800; etilen glikol akışkanları için ise 533600 olarak belirlenmiştir. Çalışılan bilgisayarlar bu hücre sayısındaki akışı çözebilecek yeterli hafıza ve işlemciye sahip olduğu için çözüm hassasiyeti yeterli olan hücre sayısı akışkanlar için optimum hücre olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan altıgen kesitli kanalın hücre yapısı Şekil-4.2’de verilmiştir. 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 ve 800 Reynolds sayılarında çalışılmıştır.



Şekil 4. 2. Altıgen kesitli kanaldaki eksenel-simetrik, izometrik akış alanı görünüşü

4.4.3. Çözücü modelinin ve diğer eşitliklerin seçimi

Çözücü modeli olarak basınca bağlı model tercih edilmiş ve üç-boyutlu düzlemde, dolaylı olarak (implicit) belirlenen yöntem ve (steady state) rejim koşulları ile birlikte enerji denklemi ve laminar akış koşulları seçilmiştir.

4.4.4. Akışkan özellikleri

Çalışmada kullanılan akışkan özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Sabit akışkan özellikleri
- Kullanılan akışkanlar: Hava ($Pr=0,7$), Su ($Pr=7,6$), Etilen Glikol ($Pr=236$)

Bu çalışmada akışkan olarak hava, su ve etilen glikol tercih edilmiş olup, bu akışkanlar ısı değiştiricilerinde ve elektronik sistemlerin soğutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sabit akışkan özellikleri kullanılarak çözdürülmüştür. Akışkan özellikleri $T=290$ K sıcaklık için alınmıştır [16].

4.4.5. Sayısal interpolasyon şemaları

Fluent programında korunum denklemlerinin sayısal olarak çözümünde sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır. Akış alanı kontrol hacimlerine ayrılarak, her bir kontrol hacmi için yazılan cebirsel denklemler integre edilmektedir. Sayısal çözümde skalar değişkenler kontrol hacim merkezinde hesaplanmakta ve hesaplanan bu değerler kontrol hacmi sınırları içinde kullanılmaktadır. Bu nedenle akış alanı yüzeylerinde bu değerlerin elde edilmesi için sayısal interpolasyon şemaları kullanılmaktadır. Bu çalışmada Fluent programında bulunan “İkinci Dereceden Ayırıklaştırma” şeması veya “Quick” şeması kullanılabilir. İkinci dereceden ayırıklaştırma şemasında interpolasyon esnasında akışın yönünü dikkate almakta ve hücre yüzeyindeki değerleri çok boyutlu lineer yaklaşım ile yüksek hassasiyette hesaplamaktadır. “Quick” şeması da interpolasyon esnasında akış yönünü dikkate almakta ve hesaplamalarda kuadratik interpolasyon şeması ile yüksek hassasiyette sonuçlar vermektedir [15]. “Birinci Dereceden Ayırıklaştırma” şeması birinci derecede doğruluk sayısal hatalara yol açtığı için, “Power-Law ” şeması ise bir boyutlu difüzyon denklemlerinin çözümünde kullanıldığı için tercih edilmemiştir. Çalışmada “Quick” veya “İkinci Dereceden Ayırıklaştırma” şeması kullanılabileceği görülmüştür fakat “İkinci Dereceden Ayırıklaştırma” şemasının kullanımı tercih edilmiştir.

Yapılan çalışmada ayrıca basınç-hız eşleştirme algoritmalarından biri olan “SIMPLE” algoritması kullanılmıştır. Çalışmada “SIMPLE” algoritmasının tercih edilme sebebi laminer akışın incelenmesi için uygun olmasıdır. “SIMPLE” algoritması ile çözüme başlamadan önce tahmini bir basınç değeri belirlenir, ayırıklaştırılan momentum denklemleri hız ve basınç değerleri verecek şekilde çözülür. Elde edilen değerler düzeltilerek yeniden işlemler tekrarlanır. Bu işlemler istenilen basınç alanı değeri elde edilene kadar devam ettirilir.

4.4.6. Relaksiyon faktörleri

Relaksiyon faktörleri basınca bağlı çözücü modellerinde lineer olmayan denklemlerin iterasyonunda yakınsama davranışını dengelemek amacıyla

kullanılmaktadır. Çalışmada Fluent 6.3.26 programında mevcut olan ve Çizelge 4.2’de verilen relaksasyon faktörleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan relaksasyon faktörleri

Kategori	Relaksasyon Faktörü
Yoğunluk	1,0
Basınç	0,3
Momentum	0,7
Enerji	0,9

4.4.7. Yakınsama kriterlerinin belirlenmesi

Fluent programında iterasyon sayısına bağlı olarak akış değişkenlerine ait kalıntılar grafikte gösterilmektedir. Kalıntılar normalize edilerek her bir korunum denklemi için hesaplanmaktadır. Çözüm esnasında kalıntıların değişimi, dolayısıyla korunum denklemi çözümlerindeki dengelerin değişim derecesi görülmektedir. Akış değişkenlerinin çözüm alanındaki her noktada dengeye ulaştığı anda grafikte görülen kalıntı değerlerinin iterasyona bağlı olarak değişiminin sıfıra yakın veya çok küçük olması beklenmektedir. Bu şekilde yakınsama kontrolü yapılır ve kalıntı değerlerinde görülen değişim ihmal edilebilir seviyelere ulaştığı anda çözümün yakınsadığı kabul edilir. Yakınsama sonucunda fiziksel olarak problemi tanımlayan korunum denklemlerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir. Çizelge 4.2’de çalışmada kullanılan yakınsama kriterleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Fluent programında kullanılan yakınsama kriterleri

Kalıntı	Yakınsama Kriteri
Süreklilik	$1,0 \times 10^{-6}$
X-Hızı	$1,0 \times 10^{-6}$
Y-Hızı	$1,0 \times 10^{-6}$
Z-Hızı	$1,0 \times 10^{-6}$
Enerji	$1,0 \times 10^{-6}$

4.5. Hesaplanacak Değerler

Bu bölümde Ansys Fluent 6.3.26 programı ile yapılan analizler sonucu elde edilen veriler kullanılarak ortalama ve yerel Nusselt sayısı, ortalama ve yerel Darcy sürtünme faktörü Reynolds sayısı $100 \leq Re \leq 800$ aralığında analitik olarak hesaplanması anlatılmıştır.

4.5.1. Ortalama Nusselt sayısı

Ortalama Nusselt sayısı altıgen kesitli kanal içindeki akışın sıcaklık dağılımı kullanılarak hesaplanmaktadır [16].

Ortalama Nusselt sayısı:

$$Nu_m = \frac{h_m D_h}{k} \quad (4.11)$$

Eş. 4.11’de;

h_m : Ortalama taşınım ısı transferi katsayısı (W/m^2K)

D_h : Hidrolik çap (m) ($4 \times$ Kesit Alanı / Çevre)

k : Isı iletim katsayısı (W/mK)

olarak yer almaktadır.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{mo} - T_{mi}) \quad (4.12)$$

$$\dot{m} = \rho U_m A_c \quad (4.13)$$

Burada yer alan ortalama taşınım ısı transferi katsayısı yukarıda belirtilen denklemler kullanılarak;

- Sabit sıcaklık duvar koşulu için;

$$h_m = \frac{\dot{Q}}{A_s \Delta T_{ln}} \quad (4.14)$$

Burada;

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (4.15)$$

$$\Delta T_1 = T_w - T_{mi} \quad (4.16)$$

$$\Delta T_2 = T_w - T_{mo} \quad (4.17)$$

- Sabit ısı akısı duvar koşulu için;

$$h_m = \frac{\dot{Q}}{A_s [T_w - (\frac{T_{mi} + T_{mo}}{2})]} \quad (4.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [16].

Eş.4.12, Eş.4.13, Eş.4.15, Eş.4.16 ve Eş.4.17’de elde edilen değerler Eş.4.14’te; Eş.4.12’de elde edilen denklem ise Eş.4.18’de yerlerine yerleştirildiğinde ortalama taşınım ısı transferi katsayısı elde edilmiş olur. Bu denklemlerde $\dot{Q}$ (W) toplam ısı transferini, $\dot{m}$ (kg/s) kütleli debiyi, A_s (m²) ısı transferi yüzey alanını, ΔT_{ln} (K) logaritmik ortalama sıcaklık farkını, c_p (J/kgK) özgül ısıyı, ρ (kg/m³) akışkan yoğunluğunu, A_c (m²) kesit alanını, U_m (m/s) akışkanın kanal içindeki ortalama hızını, T_{mo} (K) kanaldan çıkan akışkanın ortalama sıcaklığını, T_{mi} (K) kanala giren akışkanın ortalama sıcaklığını, T_w (K) duvar sıcaklığını, T_m (K) ise ortalama sıcaklık değerini ifade etmektedir.

4.5.2. Ortalama Darcy sürtünme faktörü

Kanal içindeki basınç düşümünün bilinmesi kanal fan veya pompa ihtiyacının belirlenmesi için gereklidir. Kanal içindeki basınç düşümü ise Darcy sürtünme faktörü ile ifade edilebilmektedir [16].

$$f = \frac{\Delta P \left(\frac{D_h}{L} \right)}{\frac{\rho U_m^2}{2}} \quad (4.19)$$

Burada ΔP (Pa) ortalama basınç düşümünü, D_h (m) hidrolik çapı, L (m) kanal uzunluğunu, ρ (kg/m³) akışkan yoğunluğunu, U_m (m/s) akışkanın kanal içindeki ortalama hızını temsil etmektedir.

Basınç düşümü;

$$\Delta P = \bar{P}_o - \bar{P}_i \quad (4.20)$$

olup, burada $\bar{P}_i$ ve $\bar{P}_o$ kanal giriş ve çıkışındaki ortalama basınçlardır.

Ortalama basınç ;

$$\bar{P} = \frac{1}{A_c} \int p dA \quad (4.21)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada P (Pa) basınç ve A_c (m²) ise kesit alanıdır.

4.5.3. Yerel Nusselt sayısı

Dairesel kesitli olmayan kanallarda eksenel yönde yerel Nusselt sayısı Nu_x şu şekilde tanımlanmıştır [16]:

$$Nu_x = \frac{q_x'' D_h}{k(T_w - T_b)_x} \quad (4.22)$$

Burada q_x'' (W/m²) x-mesafesindeki ortalama ısı akısını, D_h (m) hidrolik kanal çapını, k (W/m.K) ısı iletim katsayısını, T_w (K) eksenel x-mesafesindeki duvar sıcaklığını, T_b (K) ise eksenel yönde ortalama akışkan sıcaklığını temsil etmektedir. Eksenel yönde ortalama akışkan sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan formül Eş. 4.23'te verilmiştir.

$$T_b = \frac{1}{A_c U_{m,Ac}} \int u T dA \quad (4.23)$$

Burada A_c (m²) ortalama kesit alanını ve U_m (m/s) ise kesit alanında akışkanın ortalama hızını temsil etmektedir.

4.5.4. Yerel Darcy sürtünme faktörü

Eksenel yönde yerel Darcy sürtünme faktörü f_x Eş.4.24'te verilen formülle tanımlanmıştır [16].

$$f_x = \frac{4\tau_{w,x}}{\rho U_x^2/2} \quad (4.24)$$

Burada $\tau_{w,x}$ (N/m²) eksenel yönde x-mesafesindeki yüzey kayma gerilme değeri ve U_x (m/s) x-mesafesindeki ortalama hızdır.

4.5.5. Reynolds sayısı

Reynolds sayısı Eş.4.25'te verilen formülle tanımlanmıştır [16].

$$Re = \frac{\rho U_m D_h}{\mu} \quad (4.25)$$

Eş.4.25'te verilen denklemde U_m (m/s) akışkanın ortalama hızını temsil etmekte olup, Eş.4.26'da verilen formülle tanımlanmıştır.

$$U_m = \frac{\int \rho u dA_c}{\rho A_c} \quad (4.26)$$

4.5.6. Boyutsuz sıcaklık

Boyutsuz sıcaklık profili θ Eş.4.27 ile ifade edilmektedir [16].

$$\theta = \frac{T_w - T(x, y, z)}{(T_w - T_i)} \quad (4.27)$$

Burada $T(x, y, z)$ (K) kanal içinde belirtilen koordinatlardaki sıcaklık değerini, T_w (K) ve T_i (K) ise x-mesafesindeki kanal duvar ve ortalama akışkan sıcaklıklarını temsil etmektedir.

5. SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu çalışmada 60° köşe açısına sahip, kanal hidrolik çapı 0,052 m ve kanal uzunluğu 2 m olan düzgün altıgen kesitli kanalda farklı akışkanların ve Reynolds sayısının akış ve ısı transferine olan etkisi üç-boyutlu yatışkın (steady state) rejim şartlarında sıkıştırılamaz akış için sayısal olarak incelenmiştir. Ansys Fluent 6.3.26 paket programı kullanılarak incelenen problemin doğruluğunun belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar literatürde bulunan deneysel ve analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Altıgen kesitli kanalda hava ($Pr=0,7$), su ($Pr=7,6$) ve etilen glikol ($Pr=236$) akışkanlarının laminar akış koşullarında Reynolds sayısının 100-800 aralığında sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşullarında ısı transferi (Nusselt sayısı) ve akış üzerine olan etkileri incelenmiştir.

Çalışmada incelenen üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkan altıgen kesitli kanal içerisine gönderilmektedir. 290 K sıcaklığında kanalın sol tarafından giren akışkan kanal yüzeylerinden ısı alarak kanal sağ tarafından çıkmaktadır. Kanal içindeki akışın laminar akış koşullarını sağlaması için akışkan giriş hız değerleri düşük değerler olarak seçilmiştir.

Farklı Prandtl sayılarının ve duvar sınır koşullarının uygulanmasının akış ve ısı transferi karakteristiklerine olan etkileri Reynolds sayısının 100–800 olduğu aralıkta incelenmiş ve yapılan sayısal çalışma ile kanal içindeki akışın tam gelişmekte olan akış koşullarına ulaşp ulaşmadığı ile ilgili bilgi edinilmiştir. İnceleme esnasında ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü hesaplanarak kanal içerisindeki akışa ait hız ve sıcaklık dağılımları grafik halinde sunulmuştur. Çalışmalar sonucunda elde edilen değerler literatürde belirtilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç farklı akışkan için akış ve ısı transferi karakteristikleri ayrı olarak alt bölümlerde incelenmiştir. Son olarak sayısal analiz sonucunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.

5.1. Hava İçin (Pr=0,7) Sonuçlar

Çalışmada kullanılan hava akışkanı altıgen kesitli kanalda sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu için Reynolds sayısının 100 ile 800 değerleri için incelenmiştir. İnceleme neticesinde elde edilen sonuçlar alt bölümlerde verilmiştir.

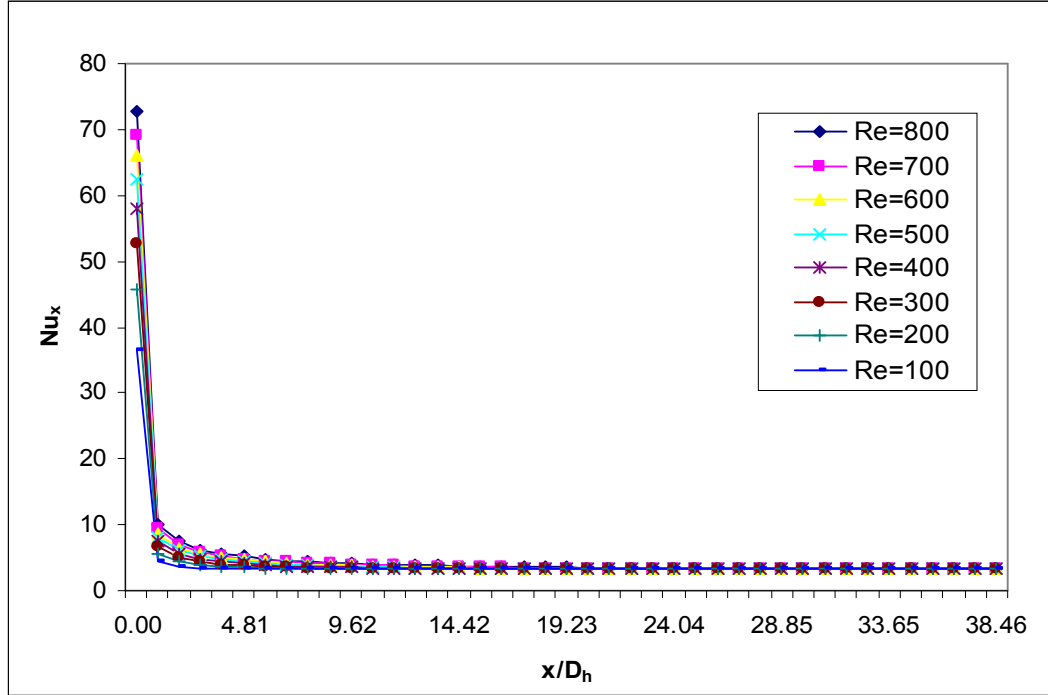
5.1.1. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında hava akışkanı için sonuçlar

Çalışmada altıgen kesitli kanalda Reynolds sayısı 800 iken yedi farklı hücre sayısında çalışılarak sayısal inceleme sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu koşulunu sağlayan optimum hücre sayısı belirlenmiştir. Çizelge 5.1’de farklı hücre sayıları ile gerçekleştirilen sayısal inceleme sonucunda elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Hücre sayısının 600x36x18’den 834x50x25’e değişmesi durumunda Nusselt sayısında %0,086 oranında değişim, Darcy sürtünme katsayısında ise %0,45 oranında bir değişim görülmüştür. Bu nedenle optimum hücre sayısı 600x36x18 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Hava akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulunda ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin için hücre sayısına bağlı olarak değişimi

Hücre Sayısı (x,y,z)	$Nu_{m,T}$	$f_{m,T}$
267x16x8	4,38079	0,112767
333x20x10	4,355947	0,113438
500x30x15	4,334388	0,114384
600x36x18	4,330077	0,114712
667x40x20	4,328483	0,114891
734x44x22	4,327398	0,115045
834x50x25	4,326348	0,115234

Hava akışkanının sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca $100 \leq Re \leq 800$ aralığı için hesaplanan değerleri grafiksel olarak Şekil 5.1’de verilmiştir.



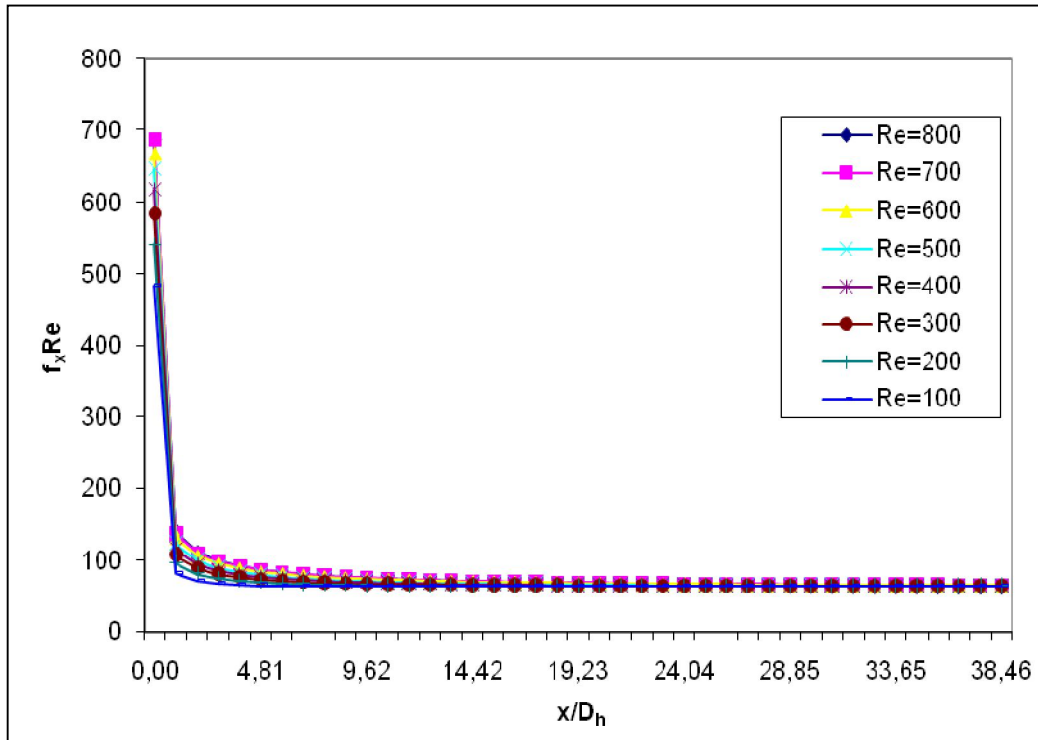
Şekil 5.1. Hava akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere kanal girişinde yerel Nusselt sayısı beklenildiği şekilde tüm Reynolds sayıları için yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında elde edilen yerel Nusselt sayılarının ise daha yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Kanal boyunca yerel Nusselt sayılarının tüm Reynolds sayıları için düşüş gösterdiği ve belirli bir mesafeden sonra 3,23 değerinde sabit kaldığı sonucu elde edilmiştir. Çalışılan Reynolds sayısı aralığında sabit duvar sıcaklığı koşulu için hava akışkanının kanal boyunca ısı olarak tam gelişmişliği sağladığı görülmüştür. Bu doğrultuda hidrolik çapı 0,052 m olan düzgün altıgen kesitli kanal içerisinde hava akışkanının tam gelişmiş akış şartlarında Nusselt sayısı değerinin 3,23 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı akışkan ve koşullar için yapılan hesaplamalar sonucunda eksenel yönde kanal boyunca yerel Darcy sürtünme faktörü f_x değerlerinin Reynolds sayısı ile çarpım sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere hesaplanan $f_x Re$ değerleri beklenildiği şekilde kanal girişinde yüksek değerler almıştır. $f_x Re$ değerinin belirli bir kanal uzunluğundan sonra değişmediği ve 65,52

sabit değerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit kaldığı kanal uzunluğundan itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullar altındaki $f_x Re$ değeri 65,52 olarak bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki çalışmalarda elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen yerel Nusselt sayısı ile literatürdeki çalışmalarda [3], [8] elde edilen sonuçlar arasındaki fark sırasıyla % 3,09 ve % 3,715’tir. Aynı şekilde $f_x Re$ sayısı ile literatürdeki [17], [3], [8] sonuçlar arasındaki fark sırasıyla % 8,11, %8,24, %8,05’tir. Sonuç olarak yapılan sayısal çalışma sonuçlarının literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilir.

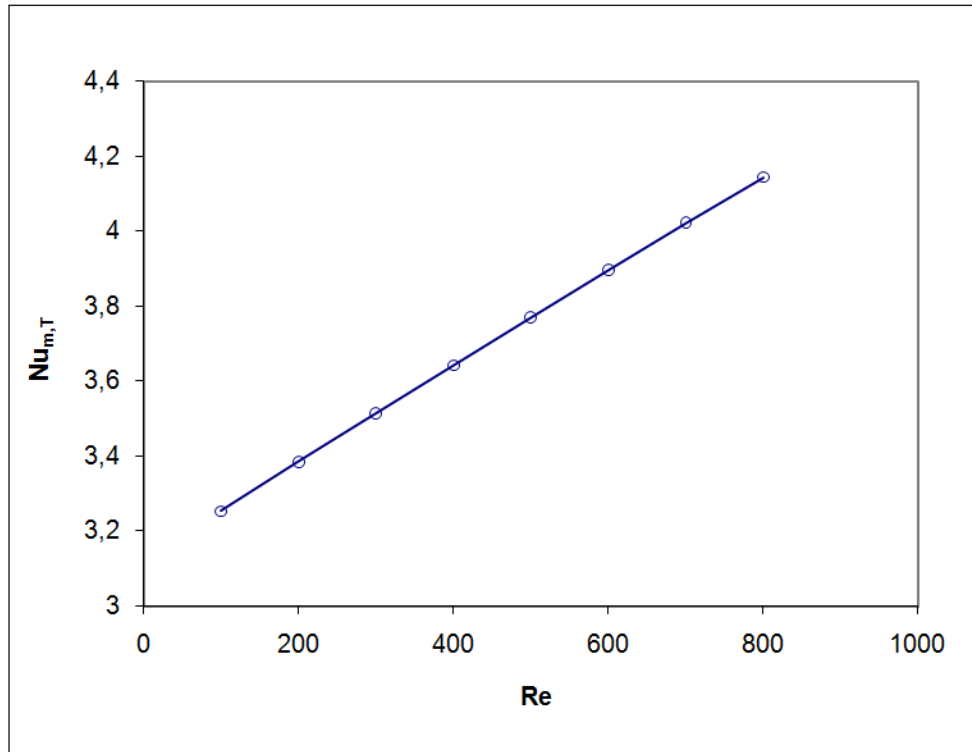


Şekil 5.2. Hava akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi

Çizelge 5.2. Tam gelişmiş şartlarda sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması

	Nu_x	$f_x Re$
Sayısal Sonuçlar	3,23	65,52
Ref. [17]	-	60,2
Ref. [3]	3,33	60,12
Ref. [8]	3,35	60,24
Ref. [18]	3,34	60,22

Ortalama Nusselt sayısı değerleri $100 \leq Re \leq 800$ değer aralığı için Şekil 5.3’de verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak kanal içindeki ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.1 ile ifade edilmiştir.

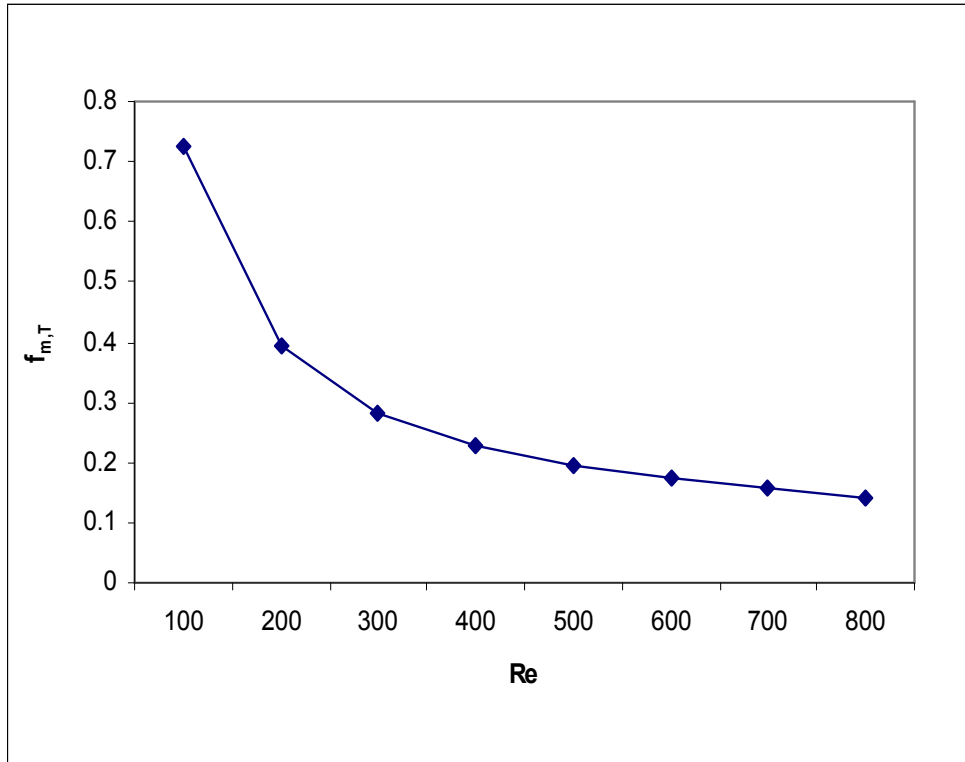


Şekil 5.3. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanını için kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

$$Nu_{m,T} = 1,85 Re^{0,117} \quad (5.1)$$

Altıgen kesitli kanalda $100 \leq Re \leq 800$ Reynolds değer aralığı için hesaplanan ortalama Darcy sürtünme katsayıları Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan Reynolds sayısına bağlı olarak Darcy sürtünme faktöründe azalma söz konusudur. Buradan Reynolds sayısı ile Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak Darcy sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.2 ile ifade edilmiştir.

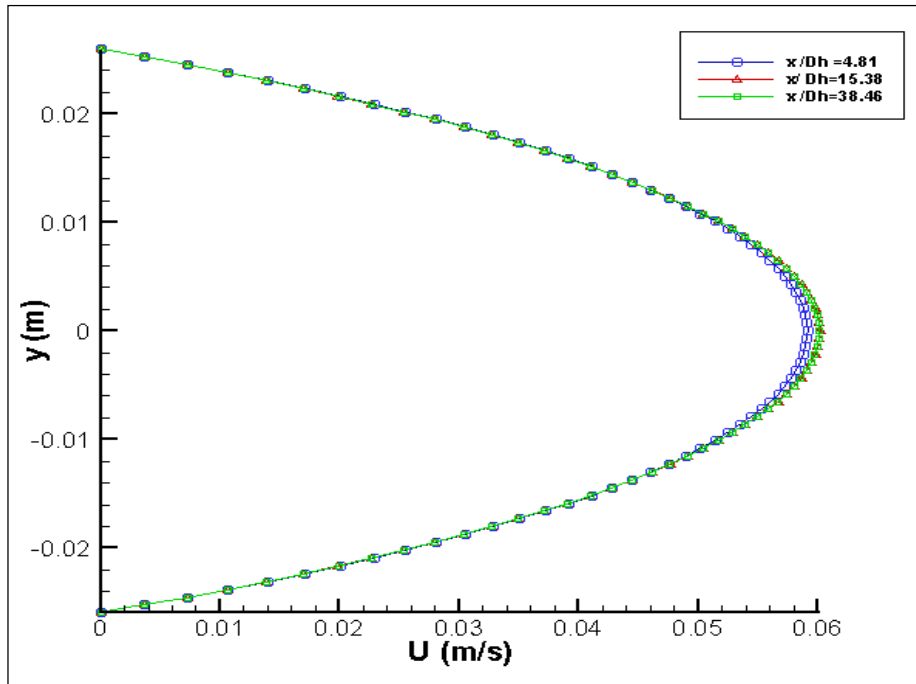
$$f_{m,T} = 25,29 Re^{-0,781} \quad (5.2)$$



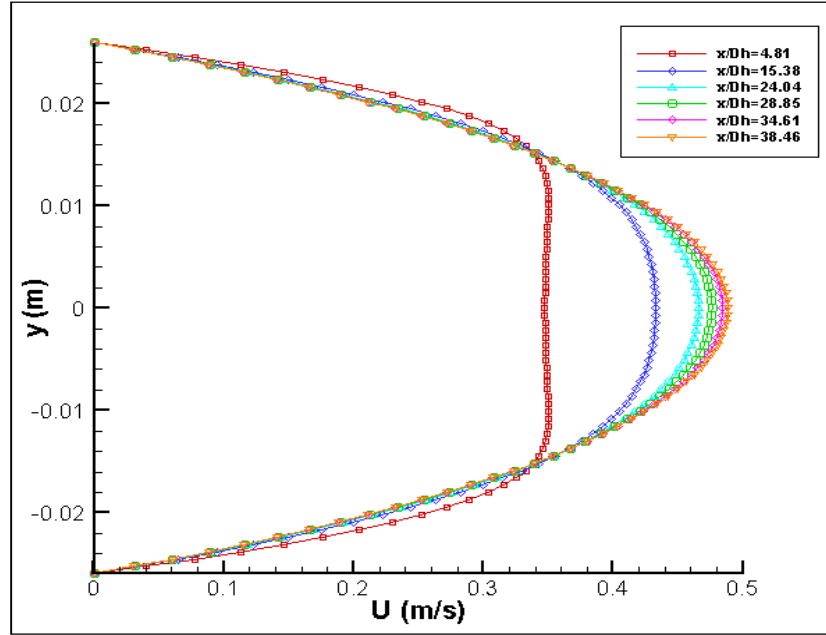
Şekil 5.4. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanı için ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Altıgen kesitli kanalda hava akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulu için simetri düzlemi ($z=0$) üzerindeki hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. Bu kesitler $x/D_h = 4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ olarak belirlenmiştir. Belirtilen kesitlerde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sunulmuştur. $Re=100$ için kanal x-mesafesi $x/D_h=15,38$ iken kanal

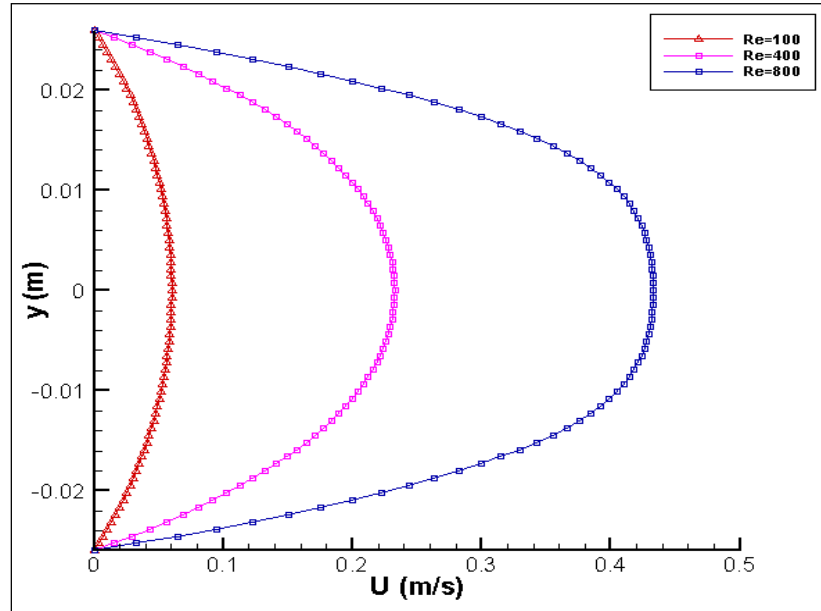
içindeki akış tam gelişmiş koşullara ulaşmıştır. Kanal içindeki akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşma mesafesi $Re=800$ için ise $x/D_h=34,61$ olarak belirlenmiştir. Şekilden görüldüğü üzere $x/D_h=4,81$ kanal giriş mesafesinde akışın hidrodinamik olarak gelişmiş koşullara ulaşmadığı görülmüştür. Simetri düzleminde ($z=0$) kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ 'de oluşturulan x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri ise Şekil 5.7'de verilmiştir. Bu grafiklerden farklı Reynolds sayılarında kanal içindeki hız profillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde $y=0$ simetri düzlemi için $Re=100, Re=800$ için hız profilleri incelenmiş olup Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da sunulmuştur. $y=0$ simetri düzleminde de $z=0$ simetri düzlemi ile aynı sonuçlar elde edilmiştir. Simetri düzleminde ($y=0$) kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ 'de oluşturulan x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri ise Şekil 5.10'da verilmiştir.



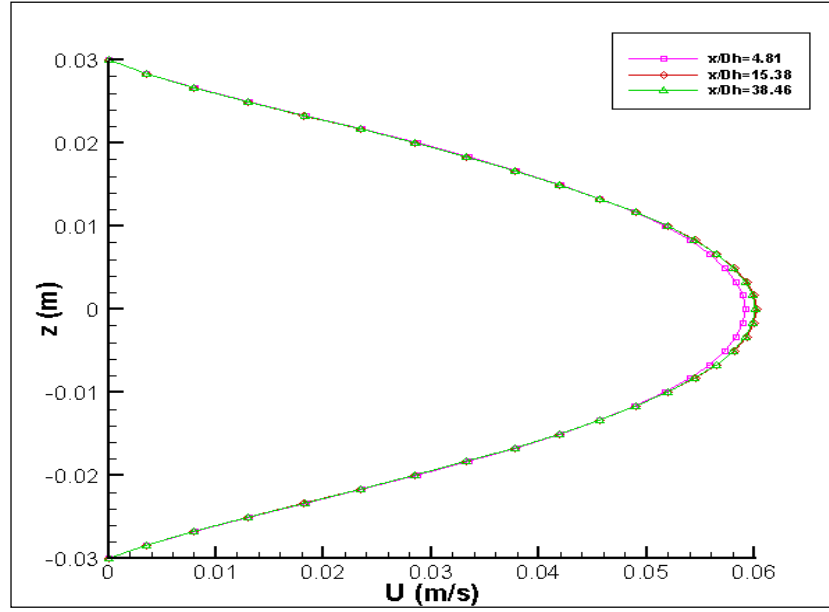
Şekil 5.5. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x- mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri



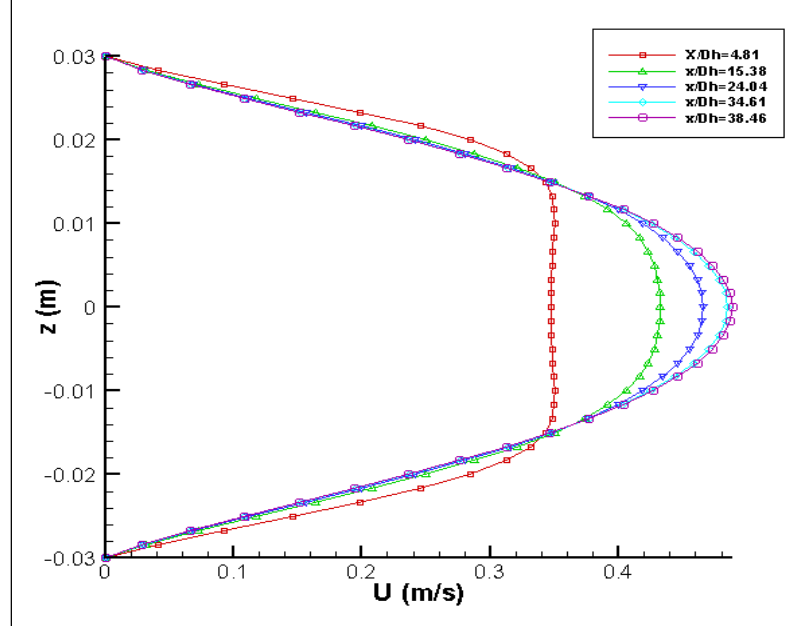
Şekil 5.6. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri



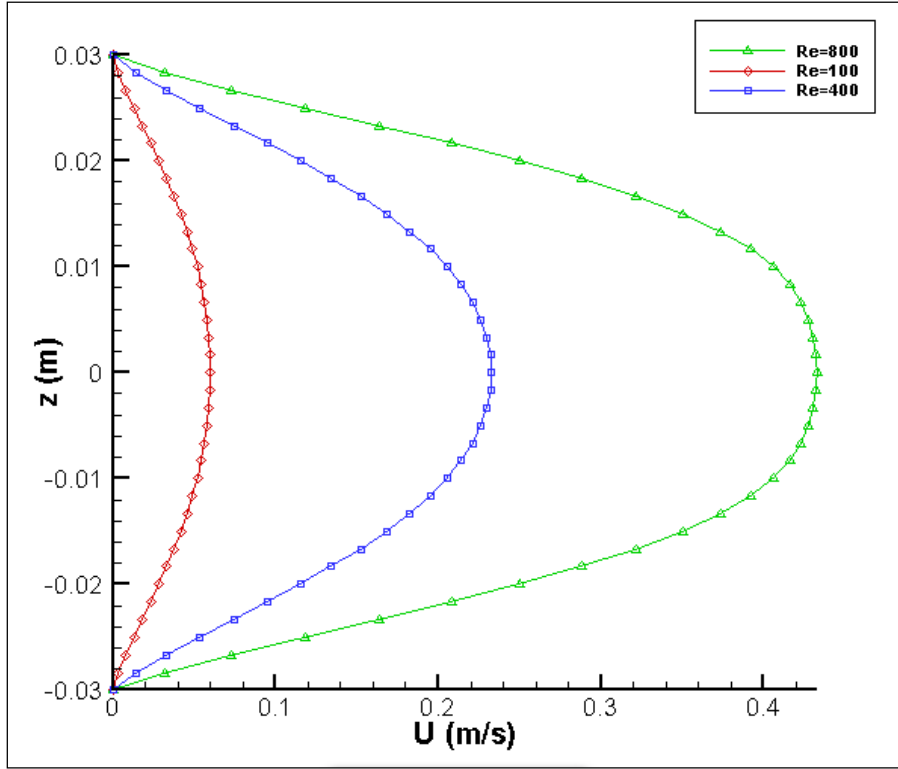
Şekil 5.7. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.8. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde farklı x -mesafelerinde sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri

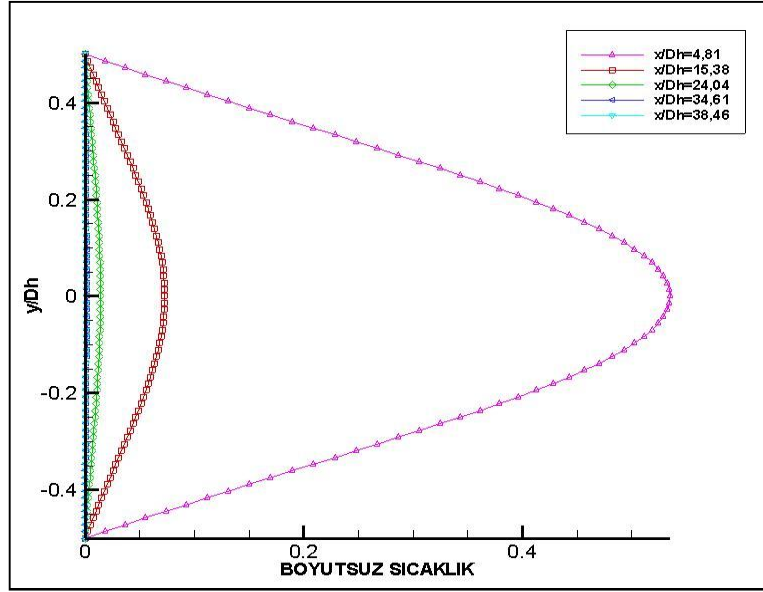


Şekil 5.9. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde farklı x -mesafelerinde sabit sıcaklık duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri

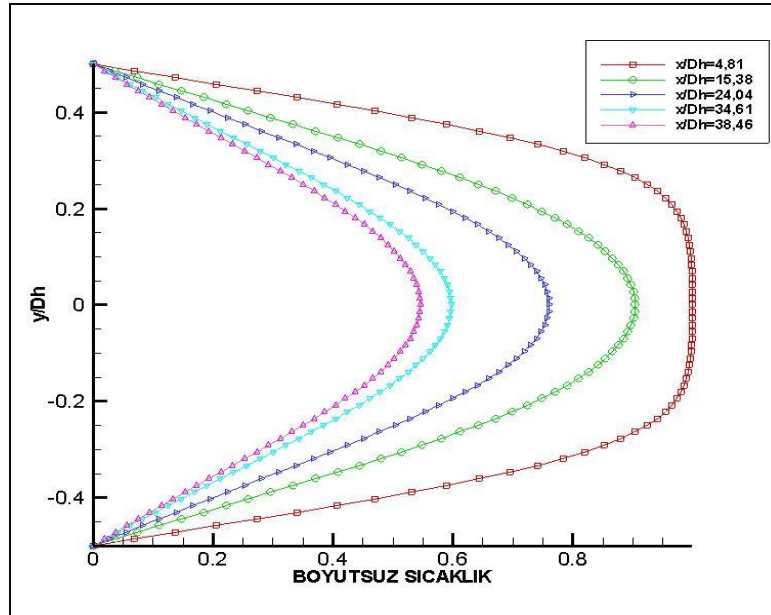


Şekil 5.10. Hava akışkanının $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için hız profilleri

Kanal boyunca sıcaklık dağılımı sürekli olarak değişmektedir. Kanal boyunca sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanı için boyutsuz sıcaklığın (θ) kanal yüksekliği ile değişimi $Re=100$ ve $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde kanal boyunca farklı x -mesafelerinde incelenmiştir ve bu değişime ait grafikler Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir. Kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklığın değişimi simetri düzleminde oluşturulan yüzeyde ($z=0$) incelenmiştir. Boyutsuz sıcaklık grafiklerine göre $Re=100$ için hava akışkanının ısıl olarak gelişmiş koşullara $x/D_h=15,38$ 'den itibaren ulaştığı söylenebilir. Benzer şekilde $Re=800$ için $x/D_h=34,61$ 'den itibaren ulaştığı söylenebilir.

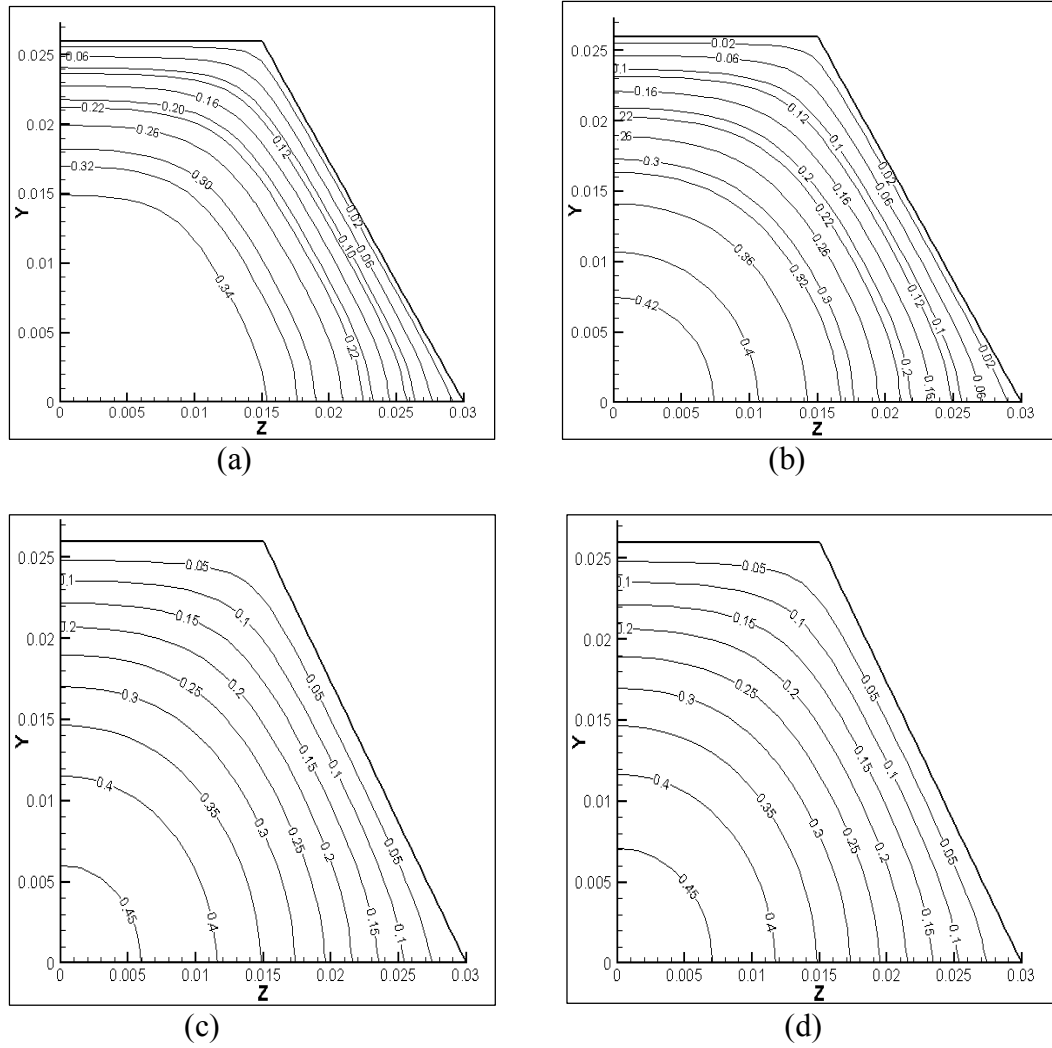


Şekil 5.11. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için hava akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi

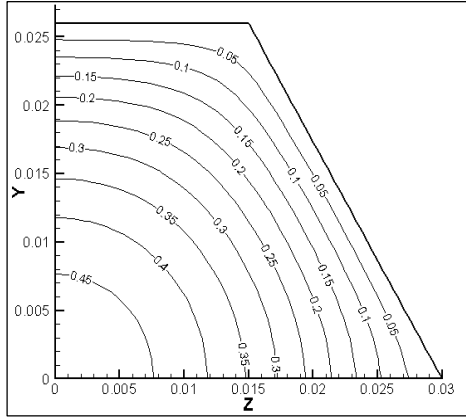


Şekil 5.12. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için hava akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi

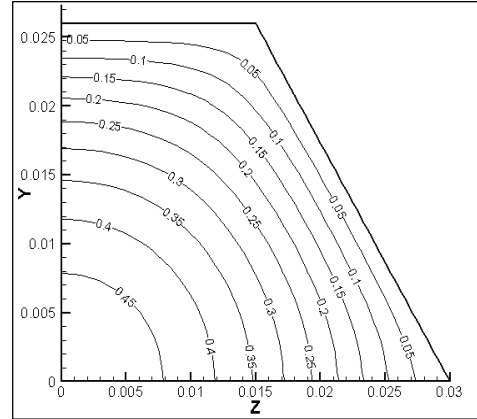
Kanal boyunca $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ boyutsuz mesafelerinde y-z kesitlerindeki hız- kontur dağılımı grafikleri $Re=800$ ve $Re=100$ için Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir. Şekil 5.13'de görüldüğü üzere $Re=800$ için akışkanın kanal çıkışında hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaştığı söylenebilir. Şekil 5.14'te ise $Re=100$ için hız dağılımı incelendiğinde $x/D_h=15,38$ 'den itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir.



Şekil 5.13. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



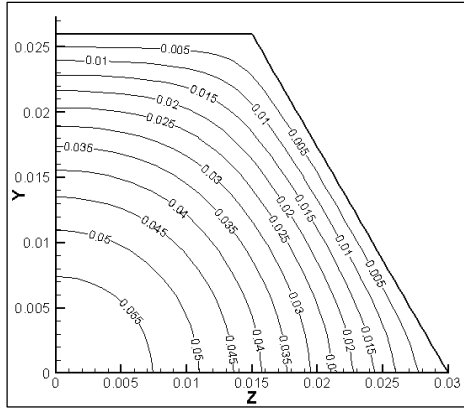
(e)



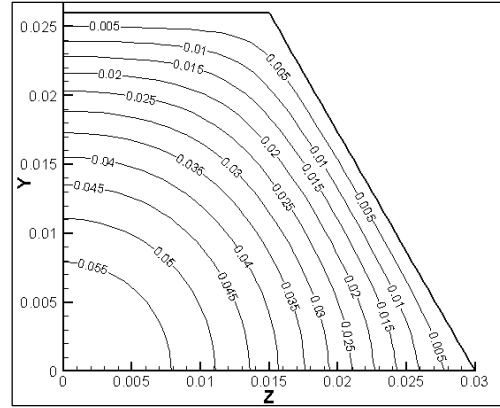
(f)

Şekil 5.13. (Devam) Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları

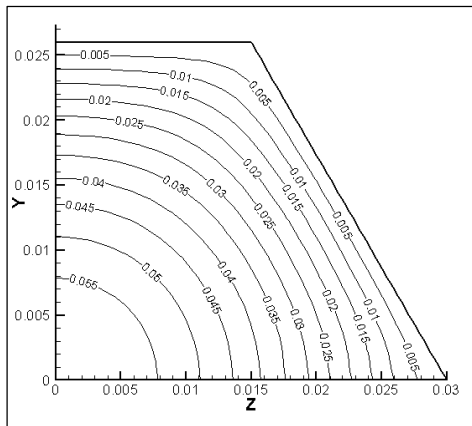
(a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$,
(d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



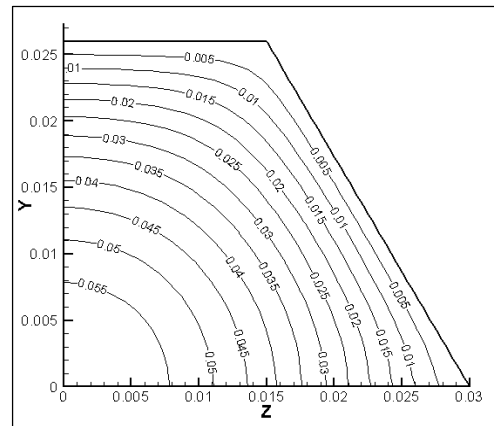
(a)



(b)



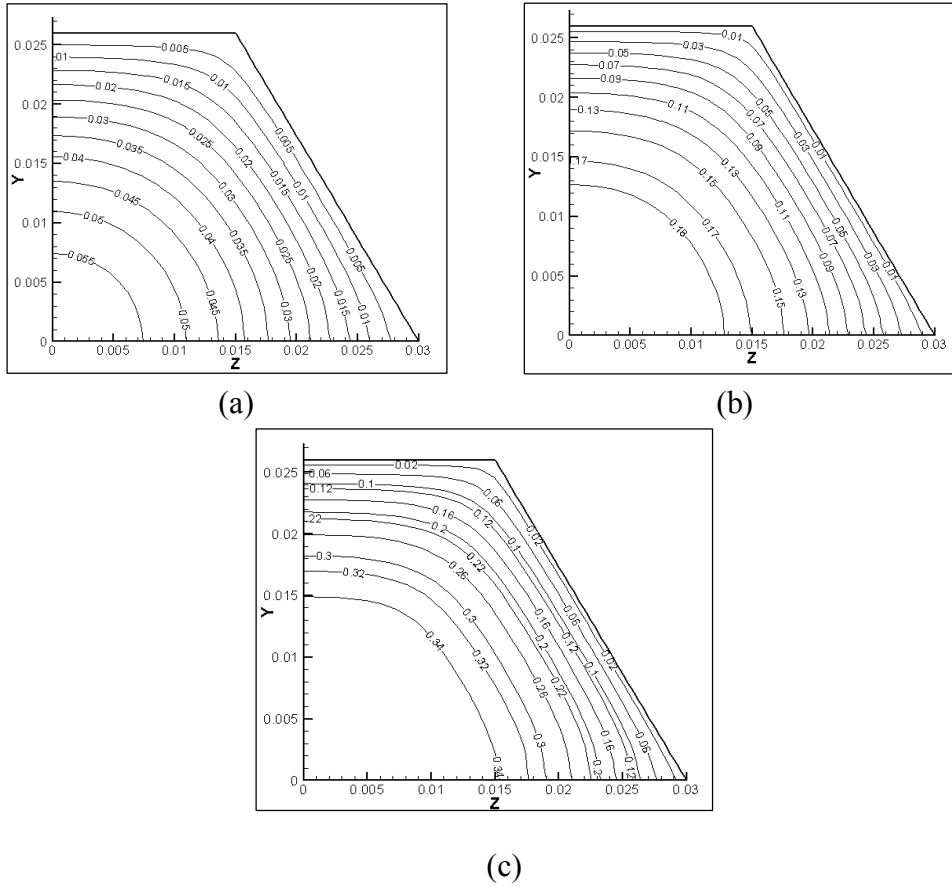
(c)



(d)

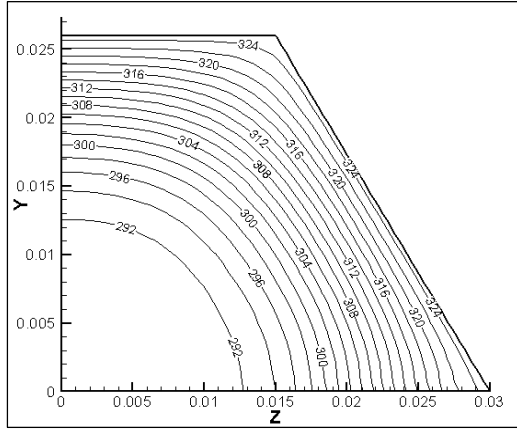
Şekil 5.14. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$,
(b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$

Çalışmada ayrıca Reynolds sayısının hız dağılımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. $x/D_h = 4,81$ iken y-z kesitindeki hız dağılımları üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Şekil 5.15'te $Re=100$, 400 ve 800 için hız dağılımlarının incelenmesi sonucu artan hızla birlikte kanal duvar kenarlarında görülen hız sınır tabakası kalınlığında azalma gözlenmiştir.

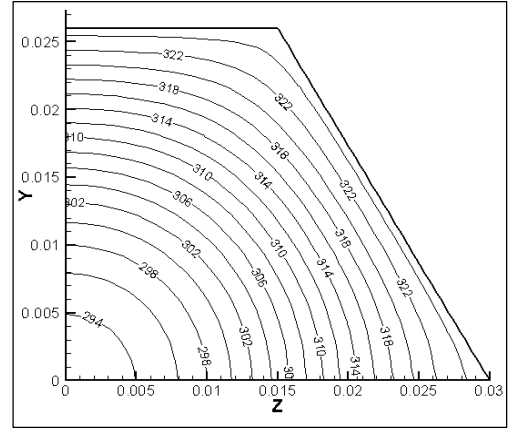


Şekil 5.15. Sabit sıcaklık koşulunda hava akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

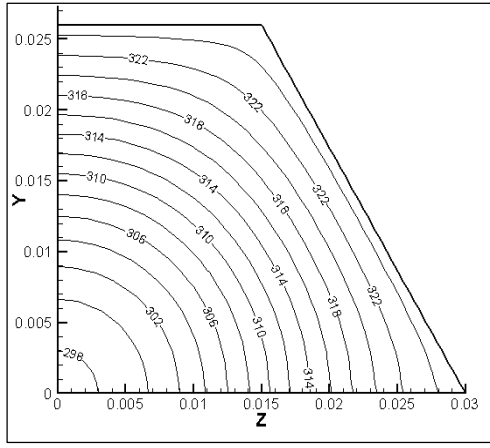
Kanal boyunca $x/D_h=4,81$, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61 ve 38,46 boyutsuz mesafelerinde y-z kesitlerindeki sıcaklık dağılımı grafikleri $Re=800$ için Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekil 5.16'da görüldüğü üzere $Re=800$ için x-mesafelerinde sıcaklık dağılımının değişiklik gösterdiği görülmüştür.



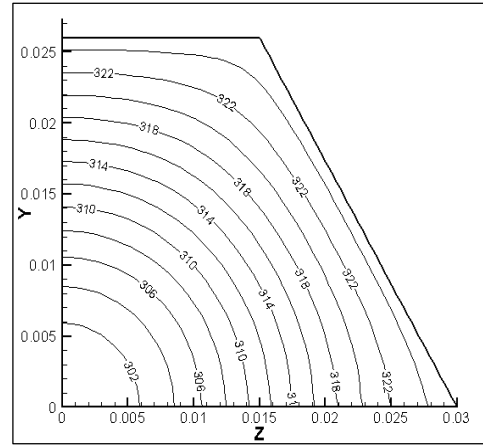
(a)



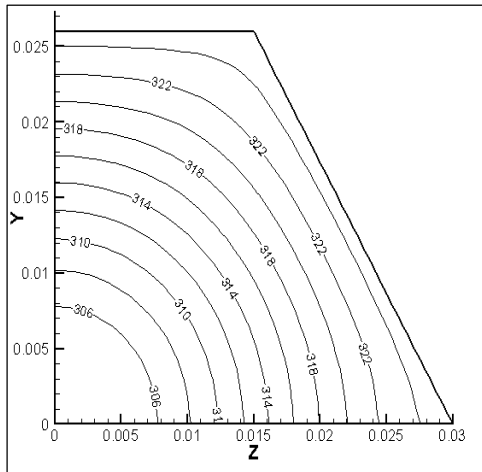
(b)



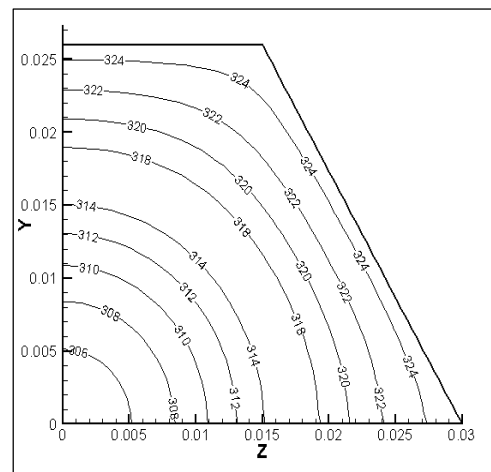
(c)



(d)



(e)

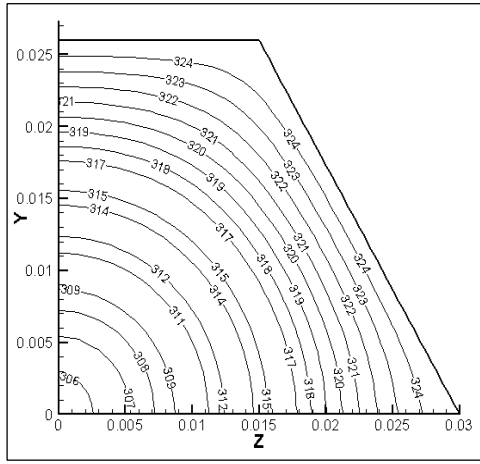


(f)

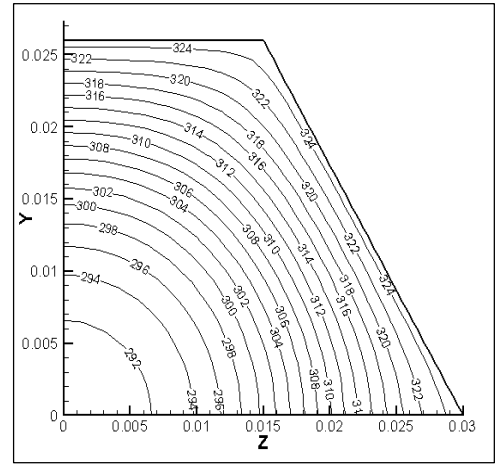
Şekil 5.16. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı x -kesitlerinde kanal boyunca sıcaklık dağılımları

(a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$,
(e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$

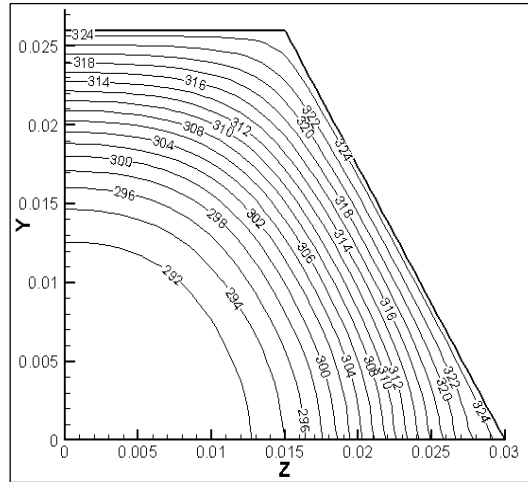
Hava akışkanının sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu için kanal boyunca sıcaklık dağılımları y-z kesitinde farklı Reynolds sayıları için incelendiğinde $x/D_h=4,81$ boyutsuz mesafesinde elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 5.17’de verilmiştir. Elde edilen grafiklerden Reynolds sayısı arttıkça sıcaklık sınır tabakası kalınlığı azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Hız arttıkça kanal içerisindeki akış sıcaklığının özellikle kanalın merkezine doğru daha düşük olduğu görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.17. Sabit sıcaklık duvar koşulunda hava akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ ’de y-z kesitindeki sıcaklık dağılımları
(a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

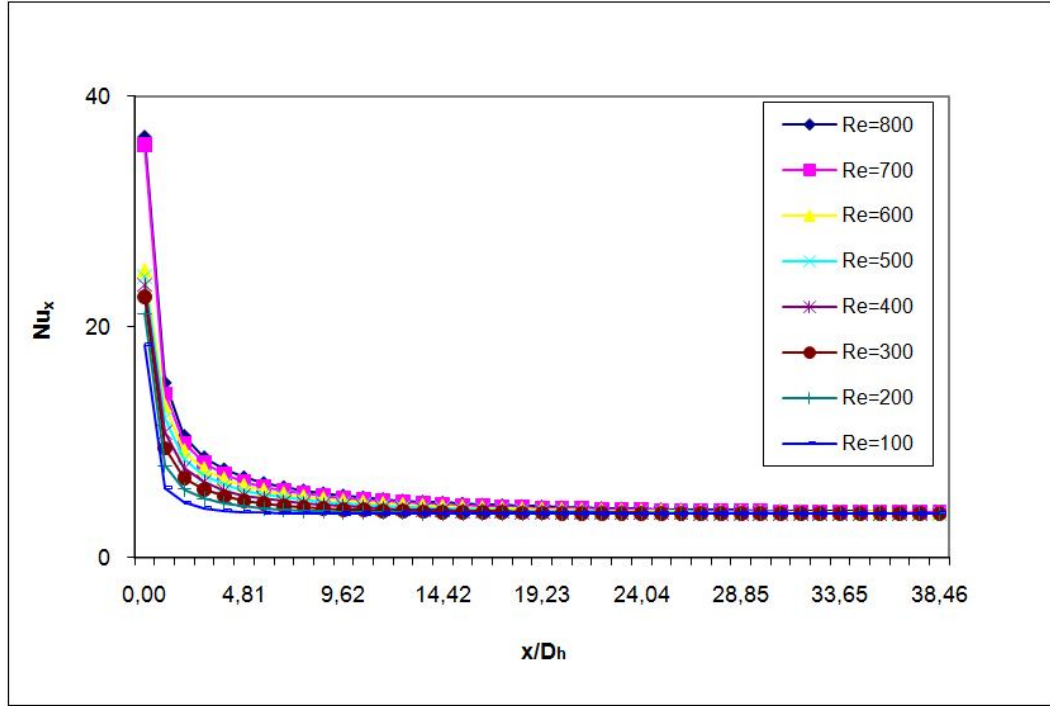
5.1.2. Sabit yüzey ısı akısı sınır şartında hava akışkanı için sonuçlar

Altıgen kesitli kanalda Reynolds sayısı 800 iken yedi farklı hücre sayısında çalışılarak, sayısal inceleme sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu koşulu sağlayan optimum hücre sayısı belirlenmiştir. Çizelge 5.3'te farklı hücre sayıları ile gerçekleştirilen sayısal inceleme sonucunda elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Hücre sayısının 600x36x18'den 834x50x25'e değişmesi durumunda ortalama Nusselt sayısında %0,163 oranında değişim, ortalama Darcy sürtünme katsayısında ise %0,441 oranında bir değişim görülmüştür. Bu nedenle optimum hücre sayısı 600x36x18 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. Hava akışkanının sabit ısı akısı duvar koşulu için elde edilen ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi

Hücre Sayısı (x,y,z)	$Nu_{m,H}$	$f_{m,H}$
267x16x8	3,906	0,129784
333x20x10	3,881	0,130559
500x30x15	3,857	0,131634
600x36x18	3,852	0,132002
667x40x20	3,849	0,132203
734x44x22	3,847	0,132373
834x50x25	3,845	0,132584

Dairesel kesitli olmayan kanallarda eksenel yönde yerel Nusselt sayısı Nu_x Eş.4.22'de belirtilen formülasyon yardımıyla hesaplanmıştır. Eş.4.22 kullanılarak hava akışkanının sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca $100 \leq Re \leq 800$ aralığı için hesaplanan değerleri grafiksel olarak Şekil 5.18'de verilmiştir.



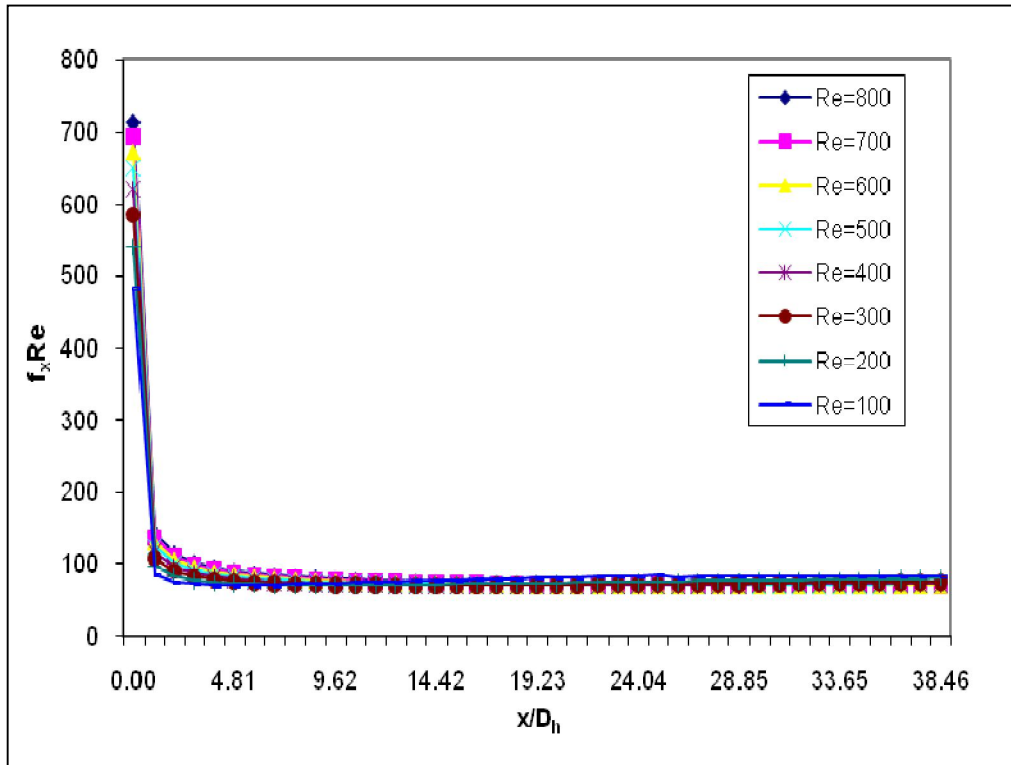
Şekil 5.18. Hava akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi

Şekil 5.18’de görüldüğü üzere kanal girişinde yerel Nusselt sayısı beklenildiği şekilde tüm Reynolds sayıları için yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında elde edilen yerel Nusselt sayılarının ise daha yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Kanal boyunca yerel Nusselt sayılarının tüm Reynolds sayıları için düşüş gösterdiği ve belirli bir mesafeden sonra 3,85 değerinde sabit kaldığı sonucu elde edilmiştir. Buradan çalışılan Reynolds sayısı aralığında sabit ısı akısı koşulu için hava akışkanının kanal boyunca ısı olarak tam gelişmişliği sağladığı görülmüştür. Bu doğrultuda hidrolik çapı 0,052 m olan düzgün altıgen kesitli kanal içerisinde hava akışkanının tam gelişmiş akış şartlarında Nusselt Sayısı değerinin 3,85 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı akışkan ve koşullar için eksenel yönde yerel Darcy sürtünme faktörü f_x ise Eş. 4.24’te belirtilen formülle hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda kanal uzunluğu boyunca elde edilen yerel Darcy sürtünme faktörü değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.19’da verilmiştir. Şekil 5.19’da görüldüğü üzere hesaplanan $f_x Re$ değerleri beklenildiği şekilde kanal girişinde yüksek değerler almıştır. $f_x Re$ değerinin yüksek

Reynolds sayılarında belirli bir kanal uzunluğundan sonra değişmediği ve 64,8 sabit değerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar neticesinde akışın kanal içinde belirli bir mesafeden sonra hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir.

Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki çalışmalarda elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.4’de verilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen yerel Nusselt sayısı ile literatürdeki çalışmalarda [17], [8] elde edilen sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla %0,26, %4,4 olduğu görülmüştür. Aynı şekilde $f_x Re$ sayısı ile literatürdeki [17], [8], [2] sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla %7,09, %7,03, %7,22 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak yapılan sayısal çalışma sonuçlarının literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilir.

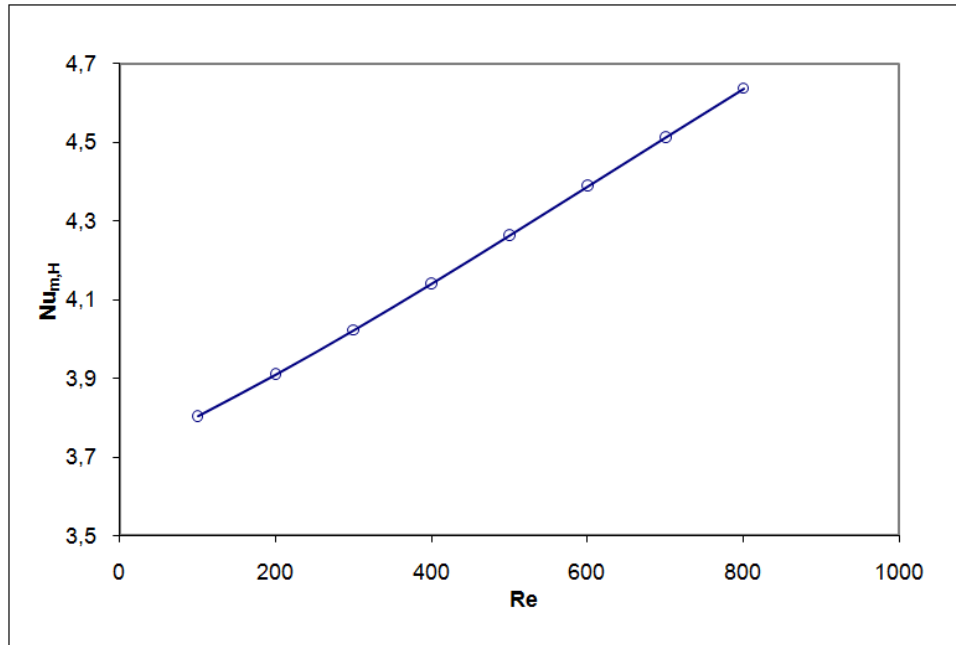


Şekil 5.19. Hava akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi

Çizelge 5.4. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanı için elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması

	Nu_x	$f_x Re$
Sayısal Sonuçlar	3,85	64,8
Ref. [17]	3,86	60,20
Ref. [8]	4,02	60,24
Ref. [2]	-	60,12
Ref. [18]	4,002	60,22

Ortalama Nusselt sayısı değerleri $100 \leq Re \leq 800$ değer aralığı için Şekil 5.20’de verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak kanal içindeki ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.3 ile ifade edilmiştir.

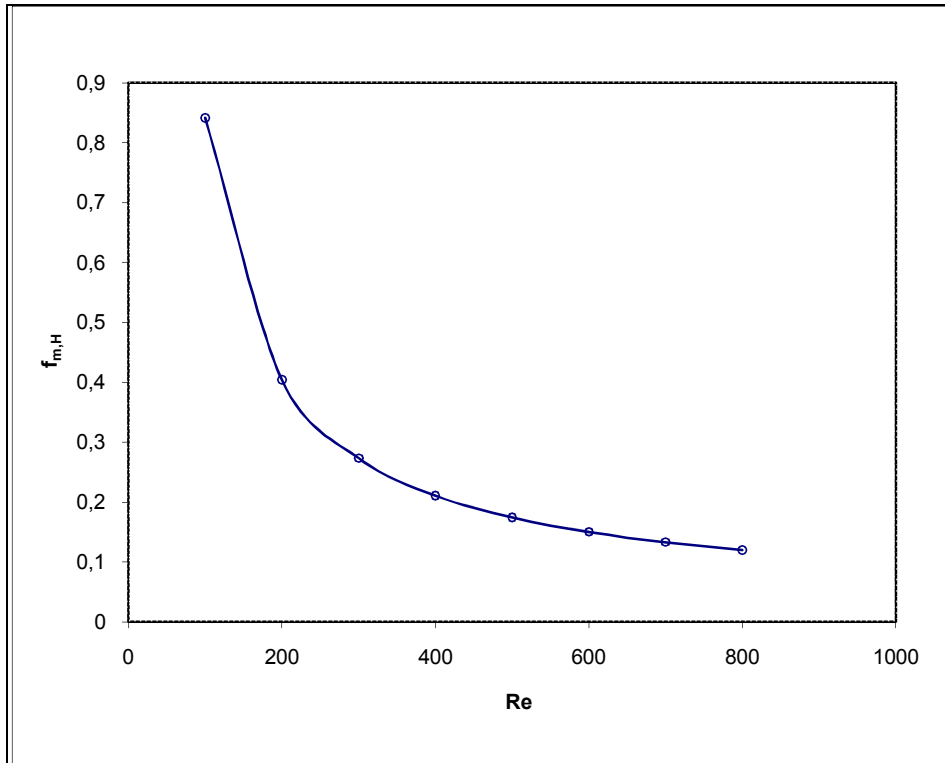


Şekil 5.20. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanına ait kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

$$Nu_{m,H} = 2,39 Re^{0,095} \quad (5.3)$$

Altıgen kesitli kanalda $100 \leq Re \leq 800$ Reynolds değerleri için hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları Şekil 5.21’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan Reynolds sayısına bağlı olarak Darcy sürtünme faktöründe azalma söz konusudur. Buradan Reynolds sayısı ile Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak Darcy sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.4 ile ifade edilmiştir.

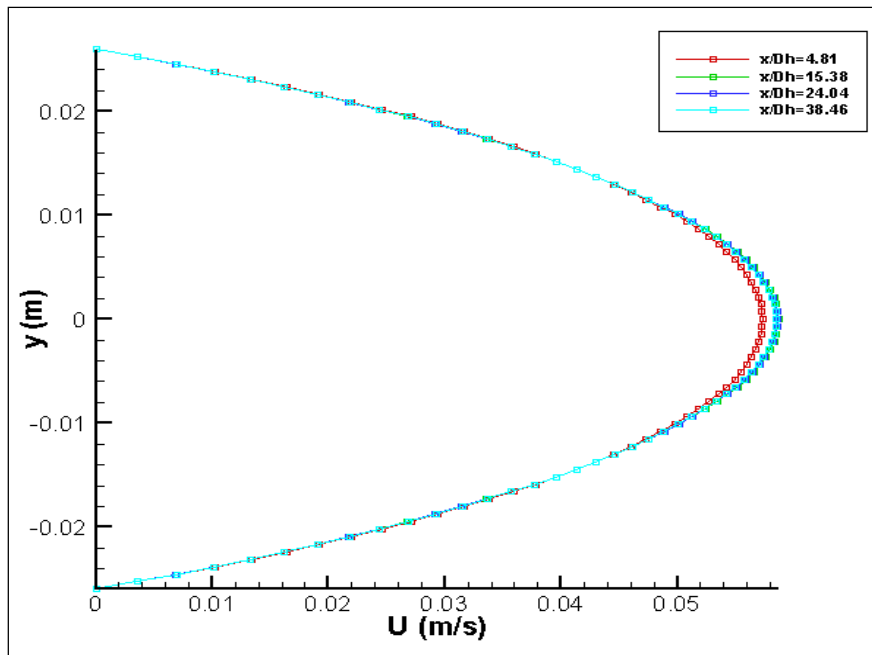
$$f_{m,H} = 57,98 Re^{-0,931} \quad (5.4)$$



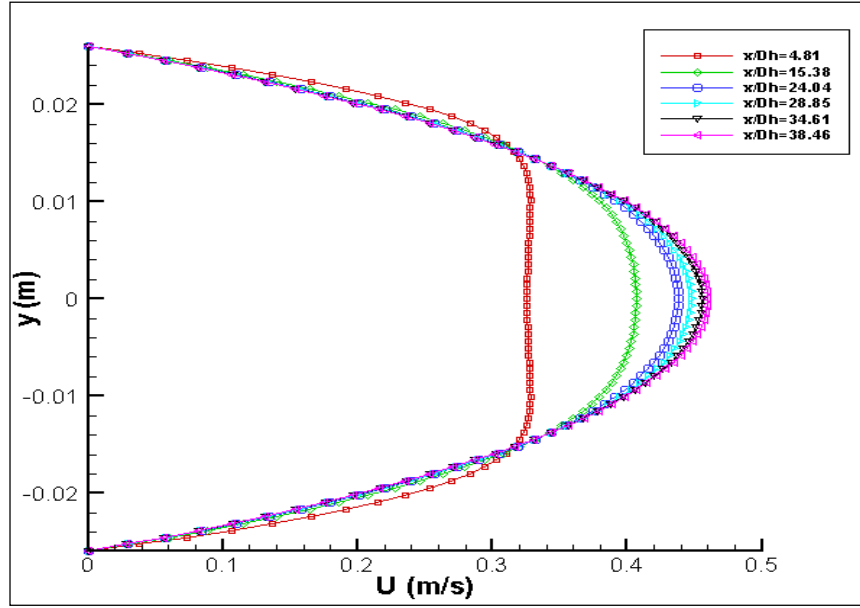
Şekil 5.21. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanı için elde edilen Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Altıgen kesitli kanalda hava akışkanının sabit ısı akısı duvar koşulu için simetri düzlemi ($z=0$) üzerindeki hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. Bu kesitler $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ olarak belirlenmiştir. Belirtilen kesitlerde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’te sunulmuştur. $Re=100$ için kanal x -mesafesi $x/D_h=15,38$ iken kanal içindeki akış hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmıştır. Kanal içindeki

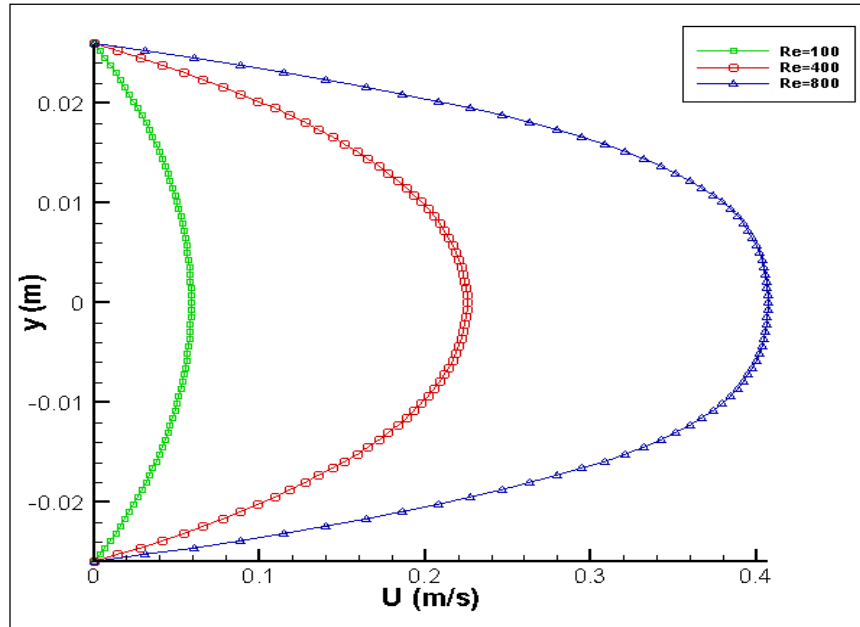
akış $Re=800$ 'de $x/D_h=34,61$ 'den itibaren hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür ve simetri düzleminde ($z=0$) kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ 'de oluşturulan x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri ise Şekil 5.24'te verilmiştir. Bu grafiklerden farklı Reynolds sayılarında kanal içindeki hız profillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Belirtilen kesitlerde $y=0$ simetri düzlemi için $Re=100$ ve $Re=800$ 'de kanal boyunca hız profilleri de benzer şekilde incelenmiş olup, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da sunulmuştur. $y=0$ simetri düzleminde elde edilen hız profillerinin $z=0$ simetri düzleminde elde edilen profillerle benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca $y=0$ simetri düzleminde $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde oluşturulan farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri de Şekil 5.27'de verilmiştir.



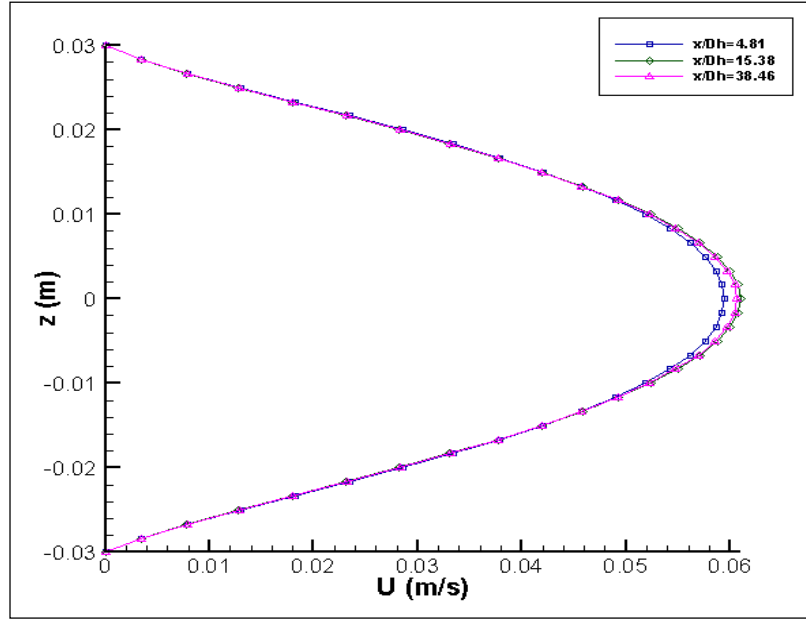
Şekil 5.22. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri



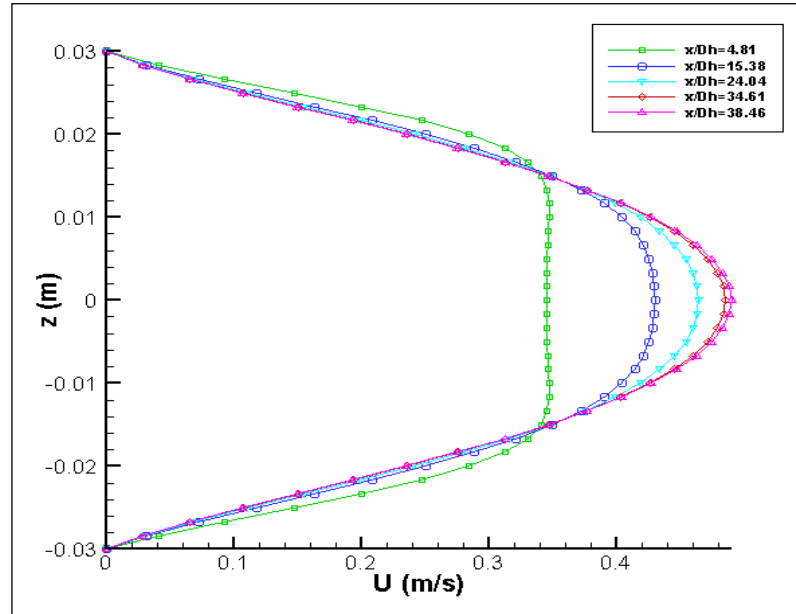
Şekil 5.23. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri



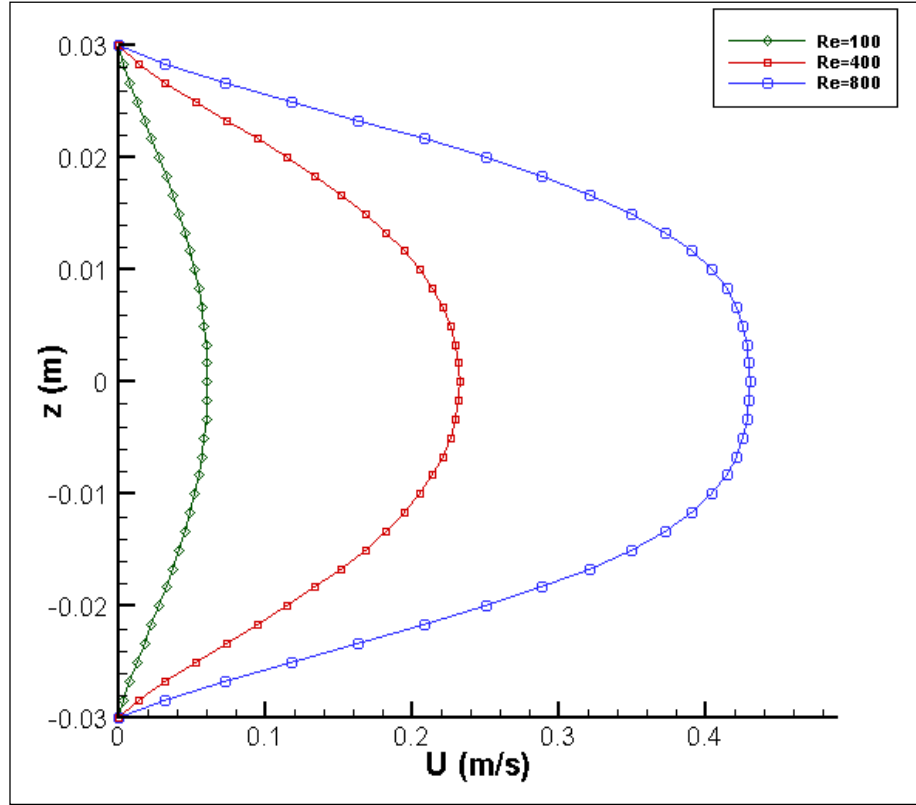
Şekil 5.24. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.25. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri

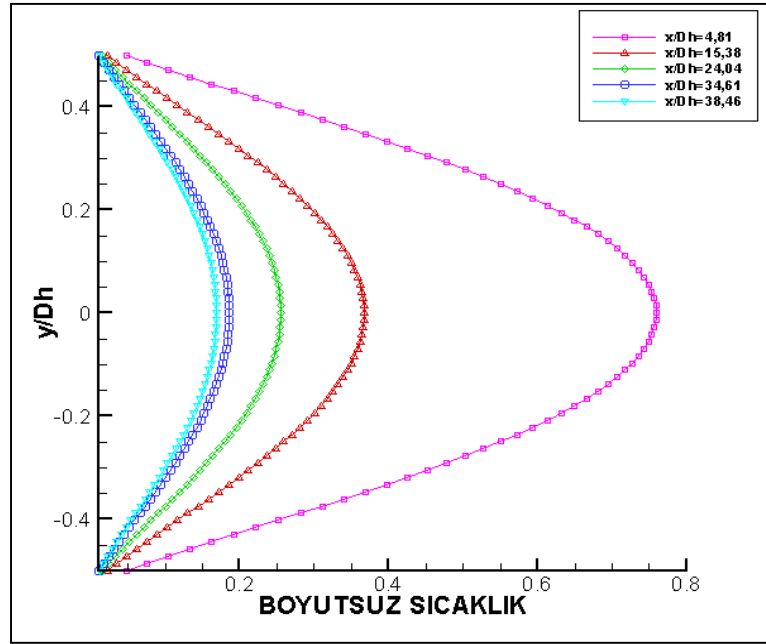


Şekil 5.26. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri

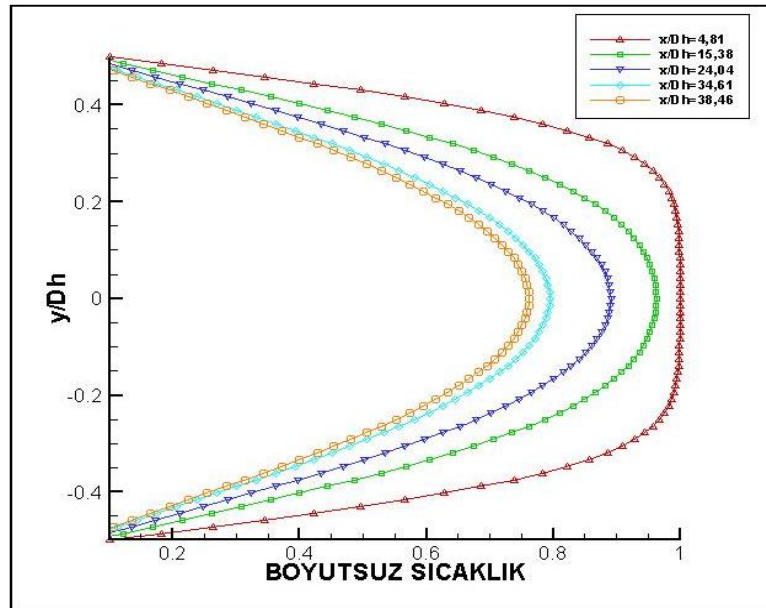


Şekil 5.27. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için hava akışkanına ait hız profilleri

Kanal boyunca sıcaklık dağılımı sürekli olarak değişmektedir. Kanal boyunca sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanı için boyutsuz sıcaklığın (θ) kanal yüksekliği ile değişimi Re=100 ve Re=800 için farklı x-mesafelerinde incelenmiş ve bu değişime ait grafikler Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da verilmiştir. Kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklığın değişimi simetri düzleminde oluşturulan yüzeyde ($z=0$) incelenmiştir. Re=100 için boyutsuz sıcaklık grafiği incelendiğinde akışın ısıl olarak gelişmiş koşullara $x/D_h=15,38$ 'de ulaştığı, Re=800 için ise kanal çıkışında akışın ısıl olarak gelişmiş koşullara hemen hemen ulaştığı söylenebilir.



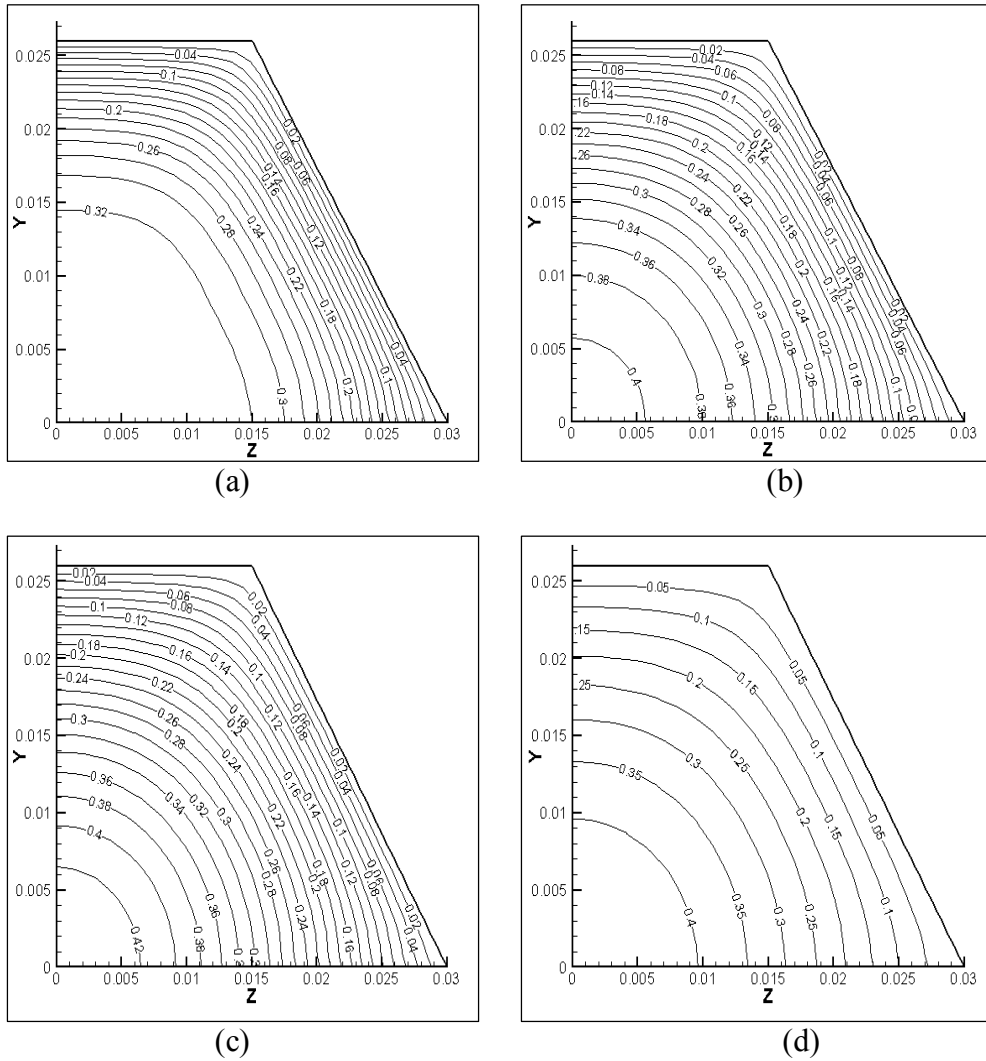
Şekil 5.28. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için hava akışkanının farklı x - mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi



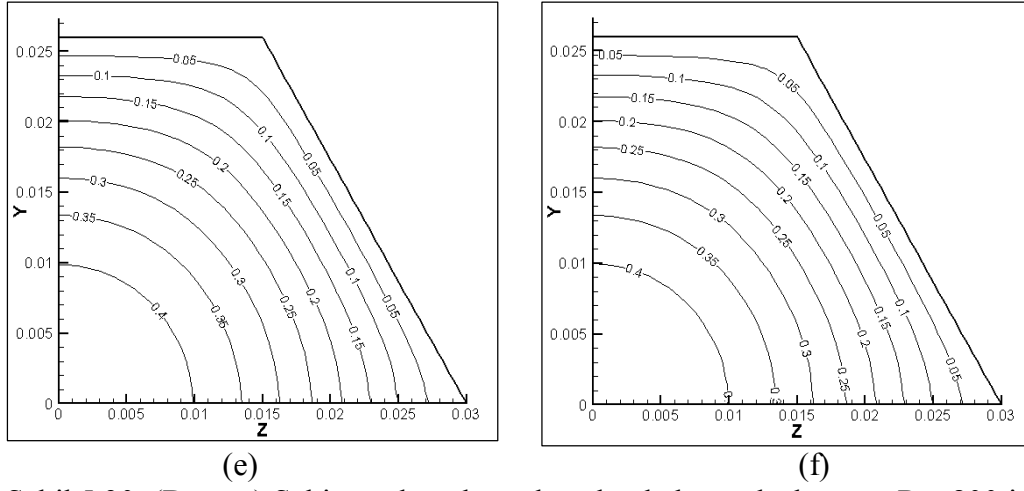
Şekil 5.29. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için hava akışkanının farklı x - mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi

Kanal boyunca $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ boyutsuz mesafelerinde y - z kesitlerindeki hız- kontur dağılımı grafikleri $Re=800$ ve $Re=100$ için Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de verilmiştir. Şekil 5.30'da görüldüğü üzere $Re=800$

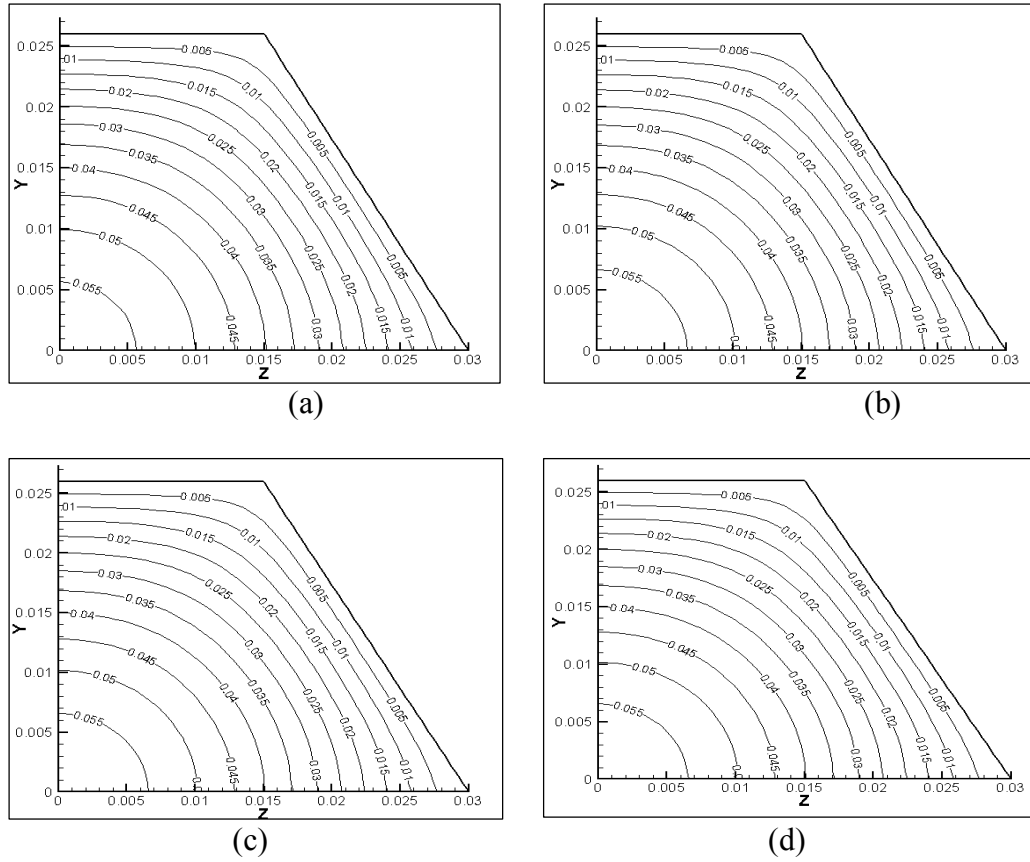
için akış kanal çıkışında hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaşmaktadır. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaştığı görülmüştür. Şekil 5.31’de ise $Re=100$ için hız dağılımı incelendiğinde $x/D_h=15,38$ ’den itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. Çalışmada ayrıca Reynolds sayısının hız dağılımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. $x/D_h=4,81$ iken y-z kesitindeki hız dağılımları üç farklı Reynolds sayısı için Şekil 5.32’de incelenmiştir.



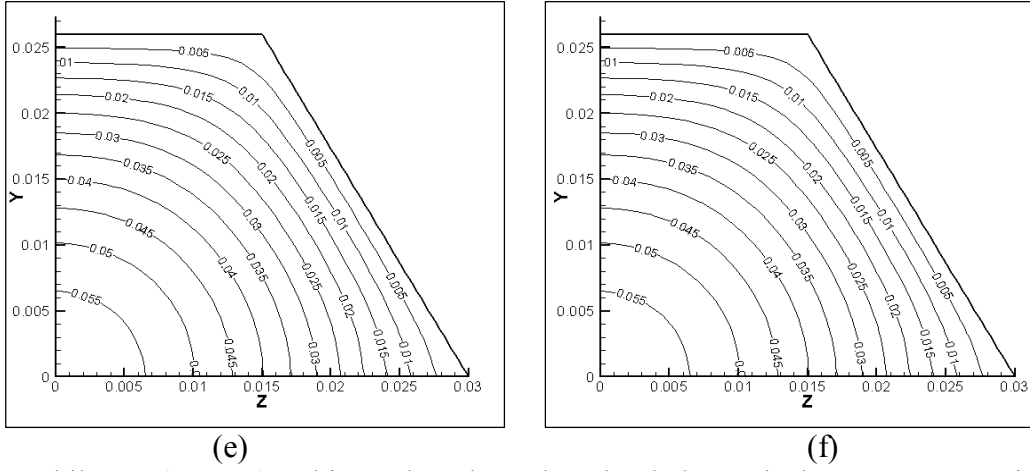
Şekil 5.30. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y-z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



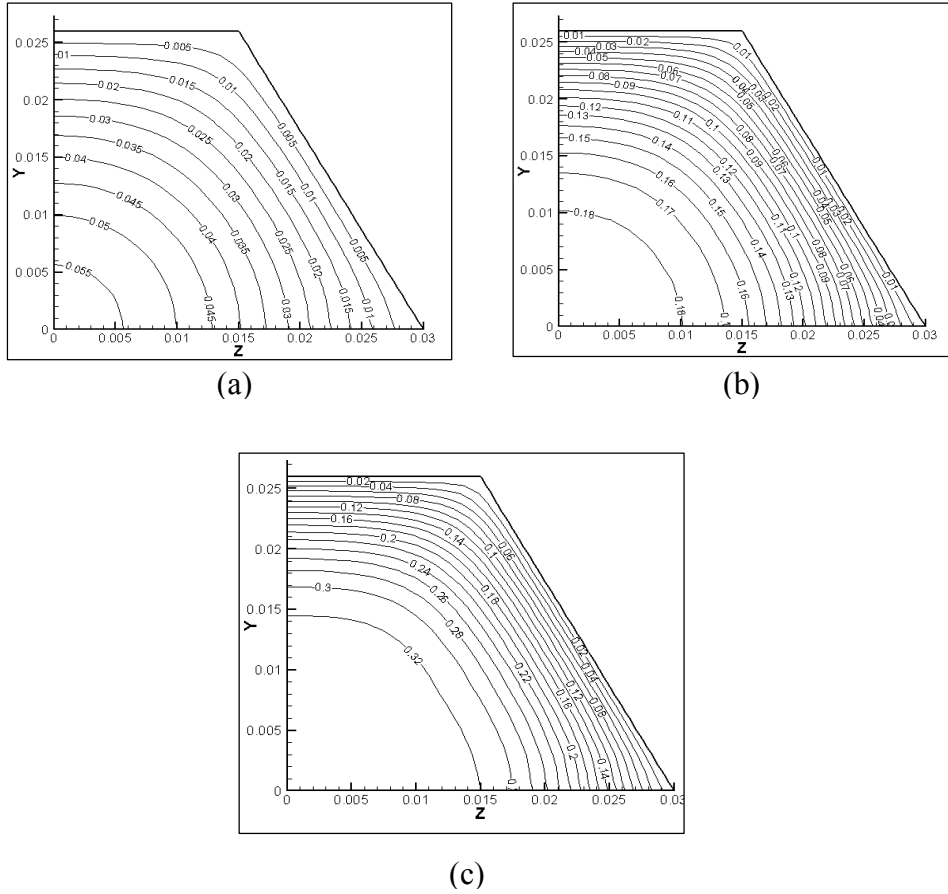
Şekil 5.30. (Devam) Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemlerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



Şekil 5.31. Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



Şekil 5.31.(Devam) Sabit ısı akısı duvar koşulunda hava akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$

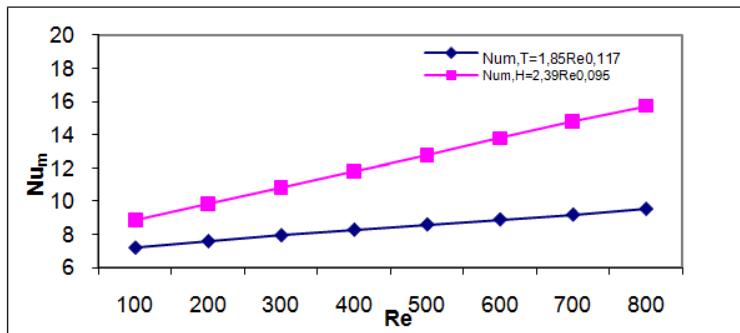


Şekil 5.32. Sabit ısı akısı koşulunda hava akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y - z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

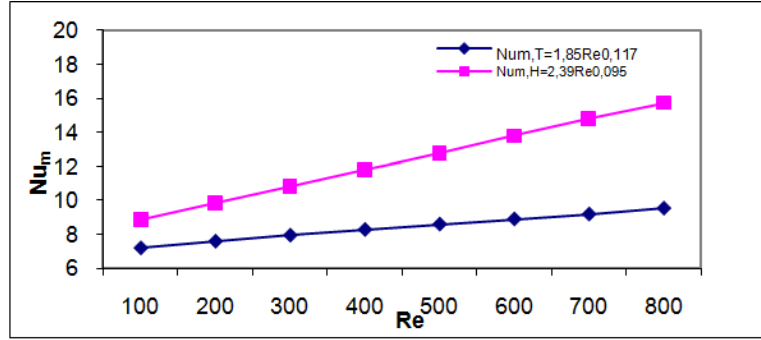
5.1.3. Altıgen kesitli kanalda hava akışkanı için sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sonuçlarının kıyaslanması

Altıgen kesitli kanalda hava akışkanı Bölüm 5.1.1 ve Bölüm 5.1.2’de sırasıyla sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulları için $100 \leq Re \leq 800$ aralığında sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen yerel Nusselt sayılarının ve ortalama Nusselt sayılarının farklı Reynolds sayılarında her iki koşul için karşılaştırması Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’te verilmiştir. Hava akışkanı için ortalama Nusselt sayısı değerleri sabit sıcaklık sınır koşulunda daha düşük, sabit ısı akısı sınır koşulunda ise beklenildiği şekilde yüksek çıkmıştır. Tam gelişmiş koşullarda Nusselt sayısı sabit sıcaklık sınır koşulu için 3,23; sabit ısı akısı sınır koşulu için ise 3,85 olarak belirlenmiştir.

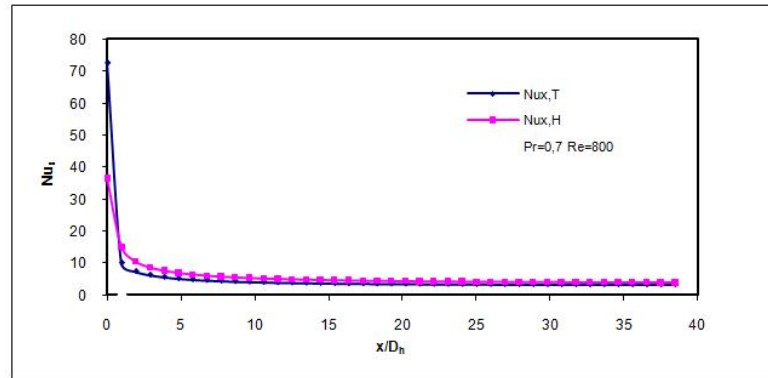
Her iki koşula ait sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında sabit duvar sıcaklığı koşulları altında hava akışkanının yüksek Reynolds sayılarında hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. Benzer şekilde sabit ısı akısı altında hava akışkanının aynı kanal uzunluğunda hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. İnceleme sonucunda elde edilen ortalama ve yerel Darcy sürtünme faktörünün farklı Reynolds sayılarında her iki koşul için karşılaştırması Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’da verilmiştir. Tam gelişmiş koşullarda $f_x Re$ değeri sabit sıcaklık sınır koşulu için 65,52; sabit ısı akısı sınır koşulu için ise 64,8 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.33 Hava akışkanı için ortalama Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması

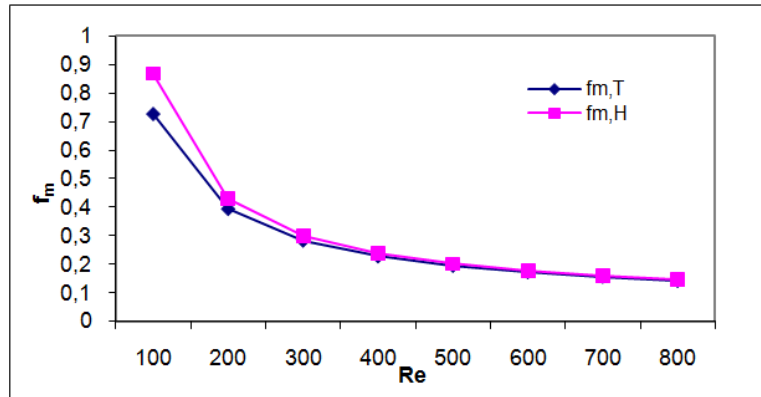


(a)

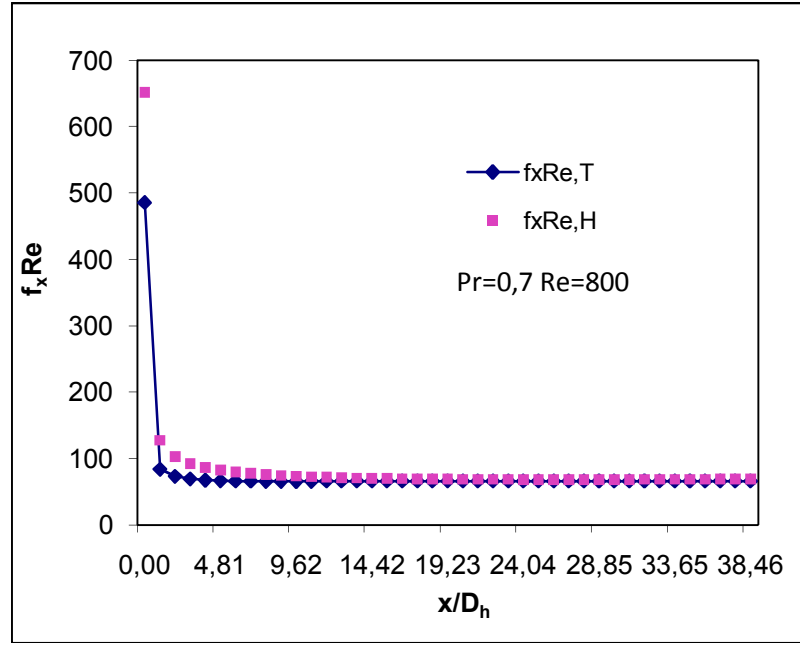


(b)

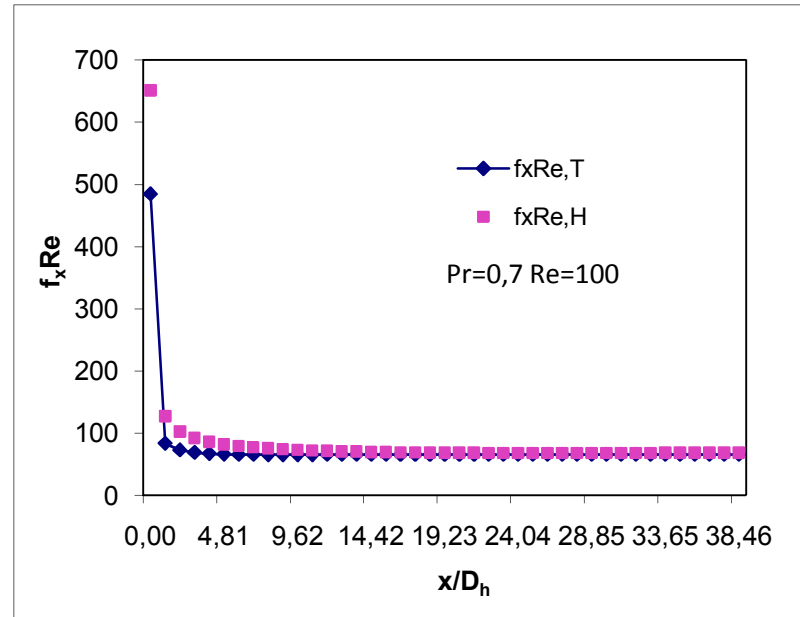
Şekil 5.34. Hava akışkanı için yerel Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması



Şekil 5.35. Hava akışkanı için ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayıları ile değişiminin sabit sıcaklık ve ısı akısı koşulu için karşılaştırılması



(a)



(b)

Şekil 5.35. Hava akışkanı için yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit sıcaklık ve ısı akısı koşulu için farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=800$, (b) $Re=100$ karşılaştırılması

5.2. Su İçin (Pr=7,6) Sonuçlar

Çalışmada kullanılan su akışkanı altıgen kesitli kanalda sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu için Reynolds sayısının 100 ile 800 değerleri için incelenmiştir. İnceleme neticesinde elde edilen sonuçlar alt bölümlerde verilmiştir.

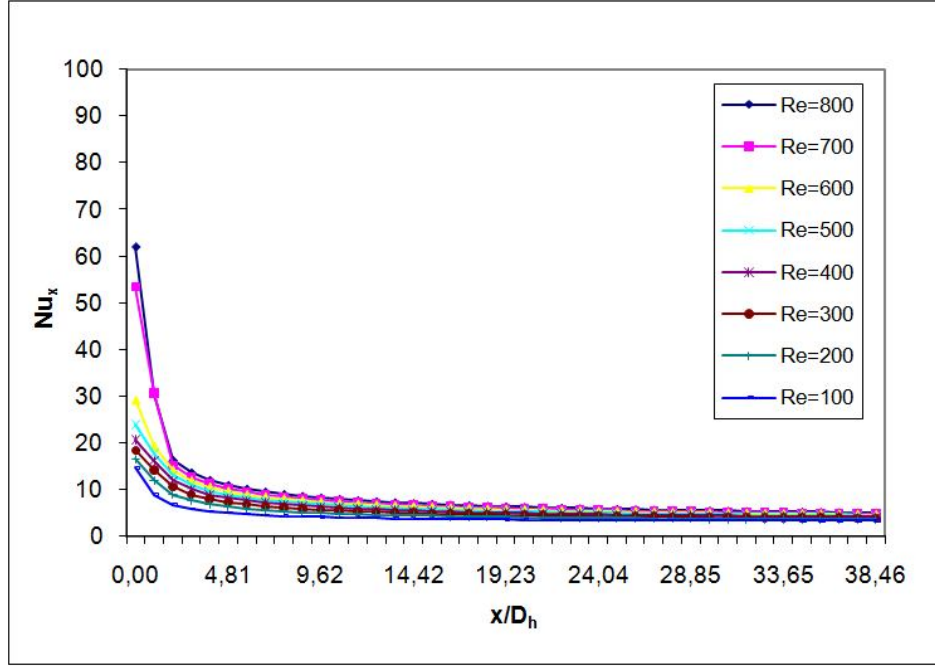
5.2.1. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında su akışkanı için sonuçlar

Altıgen kesitli kanalda Reynolds sayısı 800 iken yedi farklı hücre sayısında çalışılarak, sayısal inceleme sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu koşulu sağlayan optimum hücre sayısı belirlenmiştir. Çizelge 5.5'te farklı hücre sayıları ile gerçekleştirilen sayısal inceleme sonucunda elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Hücre sayısının 600x36x18'den 834x50x25'e değişmesi durumunda Nusselt sayısında %0,453 oranında değişim, Darcy sürtünme katsayısında ise %0,451 oranında bir değişim görülmüştür. Bu nedenle optimum hücre sayısı 600x36x18 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.5. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanına ait ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi

Hücre Sayısı (x,y,z)	$Nu_{m,T}$	$f_{m,T}$
267x16x8	8,744	0,105900
333x20x10	8,562	0,106539
500x30x15	8,389	0,107435
600x36x18	8,350	0,107755
667x40x20	8,335	0,107923
734x44x22	8,324	0,108065
834x50x25	8,312	0,108241

Eş.4.22 kullanılarak su akışkanının sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca $100 \leq Re \leq 800$ aralığı için hesaplanan değerleri grafiksel olarak Şekil 5.37'de verilmiştir.



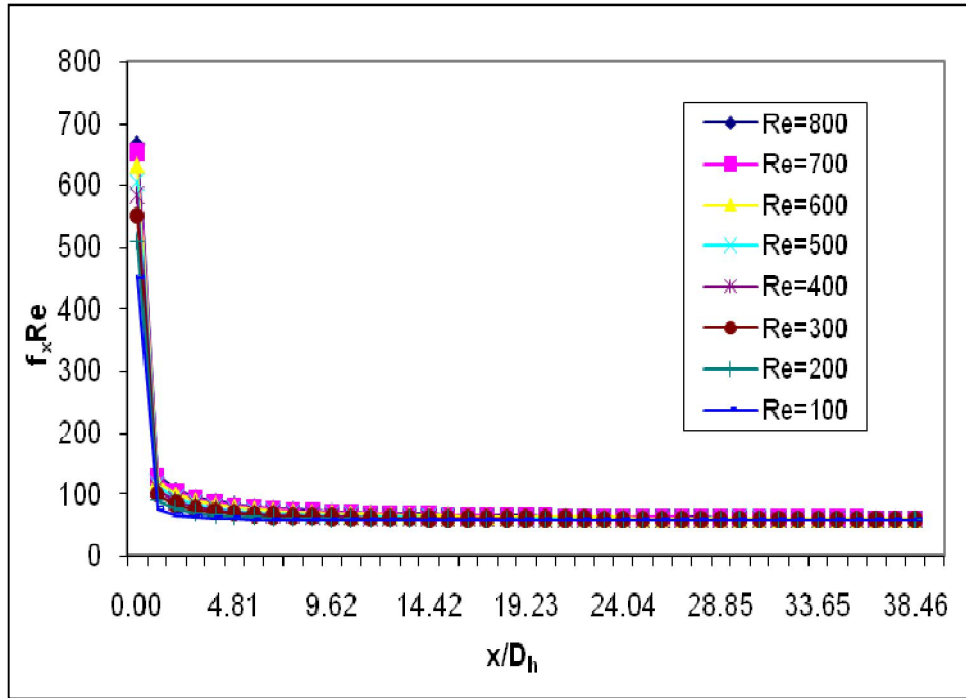
Şekil 5.36. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi

Şekil 5.37’de görüldüğü üzere kanal girişinde yerel Nusselt sayısı beklenildiği şekilde tüm Reynolds sayıları için yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında elde edilen yerel Nusselt sayılarının ise daha yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Kanal boyunca yerel Nusselt sayılarının tüm Reynolds sayıları için düşüş gösterdiği ve belirli bir mesafeden sonra düştüğü görülmüştür. Kanal içerisindeki akış ısı olarak tam gelişmişliği sağlamaktadır. Bu doğrultuda hidrolik çapı 0,052 m olan düzgün altıgen kesitli kanal içerisinde su akışkanının ısı olarak tam gelişmiş akış şartlarına ulaştığı durum için Nusselt Sayısı değerinin 3,32 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı akışkan ve koşullar için eksenel yönde yerel Darcy sürtünme faktörü f_x ise Eş. 4.24’te belirtilen formülle hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda kanal uzunluğu boyunca elde edilen yerel Darcy sürtünme faktörü değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.38’de verilmiştir. Şekil 5.38’de görüldüğü üzere hesaplanan $f_x Re$ değerleri beklenildiği şekilde kanal girişinde yüksek değerler almıştır. $f_x Re$ değerinin belirli bir

kanal uzunluğundan sonra değişmediği ve 58,76 sabit değerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit kaldığı kanal uzunluğundan itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullar altındaki $f_x Re$ değeri 58,76 olarak bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki çalışmalarda elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen yerel Nusselt sayısı ile literatürdeki çalışmalarda [3], [8] sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla % 0,3 ve % 0,9 olduğu görülmüştür. Aynı şekilde $f_x Re$ sayısı ile literatürdeki [17], [3], [8] sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla % 2,45, % 2,31 ve %2,52 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak yapılan sayısal çalışma sonuçlarının literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilir.

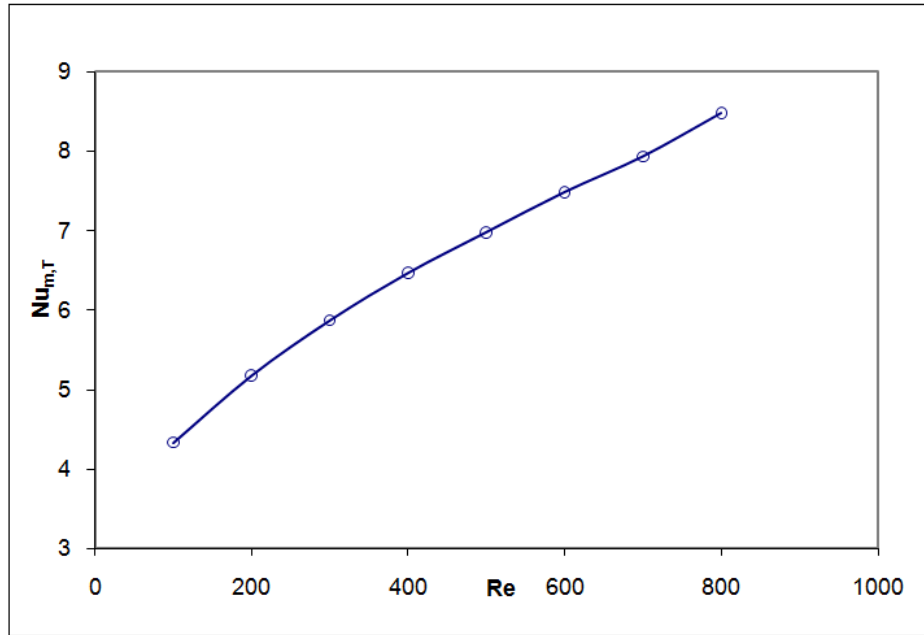


Şekil 5.37. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi

Çizelge 5. 6. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür sonuçları ile karşılaştırılması

	Nu_x	$f_x Re$
Sayısal Sonuçlar	3,32	58,76
Ref. [17]	-	60,20
Ref. [3]	3,33	60,12
Ref. [8]	3,35	60,24
Ref. [18]	3,34	60,22

Ortalama Nusselt sayısı değerleri $100 \leq Re \leq 800$ değer aralığı için Şekil 5.39’da verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak kanal içindeki ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.5 ile ifade edilmiştir.

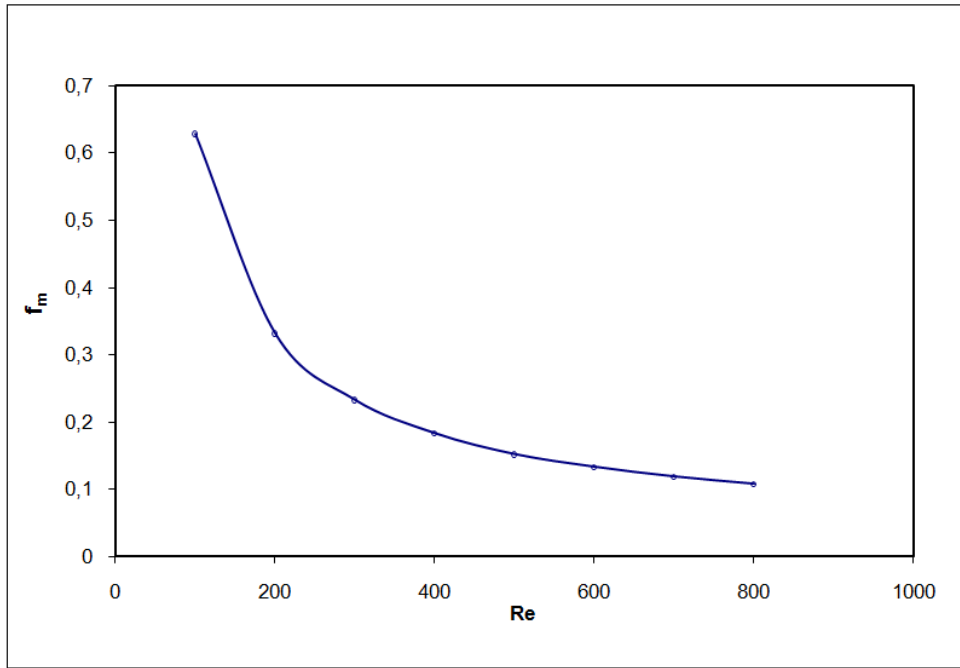


Şekil 5.38. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

$$Nu_{m,T} = 0,96 Re^{0,321} \quad (5.5)$$

Altıgen kesitli kanalda $100 \leq Re \leq 800$ Reynolds değer aralığı için hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları Şekil 5.40'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan Reynolds sayısına bağlı olarak Darcy sürtünme faktöründe azalma söz konusudur. Buradan Reynolds sayısı ile Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak Darcy sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.6 ile ifade edilmiştir.

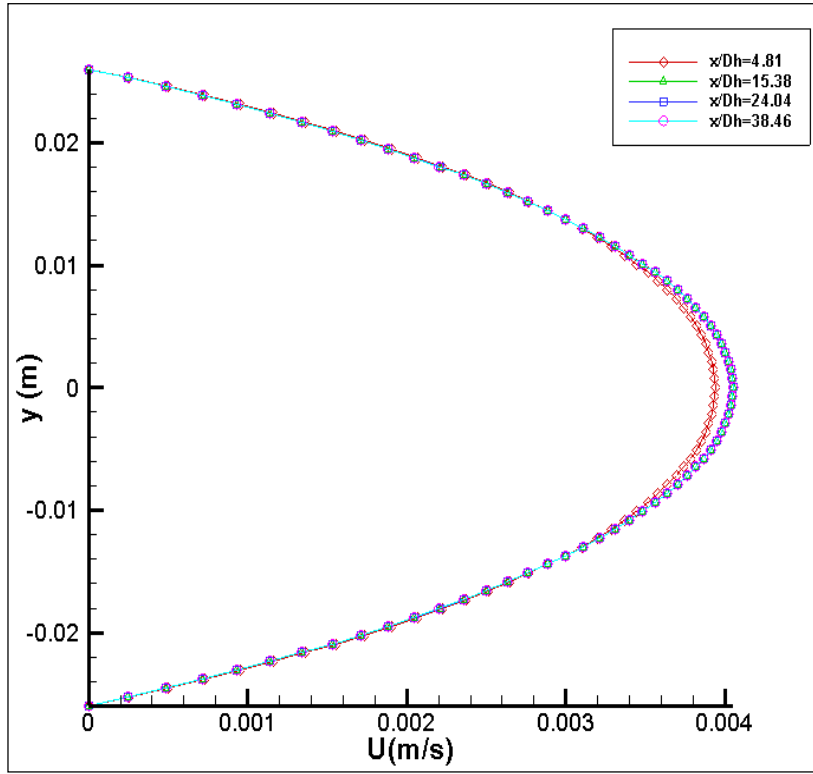
$$f_{m,T} = 29,98 Re^{-0,846} \quad (5.6)$$



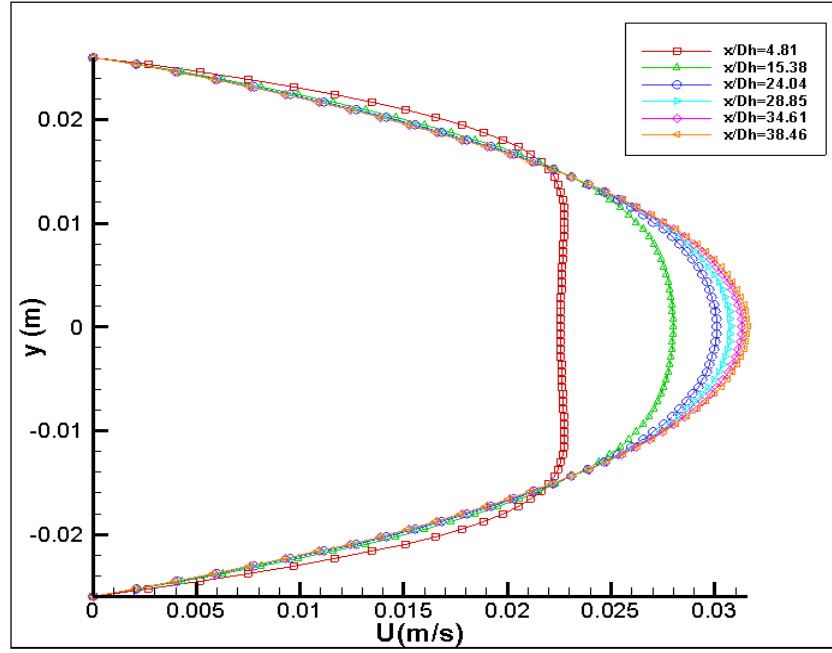
Şekil 5.39. Su akışkanı için sabit duvar sıcaklığı koşulunda ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Altıgen kesitli kanalda su akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulu için simetri düzlemi ($z=0$) üzerindeki hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. Bu kesitler $x/D_h = 4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ olarak belirlenmiştir. Belirtilen kesitlerde $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de sunulmuştur. $Re=100$ için kanal x -mesafesi $x/D_h=15,38$ iken kanal içindeki akış tam gelişmiş koşullara ulaşmıştır. Kanal içindeki akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşma mesafesi $Re=800$ için ise

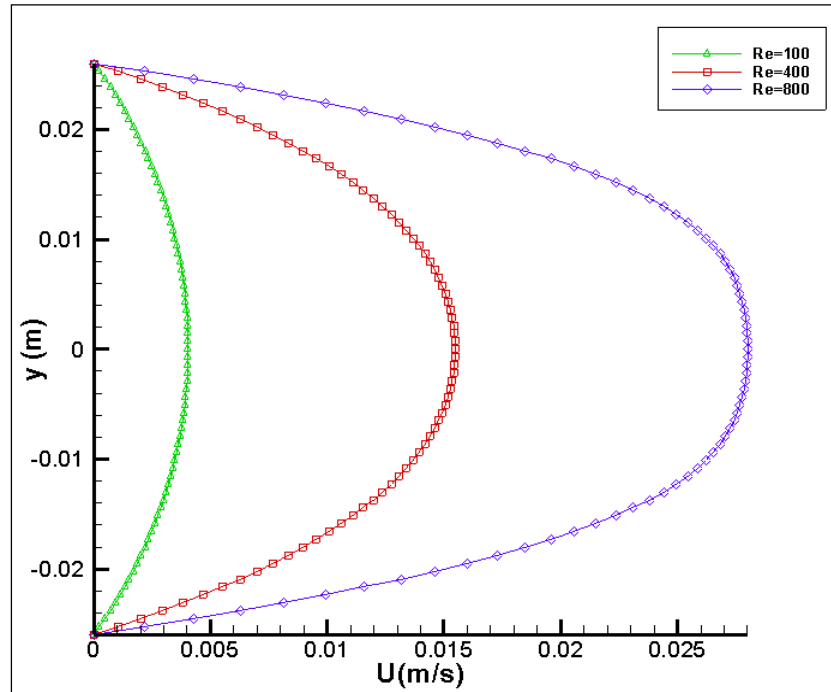
$x/D_h=34,61$ olarak belirlenmiştir. $z=0$ simetri düzleminde kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri ise Şekil 5.43'te verilmiştir. Bu grafiklerden, farklı Reynolds sayılarında kanal içindeki hız profillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde $y=0$ simetri düzleminde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.44 ve Şekil 5.45'te sunulmuştur. Hız profillerinin her iki simetri düzleminde de benzer olduğu görülmüştür. $y=0$ simetri düzleminde kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri de Şekil 5.46'da verilmiştir.



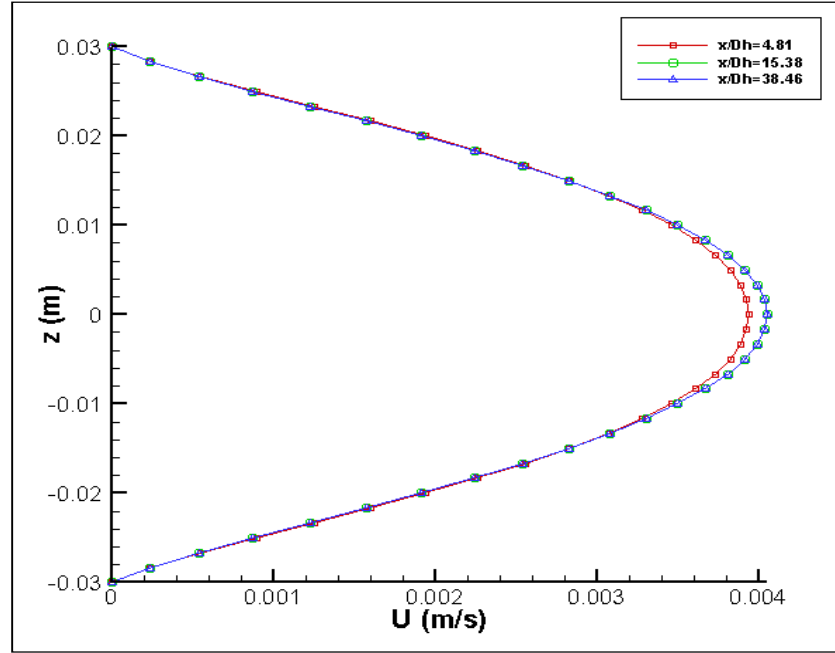
Şekil 5.40. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



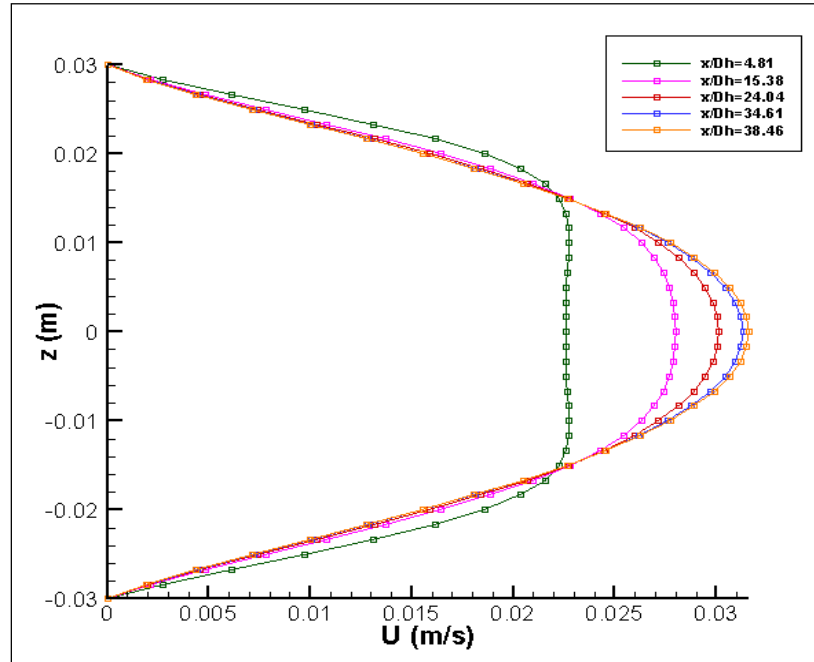
Şekil 5.41. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



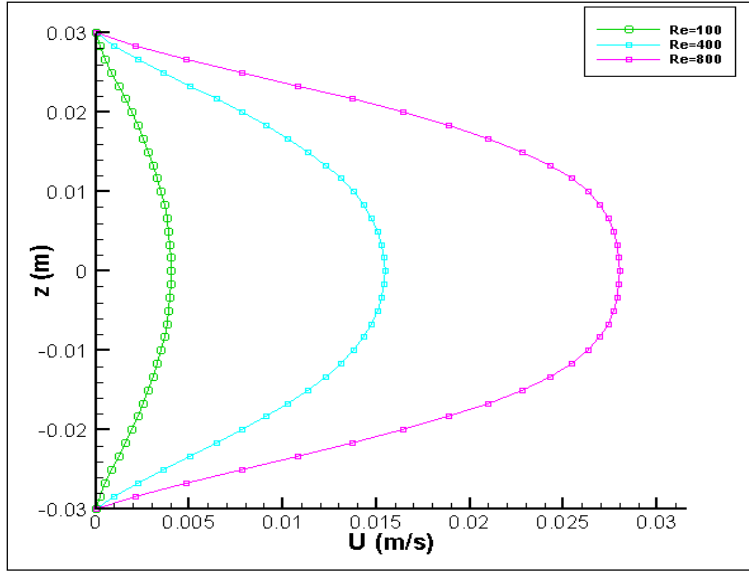
Şekil 5.42. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.43. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



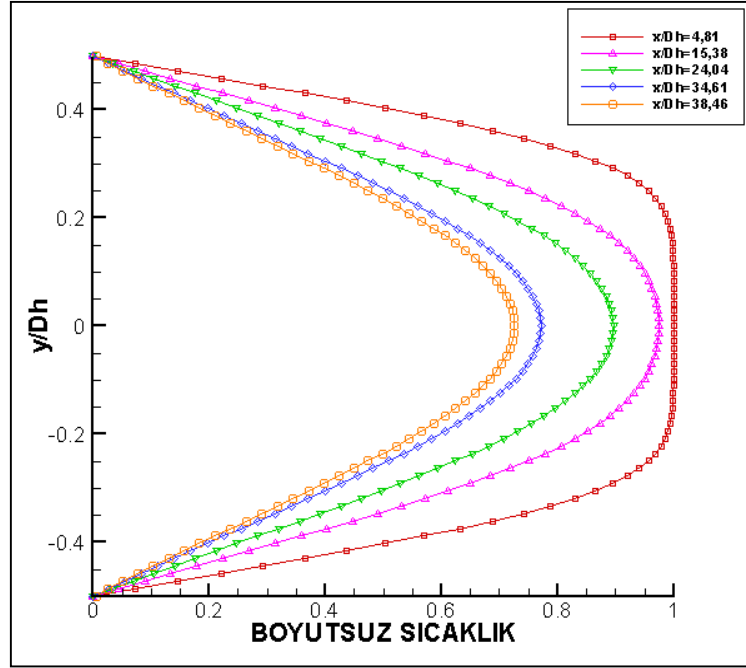
Şekil 5.44. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



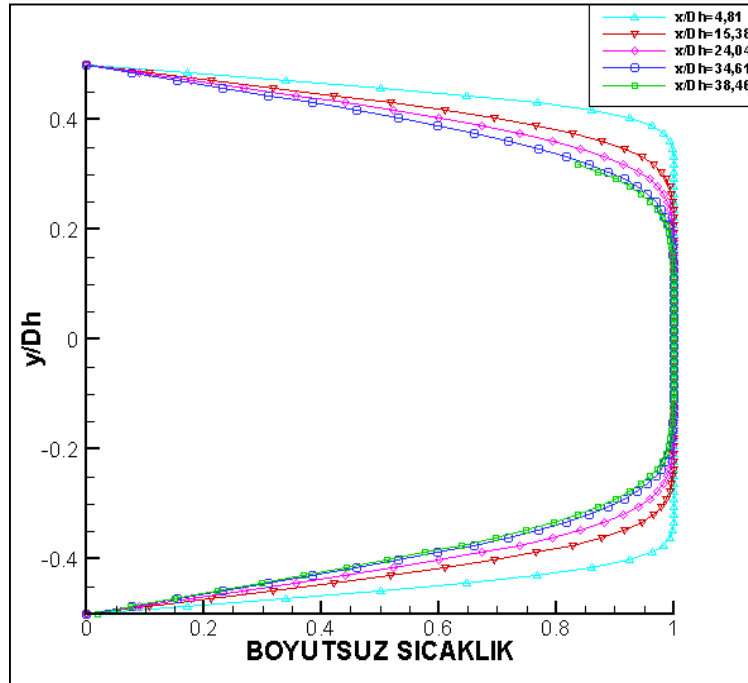
Şekil 5.45. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için su akışkanına ait hız profilleri

Kanal boyunca sıcaklık dağılımı sürekli olarak değişmektedir. Kanal boyunca sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanı için boyutsuz sıcaklığın (θ) kanal yüksekliği ile değişimi $Re=100$ ve $Re=800$ için farklı x-mesafelerinde incelenmiş ve bu değişime ait grafikler Şekil 5.47 ve Şekil 5.48’de verilmiştir. Kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklığın değişimi simetri düzleminde oluşturulan yüzeyde ($z=0$) incelenmiştir. İnceleme sonucunda boyutsuz sıcaklık profillerinin $Re=100$ için $x/D_h=34,61$ ’de ısıl olarak kararlı rejim koşullarına hemen hemen ulaştığı, $Re=800$ için ise ısıl olarak kararlı rejim koşullarına ulaşmadığı söylenebilir.

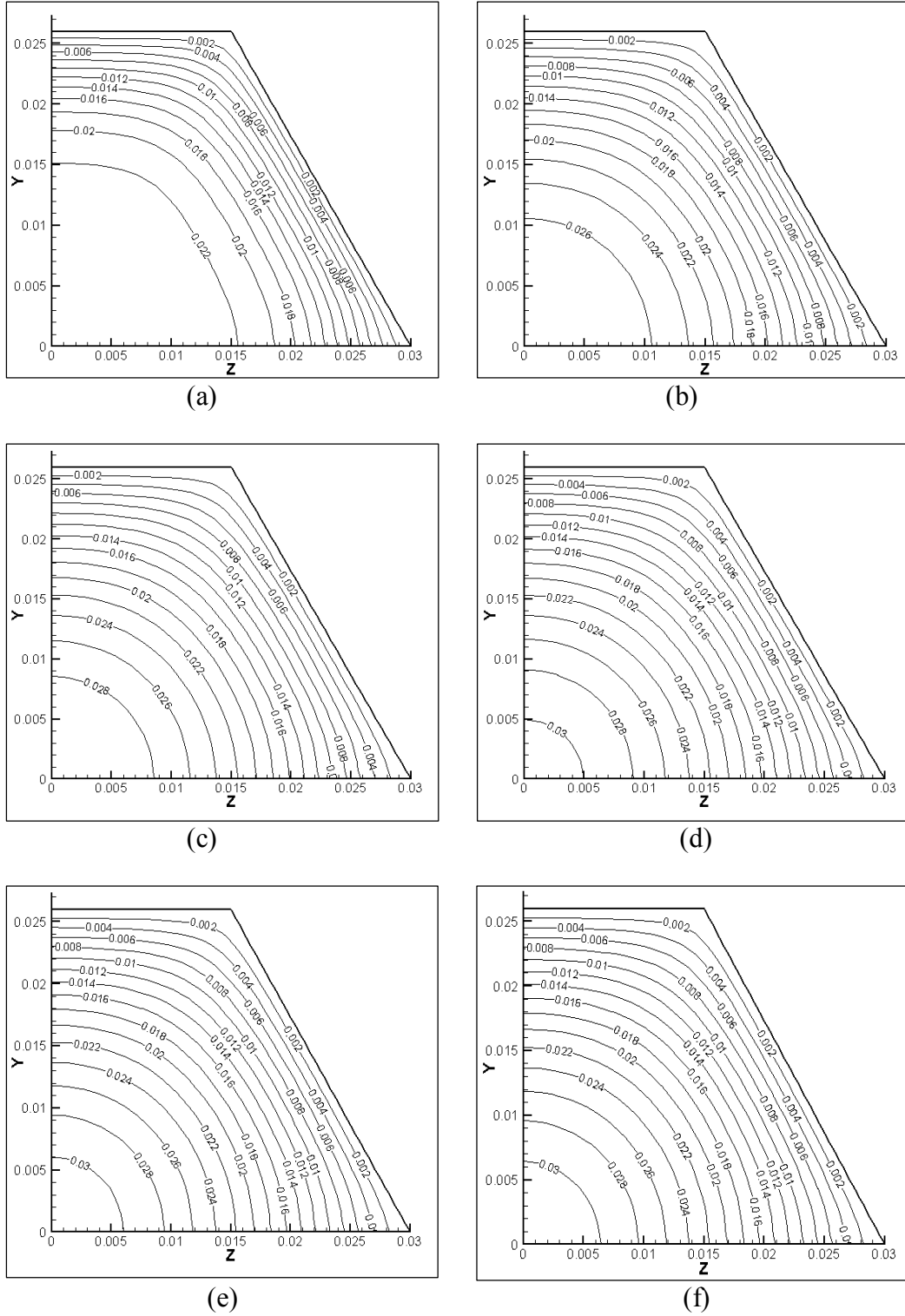
Kanal boyunca $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ boyutsuz mesafelerinde y-z kesitlerindeki hız- kontur dağılımı grafikleri $Re=800$ ve $Re=100$ için Şekil 5.49 ve Şekil 5.50’de verilmiştir. Şekil 5.49 ve Şekil 5.50’de görüldüğü üzere $Re=800$ için hız dağılımı su akışkanı için incelendiğinde $x/D_h=34,61$ ’den itibaren; $Re=100$ için de $x/D_h=15,38$ ’den itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür.



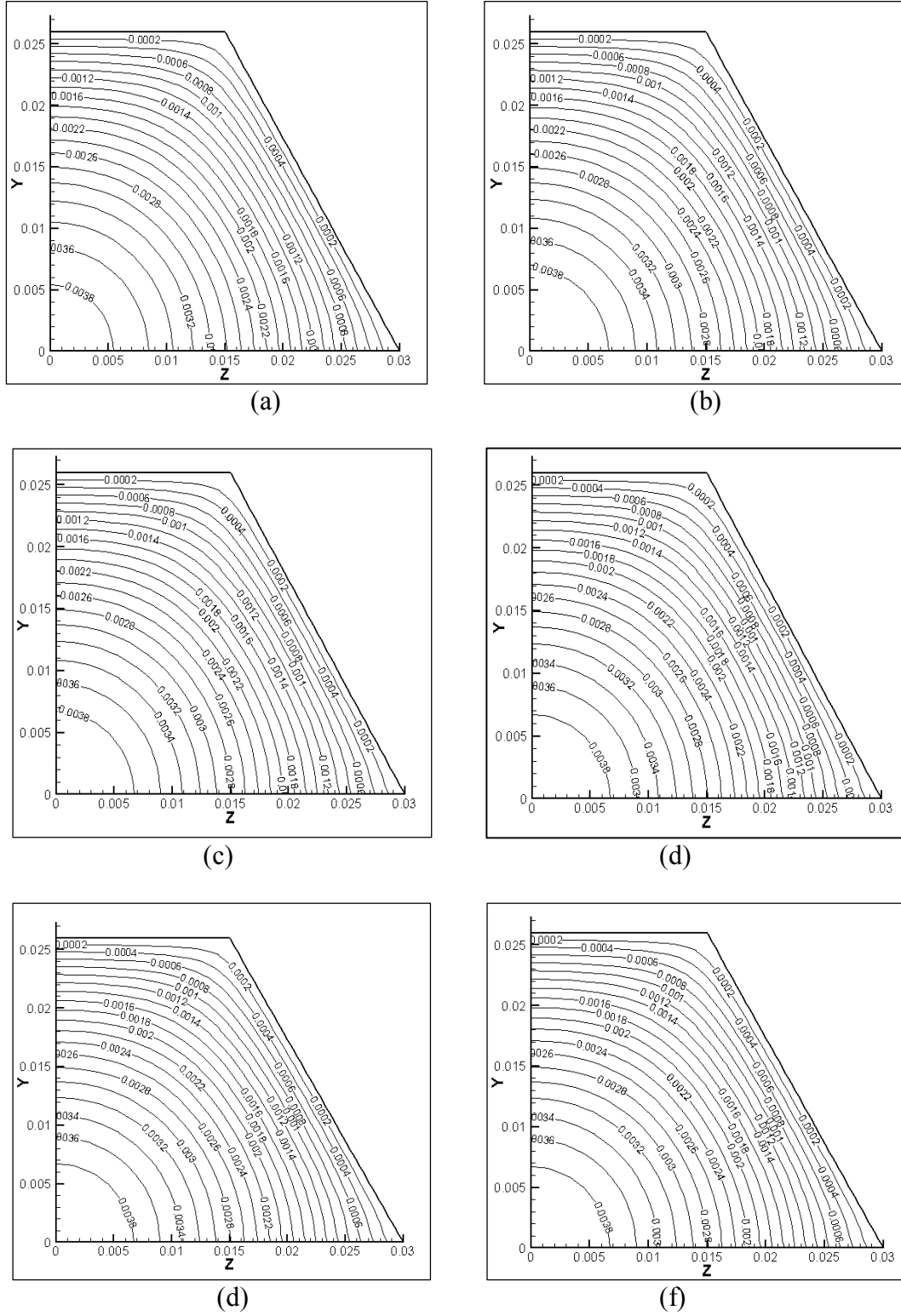
Şekil 5.46. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için su akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi



Şekil 5.47. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için su akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi

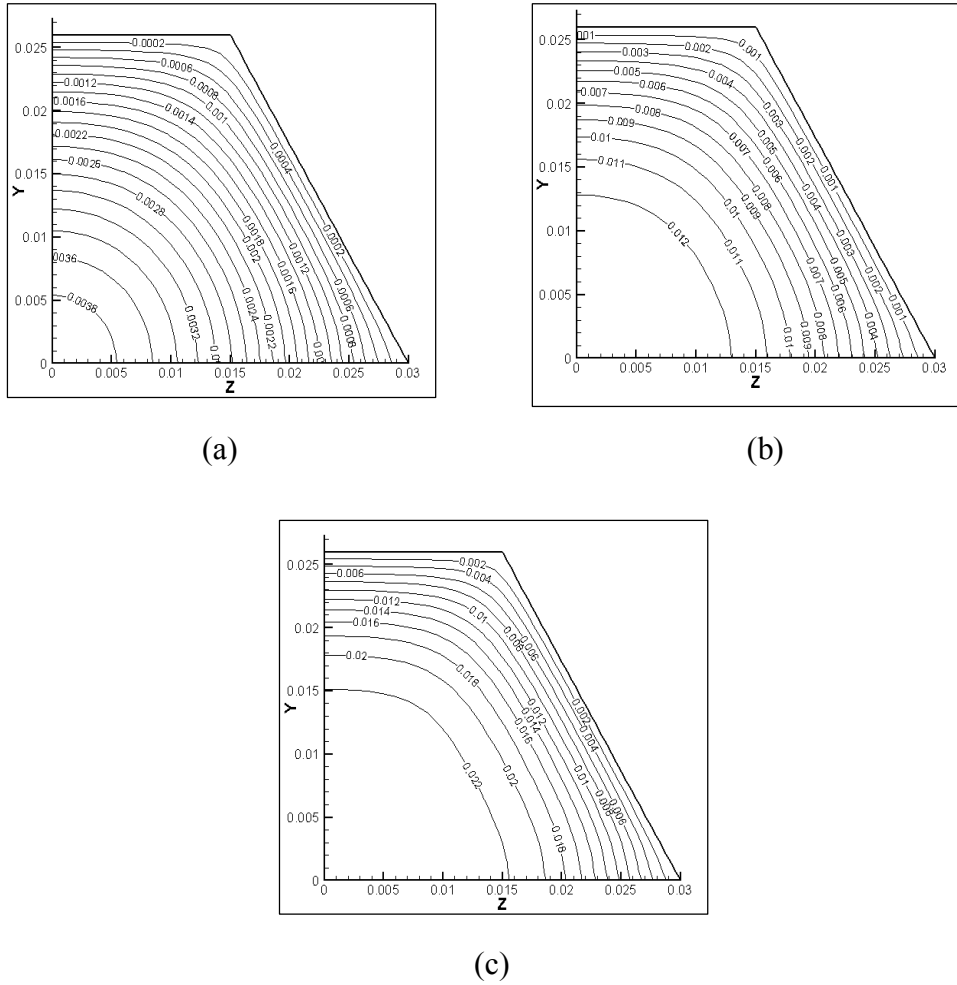


Şekil 5.48. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



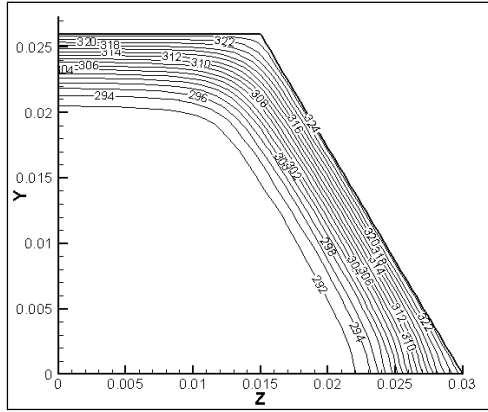
Şekil 5.49. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,1$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$

Çalışmada ayrıca Reynolds sayısının hız dağılımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. $x/D_h=4,81$ iken y-z kesitindeki hız dağılımları üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Şekil 5.51'de $Re=100$, 400 ve 800 için hız dağılımlarının incelenmesi sonucu artan hızla birlikte kanal duvar kenarlarında görülen hız sınır tabakası kalınlığında azalma gözlenmiştir.

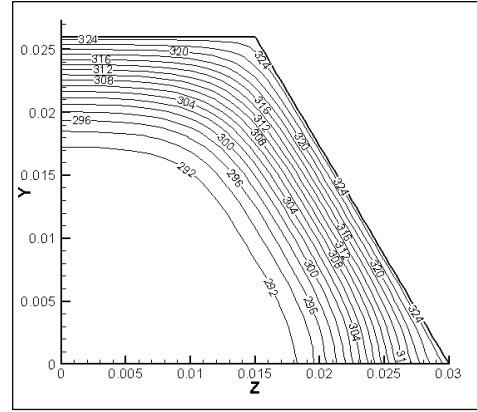


Şekil 5.50.Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanına ait farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

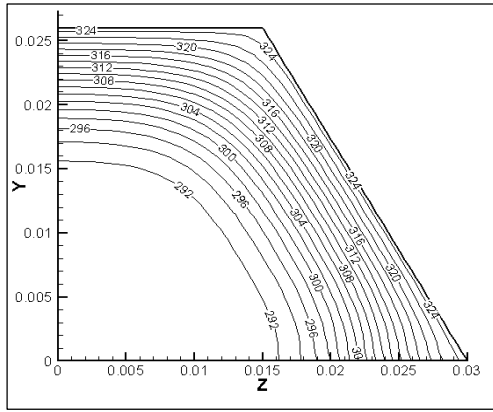
Kanal boyunca $x/D_h=4,81$, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61 ve 38,46 boyutsuz mesafelerinde y-z kesitlerindeki sıcaklık dağılımı grafikleri $Re=800$ için Şekil 5.52'de verilmiştir.



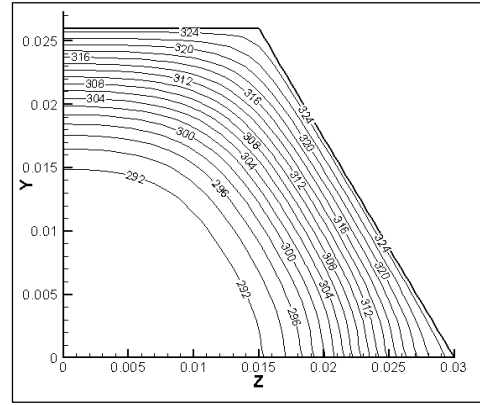
(a)



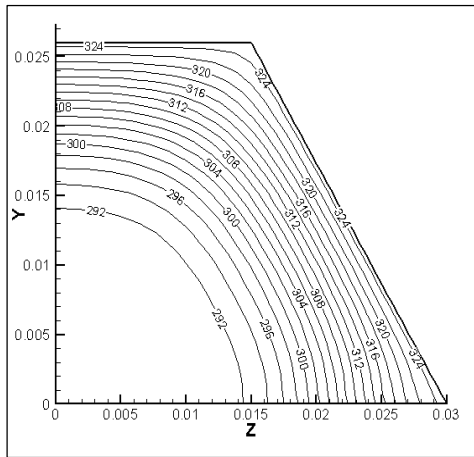
(b)



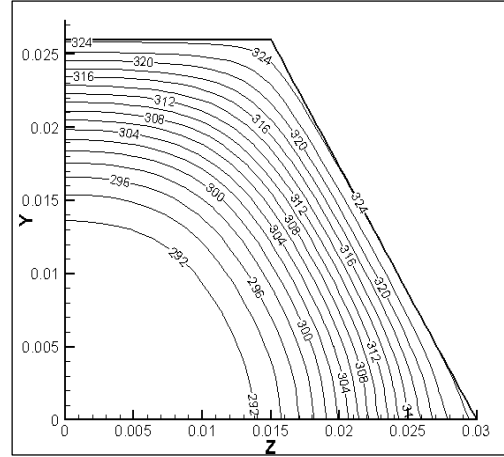
(c)



(d)



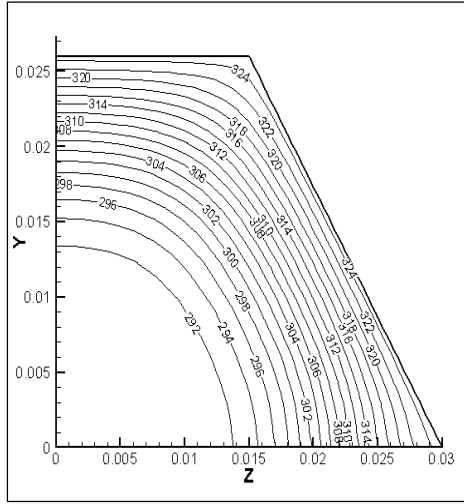
(e)



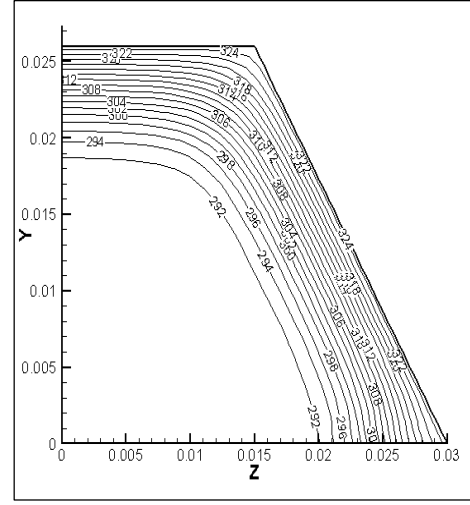
(f)

Şekil 5.51. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının $Re=800$ için farklı y-z kesitlerinde kanal boyunca sıcaklık dağılımları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$

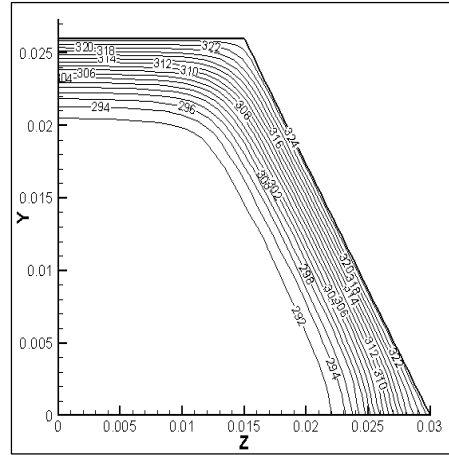
Su akışkanının sabit sıcaklık duvar sınır koşulu için kanal boyunca sıcaklık dağılımları y-z kesitinde farklı Reynolds sayıları için incelendiğinde $x/D_h=4,81$ boyutsuz mesafesinde elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 5.53'te verilmiştir. Elde edilen grafiklerden Reynolds sayısı azaldıkça sıcaklık sınır tabakası kalınlığının arttığı görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.52. Sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki sıcaklık dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

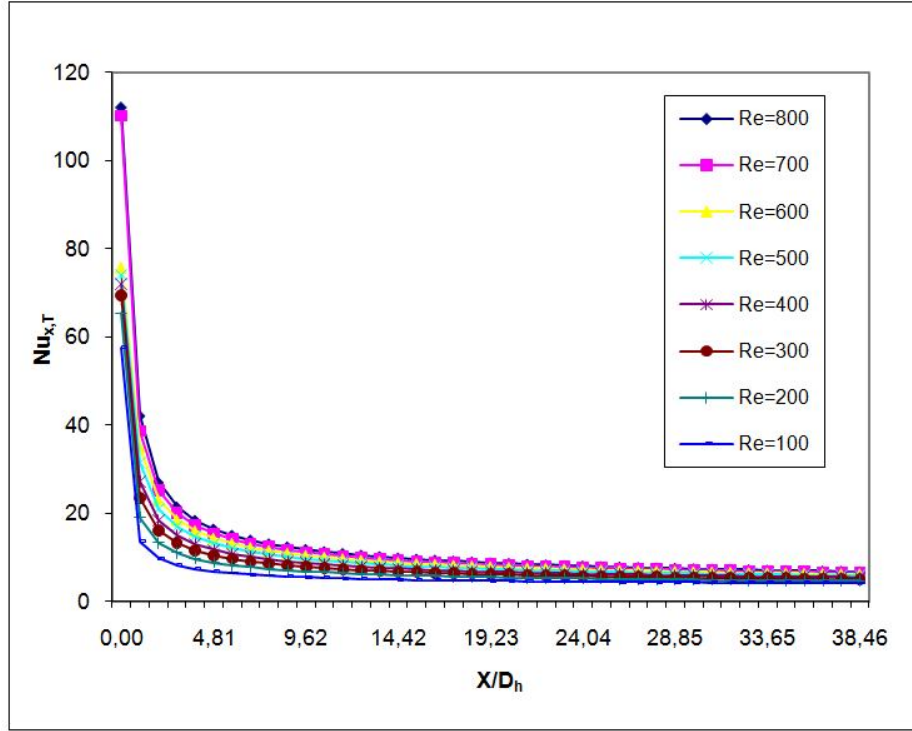
5.2.2. Sabit ısı akısı sınır şartında su akışkanı için sonuçlar

Altıgen kesitli kanalda Reynolds sayısı 800 iken altı farklı hücre sayısında çalışılarak, sayısal inceleme sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu koşulu sağlayan optimum hücre sayısı belirlenmiştir. Çizelge 5.7’de farklı hücre sayıları ile gerçekleştirilen sayısal inceleme sonucunda elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Hücre sayısının 600x36x18’den 734x44x22’ye değişmesi durumunda Nusselt sayısında %0,341 oranında değişim, Darcy sürtünme katsayısında ise %0,454 oranında bir değişim görülmüştür. Bu nedenle optimum hücre sayısı 600x36x18 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.7. Sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi

Hücre Sayısı (x,y,z)	$Nu_{m,H}$	$f_{m,H}$
267x16x8	8,744	0,001065
333x20x10	8,654	0,001071
500x30x15	8,568	0,001080
600x36x18	8,547	0,001083
667x40x20	8,538	0,001085
734x44x22	8,532	0,001086

Eş. 4.22 kullanılarak su akışkanının sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca $100 \leq Re \leq 800$ aralığı için hesaplanan değerleri grafiksel olarak Şekil 5.54’te verilmiştir.



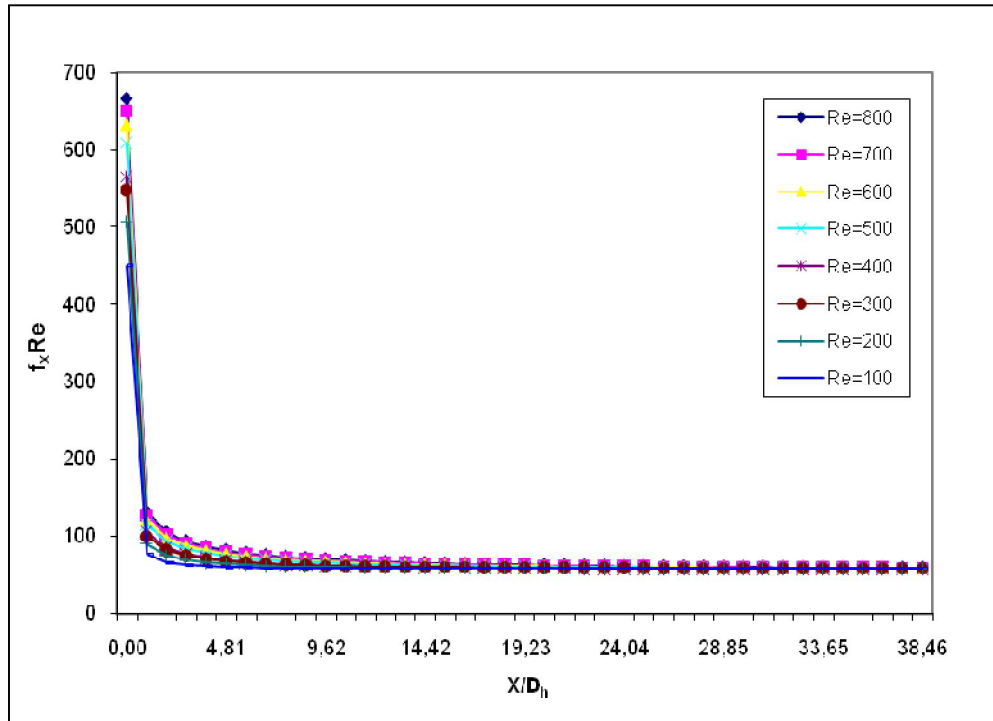
Şekil 5.53. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi

Şekil 5.54'te görüldüğü üzere kanal girişinde yerel Nusselt sayısı beklenildiği şekilde tüm Reynolds sayıları için yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında elde edilen yerel Nusselt sayılarının ise daha yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Kanal boyunca yerel Nusselt sayılarının tüm Reynolds sayıları için düşüş gösterdiği ve belirli bir mesafeden sonra düştüğü görülmüştür. Çalışılan Reynolds sayısı aralığında sabit yüzey ısı akısı koşulu için su akışkanının kanal boyunca ısı olarak tam gelişmişlik koşullarına ulaştığı sonucu çıkarılabilir. Bu doğrultuda hidrolik çapı 0,052 m olan düzgün altıgen kesitli kanal içerisinde su akışkanının Reynolds sayısının ısı olarak tam gelişmiş akış şartlarına ulaştığı durum için Nusselt sayısı değerinin 4,2 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı akışkan ve koşullar için eksenel yönde Darcy sürtünme faktörü f_x ise Eş.4.24'te belirtilen formülle hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda kanal uzunluğu boyunca elde edilen yerel Darcy sürtünme faktörü değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.55'te verilmiştir. Şekil 5.55'te görüldüğü üzere hesaplanan $f_x Re$ değerleri

beklenildiği şekilde kanal girişinde yüksek değerler almıştır. $f_x Re$ değerinin belirli bir kanal uzunluğundan sonra değişmediği ve 58,56 sabit değerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit kaldığı kanal uzunluğundan itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullar altındaki $f_x Re$ değeri 58,56 olarak bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki çalışmalarda elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen yerel Nusselt sayısı ile literatürdeki çalışmalarda [17] elde edilen sonuçlar arasındaki farkın % 8,1 olduğu görülmüştür. Aynı şekilde $f_x Re$ sayısı ile literatürdeki [17], [3], [8] sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla % 2,83, %2,66 ve %2,86 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak yapılan sayısal çalışma sonuçlarının literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilir.

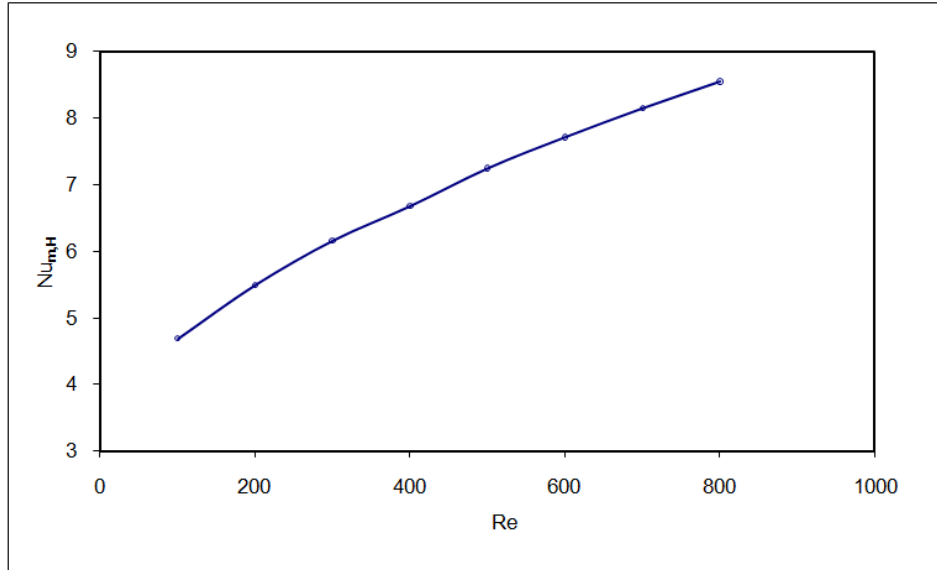


Şekil 5.54. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi

Çizelge 5.8. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması

	Nu_x	$f_x Re$
Sayısal Sonuçlar	4,2	58,56
Ref. [17]	3,86	60,20
Ref. [3]	-	60,12
Ref. [18]	4,002	60,22
Ref. [8]	4,02	60,25

Ortalama Nusselt sayısı değerleri $100 \leq Re \leq 800$ değer aralığı için Şekil 5.56'da verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak kanal içindeki ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.7 ile ifade edilmiştir.



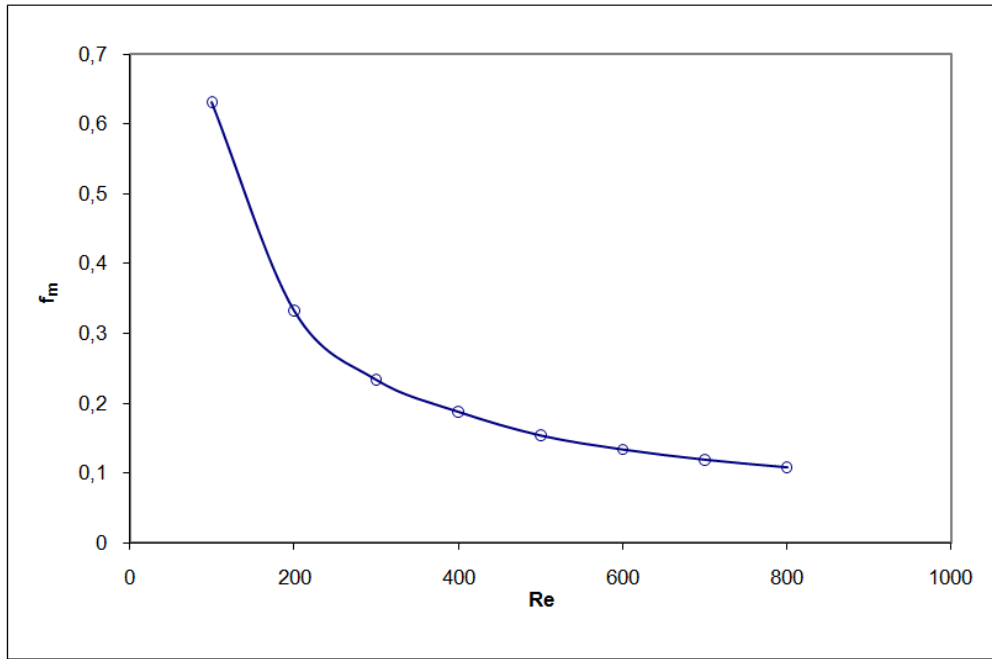
Şekil 5.55. Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

$$Nu_{m,H} = 1,19 Re^{0,291} \quad (5.7)$$

Altıgen kesitli kanalda $100 \leq Re \leq 800$ Reynolds değer aralığı için hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları Şekil 5.57'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan

Reynolds sayısına bağılı olarak Darcy sürtünme faktöründe azalma söz konusudur. Buradan Reynolds sayısı ile Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak Darcy sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.8 ile ifade edilmiştir.

$$f_{m,H}=30,07Re^{-0,846} \quad (5.8)$$

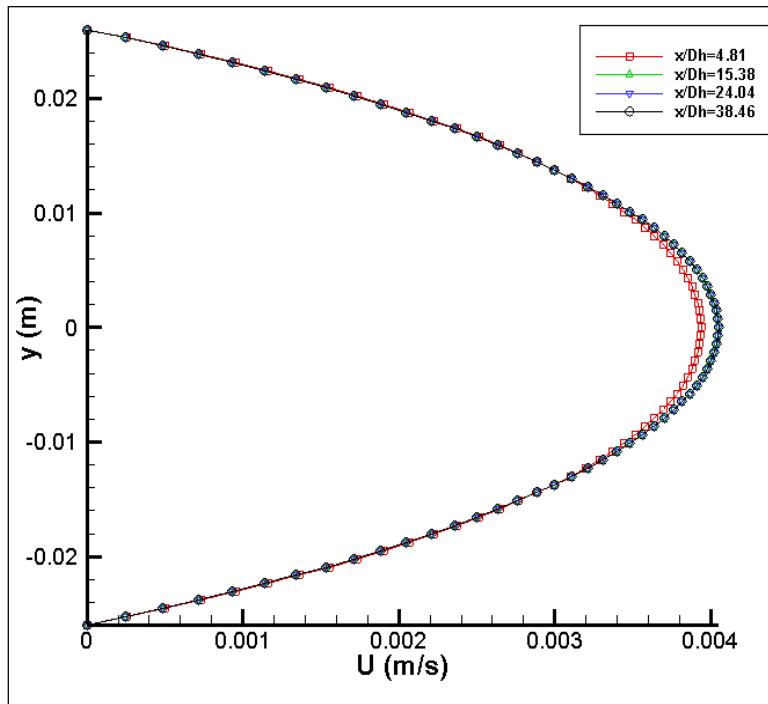


Şekil 5.56.Su akışkanı için sabit ısı akısı koşulunda ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

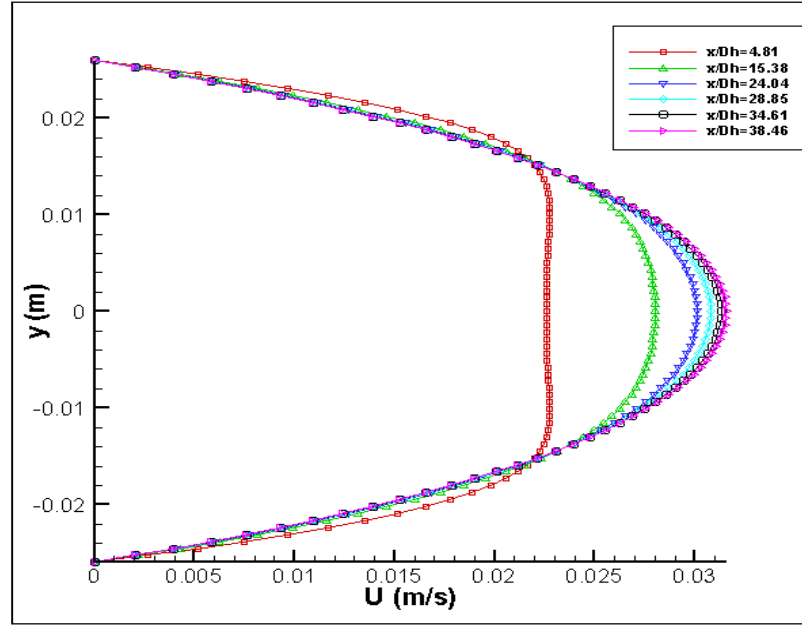
Altıgen kesitli kanalda su akışkanının sabit ısı akısı duvar koşulu için simetri düzlemi ($z=0$) üzerindeki hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. Bu kesitler $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ olarak belirlenmiştir. Belirtilen kesitlerde $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.58 ve Şekil 5.59’da sunulmuştur. $Re=100$ için kanal x -mesafesi $x/D_h=15,38$ iken kanal içindeki akış tam gelişmiş koşullara ulaşmıştır. Kanal içindeki akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşma mesafesi $Re=800$ için ise $x/D_h=34,61$ olarak belirlenmiştir. $z=0$ simetri düzleminde kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız

profilleri ise Şekil 5.60'da verilmiştir. Bu grafiklerden, farklı Reynolds sayılarında kanal içindeki hız profillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde $y=0$ simetri düzleminde de hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.61 ve Şekil 5.62'de verilmiş olup, hız profillerinin her iki simetri düzleminde de benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca $y=0$ simetri düzleminde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için $x/D_h=15,38$ kesitinde hız profilleri de incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen grafik ise Şekil 5.63'te verilmektedir.

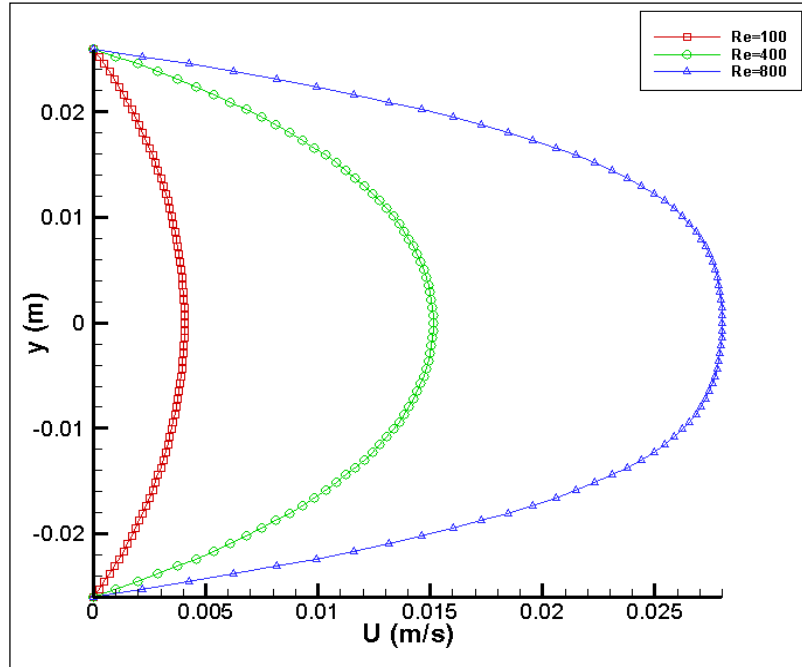
Kanal boyunca sıcaklık dağılımı sürekli olarak değişmektedir. Kanal boyunca sabit ısı akısı duvar koşulunda su akışkanı için boyutsuz sıcaklığın (θ) kanal yüksekliği ile değişimi $Re=100$ ve $Re=800$ için farklı x -mesafelerinde incelenmiş ve bu değişime ait grafikler Şekil 5.64 ve Şekil 5.65'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere $Re=100$ için $x/D_h=34,61$ 'den sonra akışın ısıl olarak gelişmiş koşullara hemen hemen ulaştığı, $Re=800$ için ise akışın ısıl olarak gelişmediği söylenebilir.



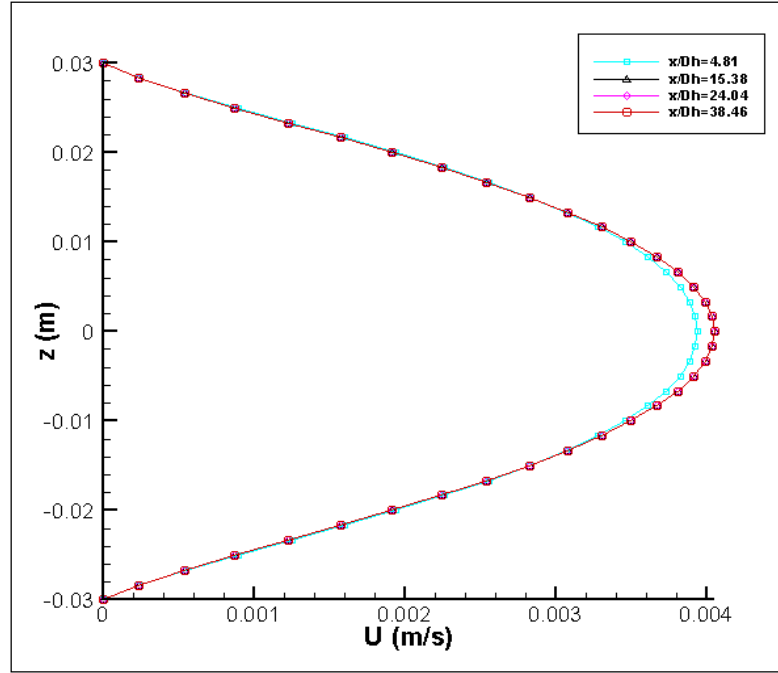
Şekil 5.57. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



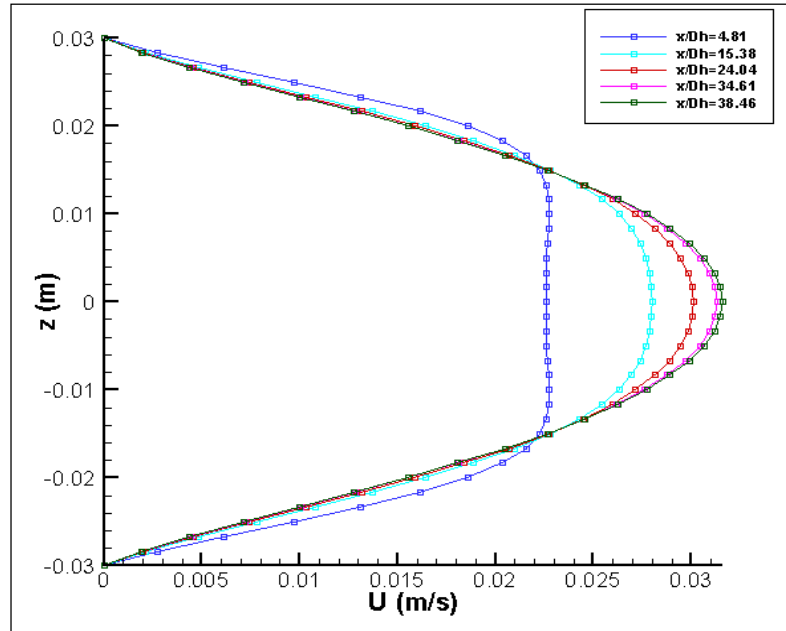
Şekil 5.58. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



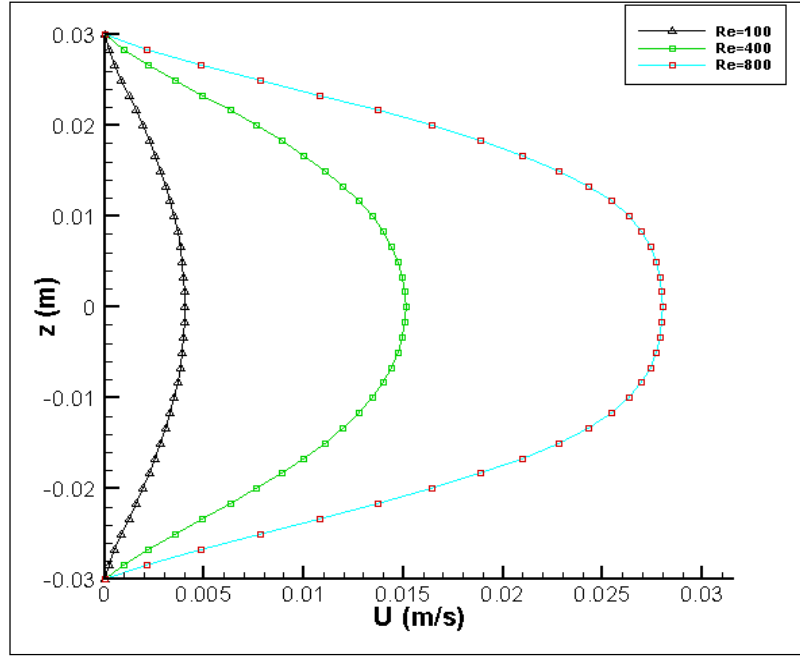
Şekil 5.59. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



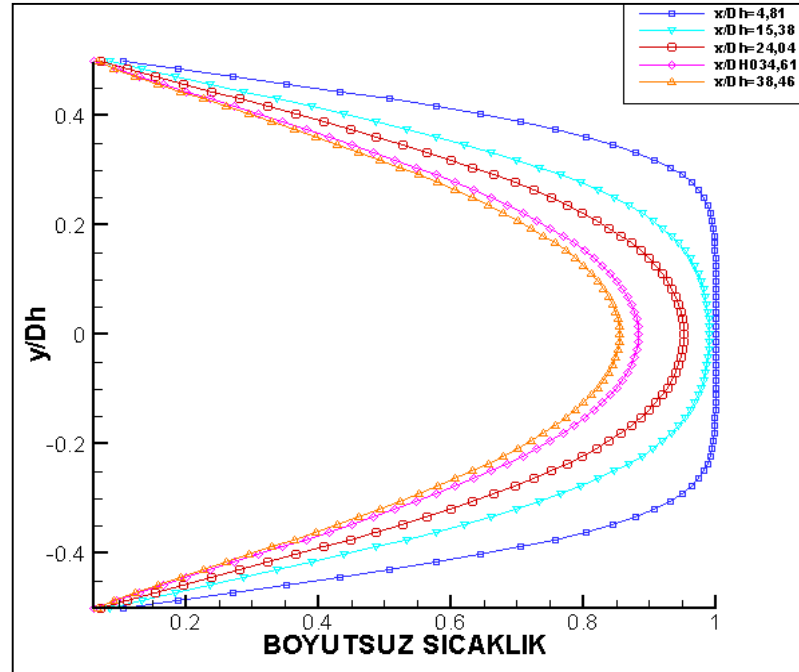
Şekil 5.60. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



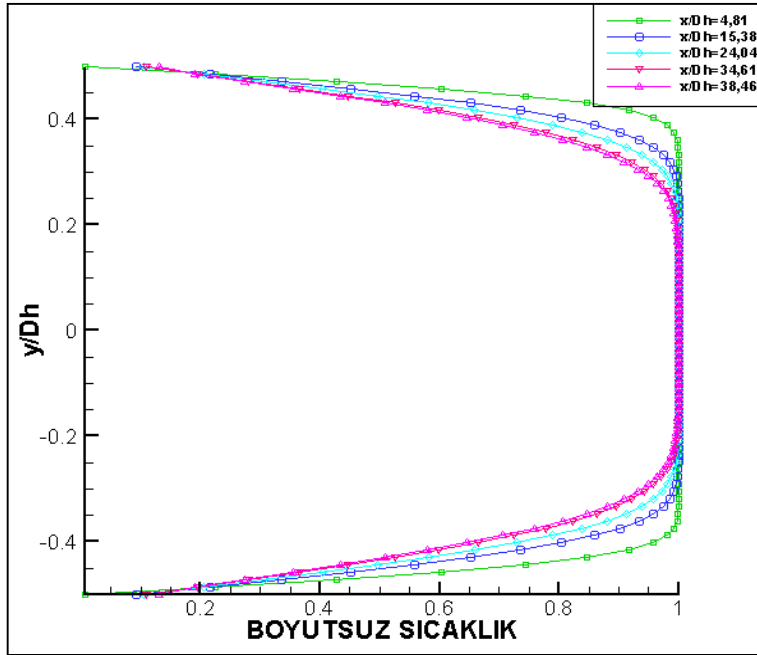
Şekil 5.61. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.62. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15.38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için su akışkanına ait hız profilleri



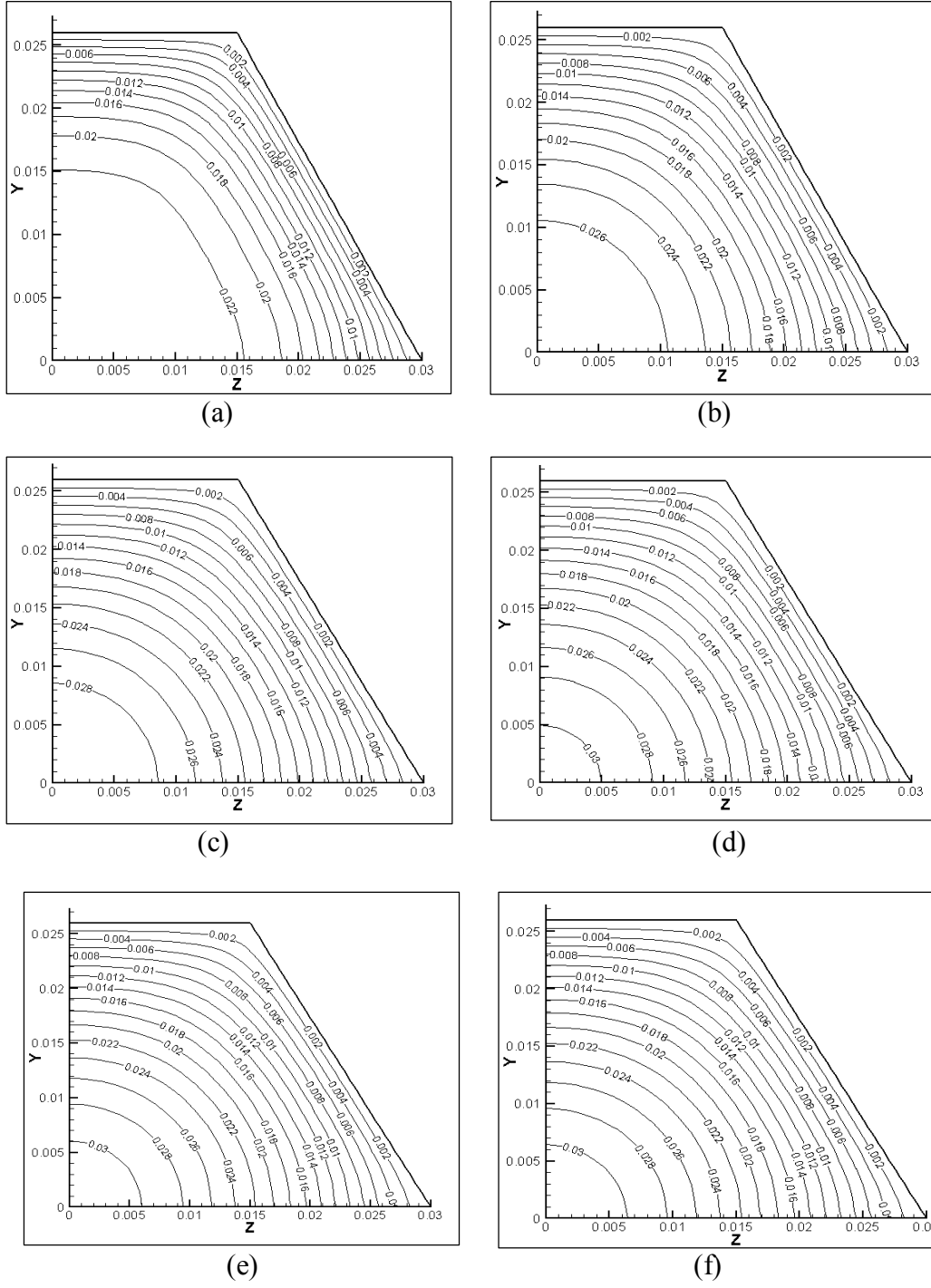
Şekil 5.63. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için su akışkanının farklı x- mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi



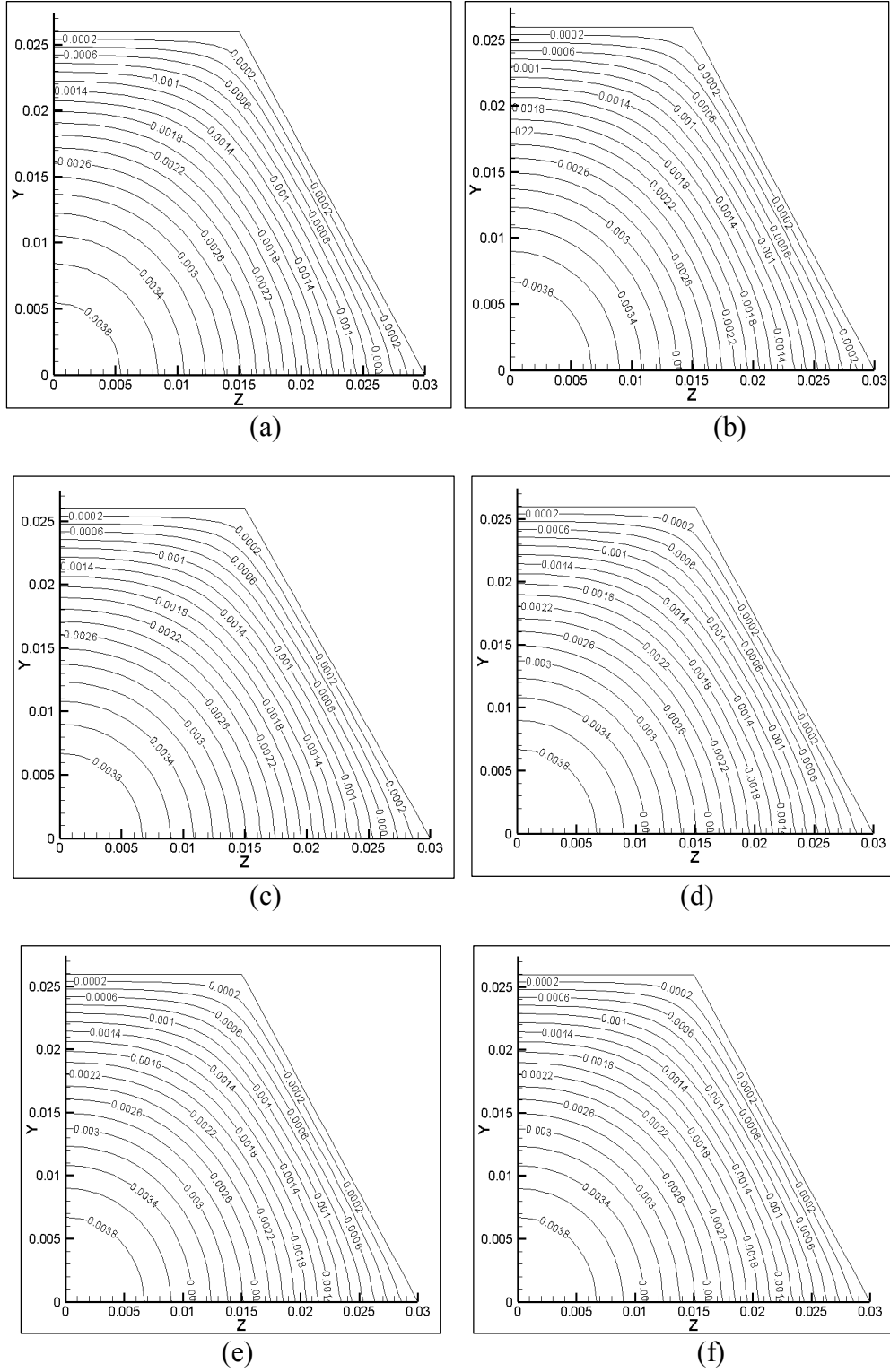
Şekil 5.64. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için su akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi

Kanal boyunca $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ boyutsuz mesafelerinde y - z kesitlerindeki hız-kontur dağılımı grafikleri $Re=800$ ve $Re=100$ için Şekil 5.66 ve Şekil 5.67’de verilmiştir. Şekil 5.66’da görüldüğü üzere $Re=800$ için hız dağılımı su akışkanı için incelendiğinde akışın x -mesafelerinde hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara $x/D_h=38,46$ ’dan itibaren ulaştığı görülmüştür. Şekil 5.67’de ise $Re=100$ için hız dağılımı incelendiğinde $x/D_h=15,38$ ’den itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür.

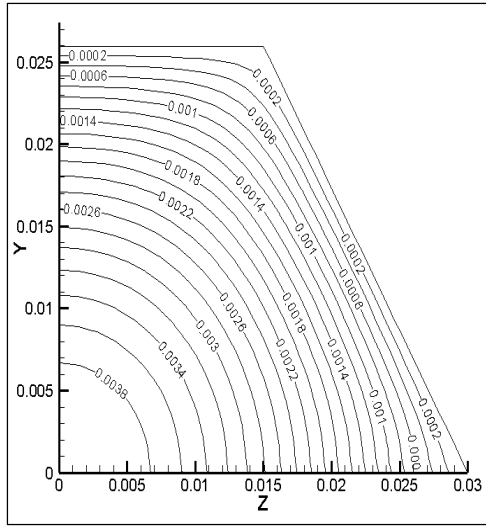
Çalışmada ayrıca Reynolds sayısının hız dağılımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. $x/D_h=4,81$ iken y - z kesitindeki hız dağılımları üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Şekil 5.68’de $Re=100, 400$ ve 800 için hız dağılımlarının incelenmesi sonucu artan hızla birlikte kanal duvar kenarlarında görülen hız sınır tabakası kalınlığında azalma gözlenmiştir. Reynolds sayısı 100 iken kanal merkezinde görülen hız değeri çok düşükken, bu değer Reynolds sayısı arttıkça artış göstermektedir.



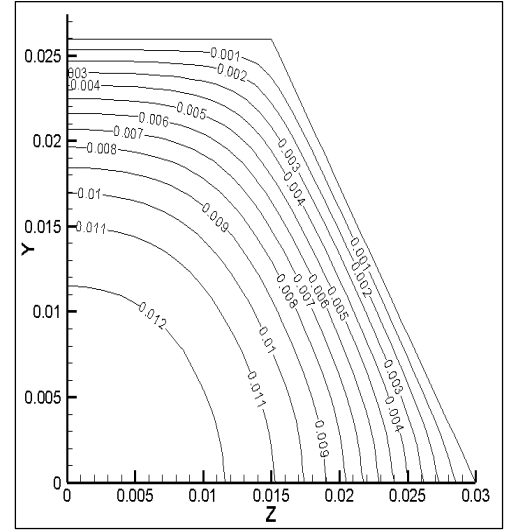
Şekil 5.65. Sabit ısı akısı duvar koşullarında su akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



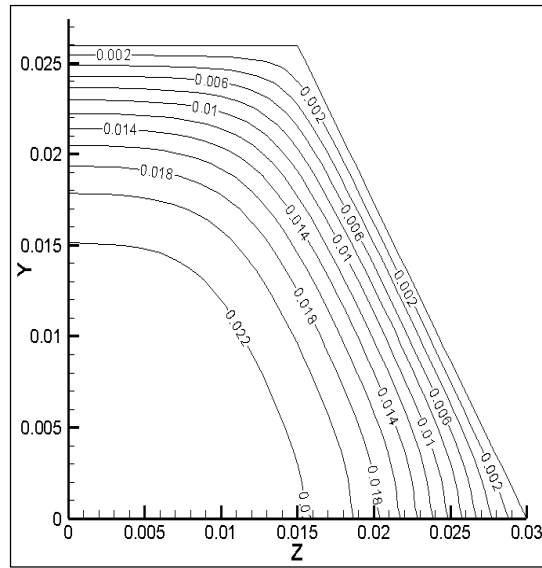
Şekil 5.66. Sabit ısı akısı duvar koşullarında su akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



(a)



(b)



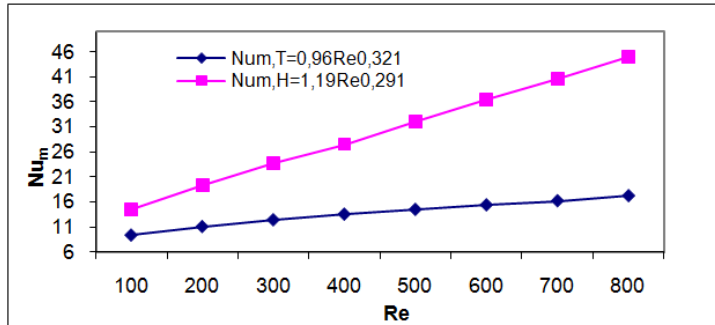
(c)

Şekil 5.67. Sabit ısı akısı duvar koşullarında su akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları
(a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

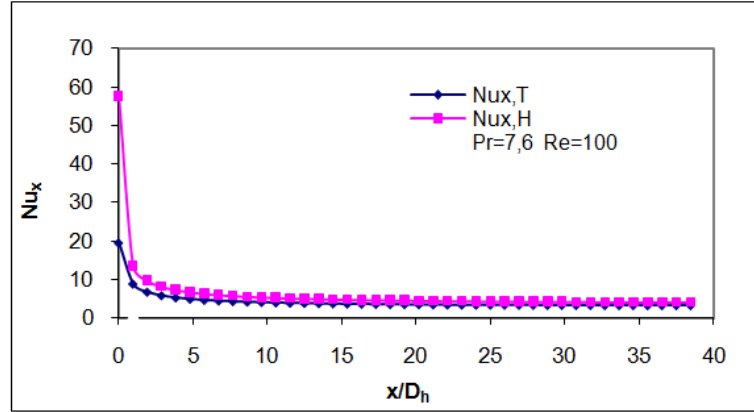
5.2.3. Altıgen kesitli kanalda su akışkanı için sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu sonuçlarının kıyaslanması

Altıgen kesitli kanalda su akışkanı Bölüm 5.2.1 ve Bölüm 5.2.2’de sırasıyla sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulları için $100 \leq Re \leq 800$ aralığında sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen yerel ve ortalama Nusselt sayılarının her iki koşul için farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması Şekil 5.69 ve Şekil 5.70’de verilmiştir. Ortalama Nusselt sayı değeri sabit ısı akısı sınır koşulunda abit sıcaklık sınır koşuluna göre daha yüksek çıkmıştır. Isıl olarak tam gelişmiş koşullarda Nusselt sayısının sabit sıcaklık sınır koşulu için 3,32; sabit ısı akısı sınır koşulu için ise 4,2 olduğu belirlenmiştir.

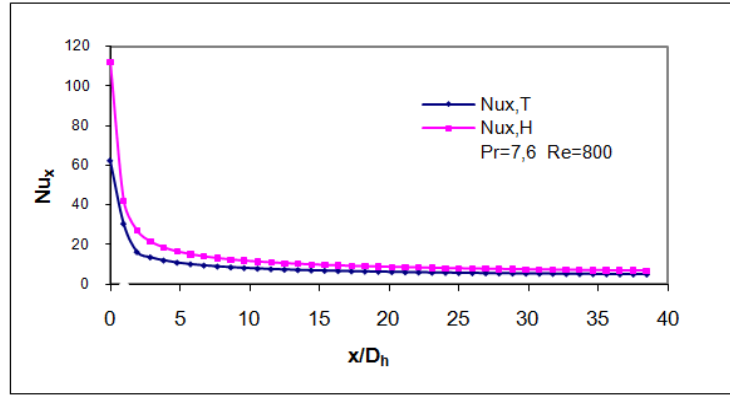
Her iki koşula ait sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında sabit duvar sıcaklığı koşulları altında su akışkanının hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı ve aynı şekilde sabit ısı akısı koşulu altında da aynı kanal mesafesinde hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. İnceleme sonucunda elde edilen ortalama ve yerel Darcy sürtünme katsayısının her iki koşul için farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması Şekil 5.71 ve Şekil 5.72’de verilmiştir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullarda Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık sınır koşulu için 58,76; sabit ısı akısı sınır koşulu için ise 58,56 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.68. Su akışkanının ortalama Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayıları için karşılaştırması

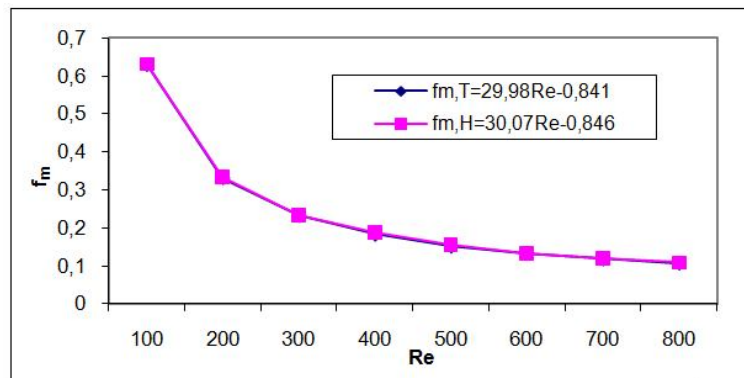


(a)

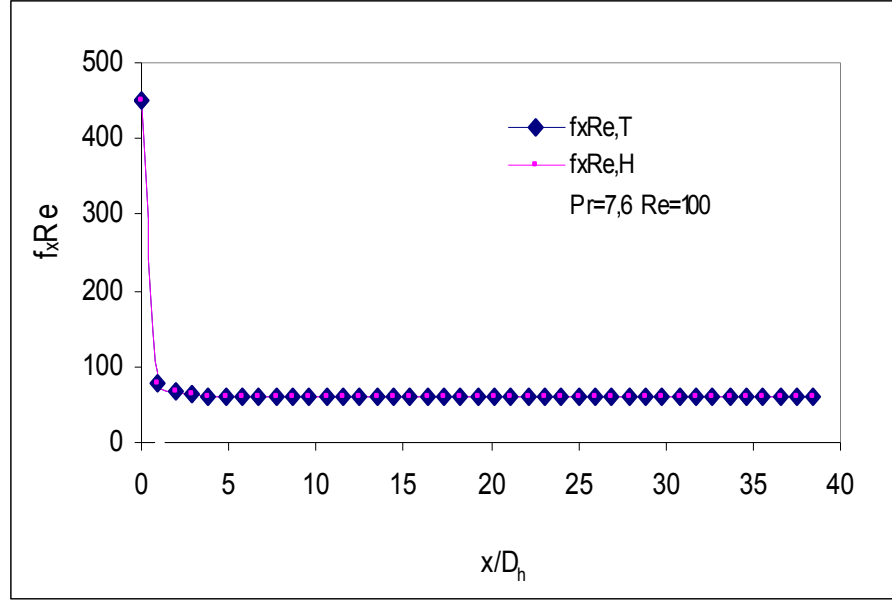


(b)

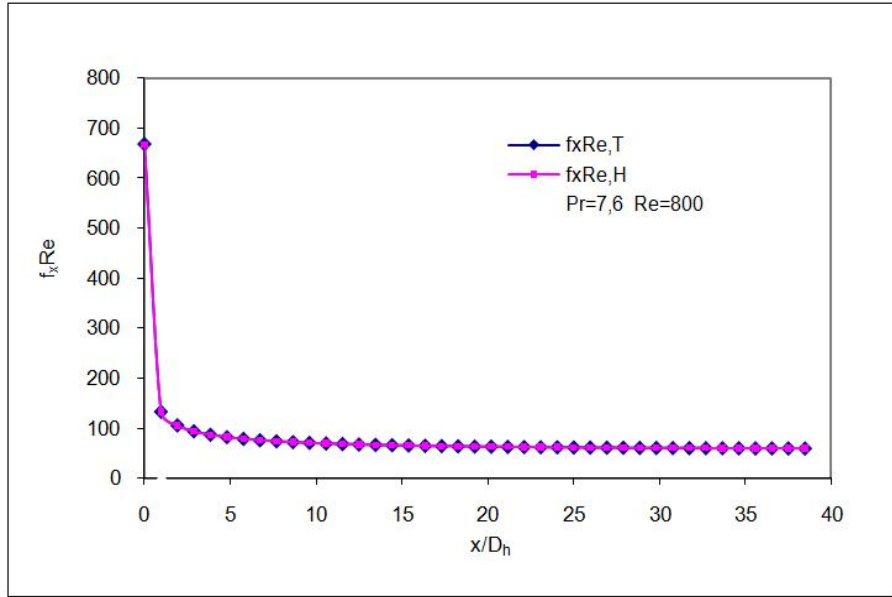
Şekil 5.69. Su akışkanı için yerel Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması



Şekil 5.70. Su akışkanının ortalama Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayıları için karşılaştırması



(a)



(b)

Şekil 5.71. Su akışkanı için yerel Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması

5.3. Etilen Glikol İçin (Pr=236) Sonuçlar

Çalışmada kullanılan etilen glikol akışkanı altıgen kesitli kanalda sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu için Reynolds sayısının 100 ile 800 değerleri için incelenmiştir. İnceleme neticesinde elde edilen sonuçlar alt bölümlerde verilmiştir.

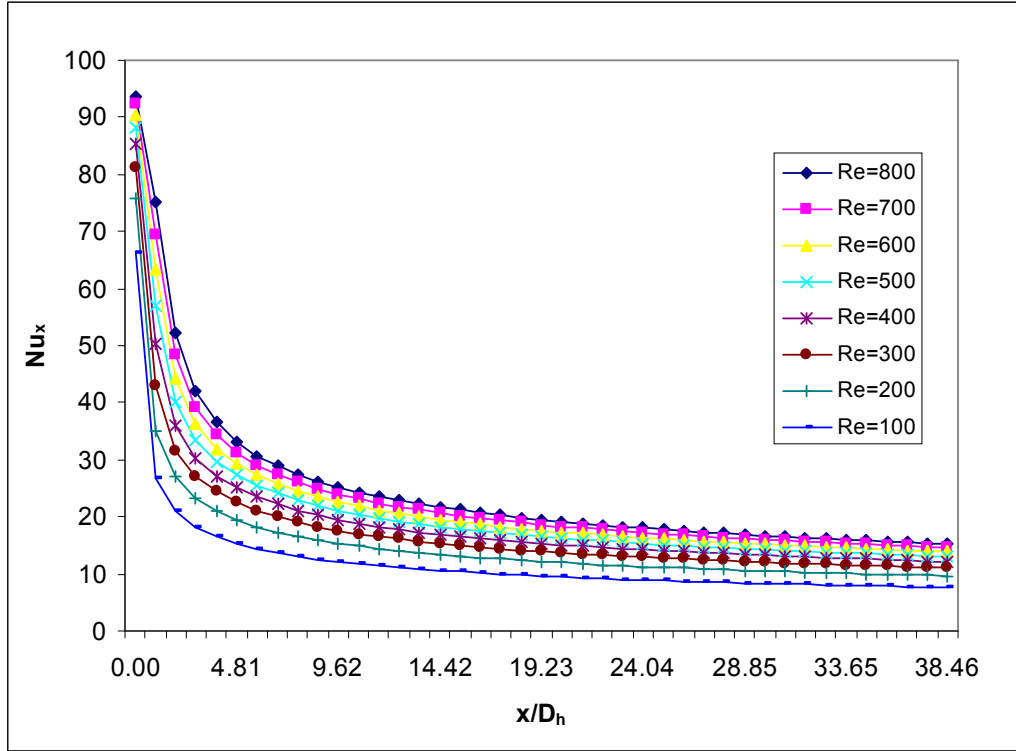
5.3.1. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında etilen glikol için sonuçlar

Altıgen kesitli kanalda Reynolds sayısı 800 iken sekiz farklı hücre sayısında çalışılarak, sayısal inceleme sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu koşulu sağlayan optimum hücre sayısı belirlenmiştir. Çizelge 5.9’da farklı hücre sayıları ile gerçekleştirilen sayısal inceleme sonucunda elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Hücre sayısının 834x50x25’den 900x54x27’a değişmesi durumunda Nusselt sayısında %0,78 oranında değişim, Darcy sürtünme katsayısında ise %0,8 oranında bir değişim görülmüştür. Bu nedenle optimum hücre sayısı 834x50x25 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.9. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi

Hücre Sayısı (x,y,z)	Num,T	$f_{m,T}$
267x16x8	36,45	0,126992
333x20x10	33,03	0,125094
500x30x15	28,69	0,126094
600x36x18	27,58	0,126452
667x40x20	27,09	0,126639
734x44x22	26,72	0,126797
834x50x25	26,31	0,126992
900x54x27	26,11	0,127101

Eş. 4.22 kullanılarak etilen glikol akışkanının sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca $100 \leq Re \leq 800$ aralığı için hesaplanan değerleri grafiksel olarak Şekil 5.73’de verilmiştir.



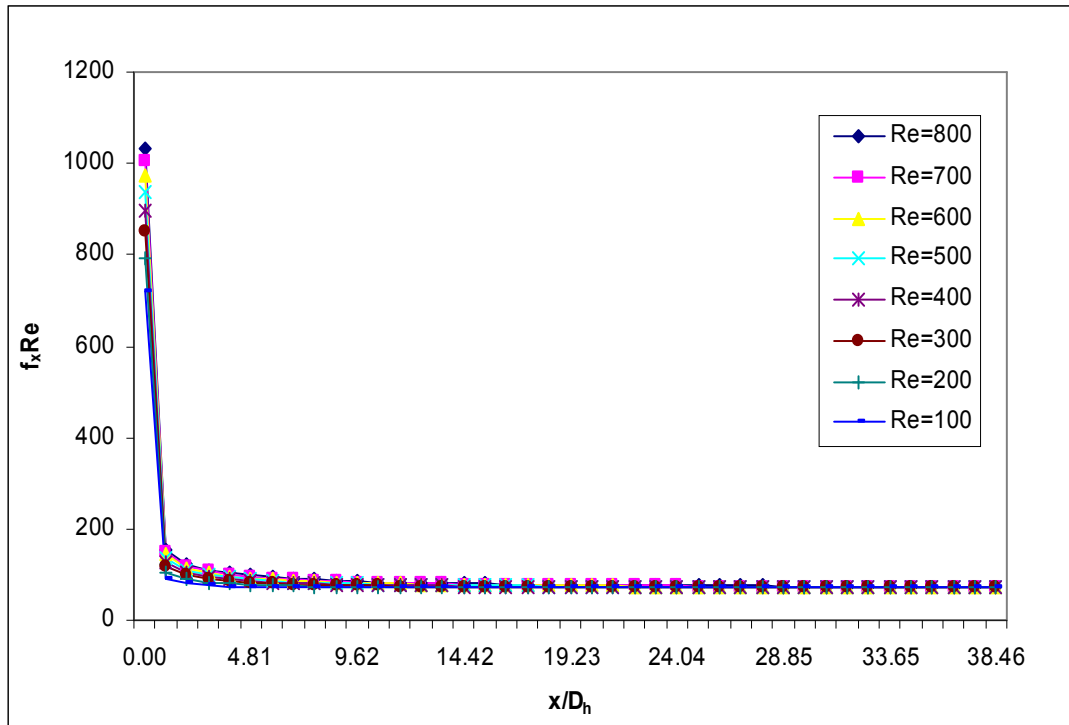
Şekil 5.72. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi

Şekil 5.73’de görüldüğü üzere kanal girişinde yerel Nusselt sayısı beklenildiği şekilde tüm Reynolds sayıları için yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında elde edilen yerel Nusselt sayılarının ise daha yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Kanal boyunca yerel Nusselt sayılarının tüm Reynolds sayıları için düşüş gösterdiği ve belirli bir mesafeden sonra düştüğü görülmüştür. Kanal boyunca Nusselt sayısının yüksek Reynolds sayılarında sabit bir değere ulaşmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda hidrolik çapı 0,052 m olan düzgün altıgen kesitli kanal içerisinde etilen glikolün tam gelişmiş akış koşullarına ulaşmadığı belirlenmiştir.

Aynı akışkan ve koşullar için eksenel yönde yerel Darcy sürtünme faktörü f_x ise Eş. 4.24’te belirtilen formülle hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda kanal uzunluğu boyunca elde edilen yerel Darcy sürtünme faktörü değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.74’te verilmiştir. Şekil 5.74’te görüldüğü üzere hesaplanan $f_x Re$ değerleri beklenildiği şekilde kanal girişinde yüksek değerler almıştır. $f_x Re$ değerinin belirli bir

kanal uzunluğundan sonra değişmediği ve 72,8 sabit değerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit kaldığı kanal uzunluğundan itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullar altındaki $f_x Re$ değeri 72,8 olarak bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki çalışmalarda elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.10'da verilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen $f_x Re$ sayısı ile literatürdeki [17], [3], [8] sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla %17,3, %17,42 ve %17,25 olduğu görülmüştür.

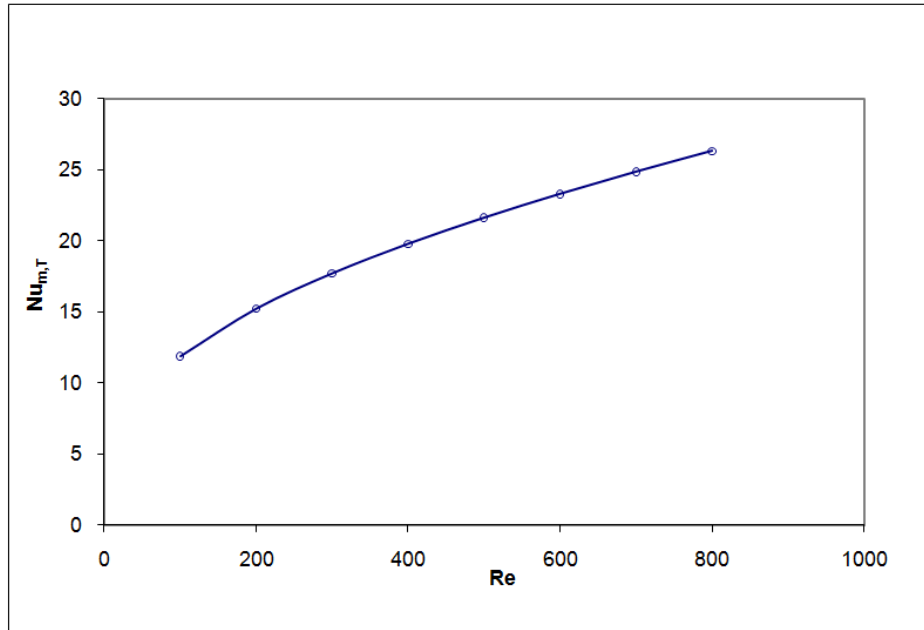


Şekil 5.73. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi

Çizelge 5.10.Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda elde edilen sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması

	$f_x Re$
Sayısal Sonuçlar	72,8
Ref. [17]	60,20
Ref. [3]	60,12
Ref. [18]	60,22
Ref. [8]	60,24

Ortalama Nusselt sayısı değerleri $100 \leq Re \leq 800$ değer aralığı için Şekil 5.75'te verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak kanal içindeki ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.9 ile ifade edilmiştir.



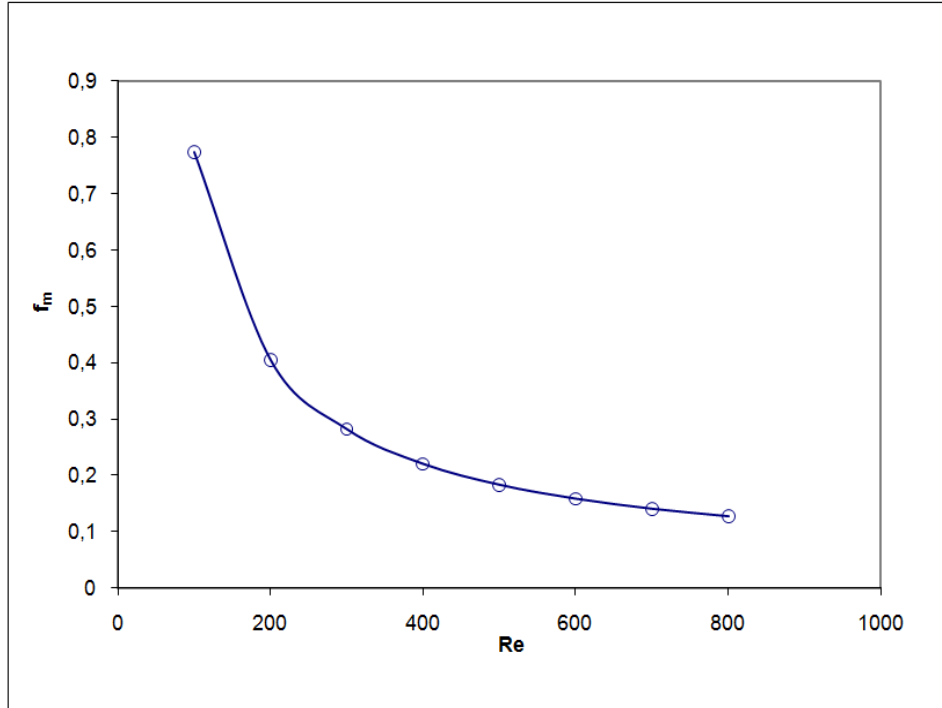
Şekil 5.74. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

$$Nu_{m,T} = 2,03 Re^{0,381}$$

(5.9)

Altıgen kesitli kanalda $100 \leq Re \leq 800$ Reynolds değerleri için hesaplanan ortalama Darcy sürtünme katsayıları Şekil 5.76'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan Reynolds sayısına bağlı olarak Darcy sürtünme faktöründe azalma söz konusudur. Buradan Reynolds sayısı ile Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak Darcy sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.10 ile ifade edilmiştir.

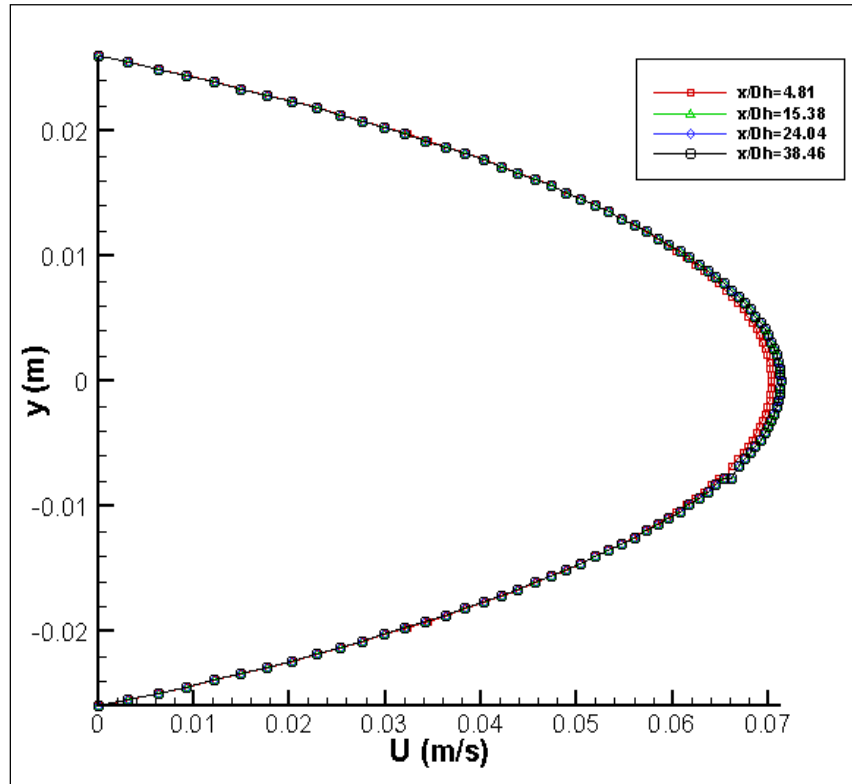
$$f_{m,T} = 41,049 Re^{-0.869} \quad (5.10)$$



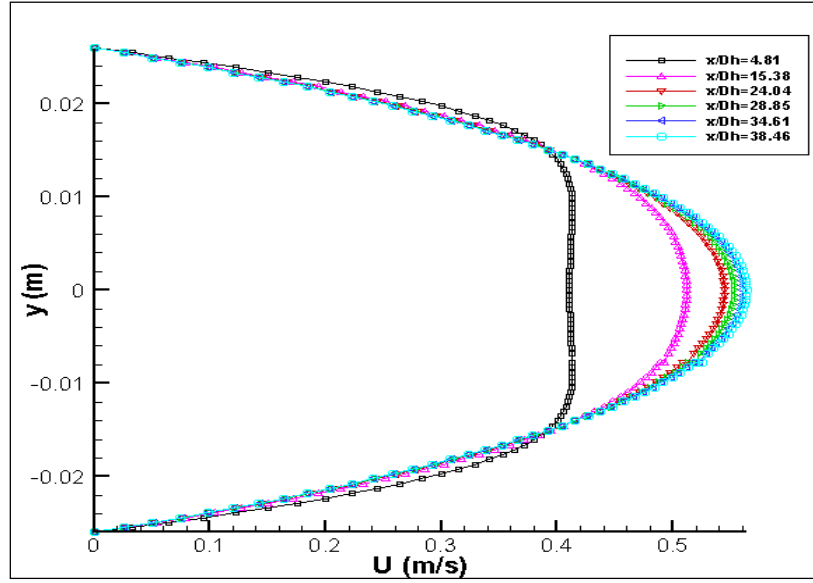
Şekil 5.75. Etilen glikol için sabit duvar sıcaklığı koşulunda Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Altıgen kesitli kanalda etilen glikol akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulu için simetri düzlemi ($z=0$) üzerindeki hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. Bu kesitler $x/D_h = 4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ olarak belirlenmiştir. Belirtilen kesitlerde $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.77 ve Şekil 5.78'de sunulmuştur. $Re=100$ için kanal x -mesafesi $x/D_h=15,38$ iken kanal içindeki akış tam gelişmiş koşullara

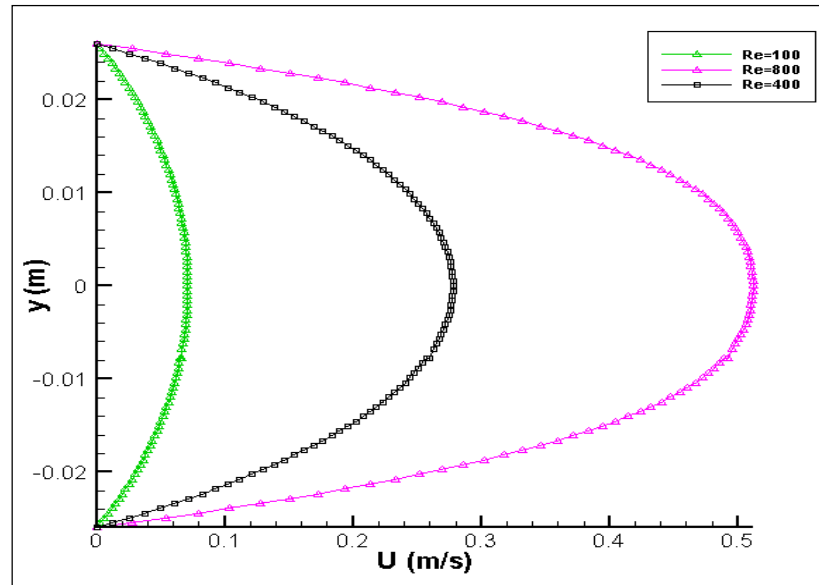
ulaşmıştır. Kanal içindeki akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşma mesafesi $Re=800$ için ise kanal çıkışı olarak belirlenmiştir. $z=0$ simetri düzleminde kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde oluşturulan farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri ise Şekil 5.79'da verilmiştir. Bu grafiklerden, farklı Reynolds sayılarında kanal içindeki hız profillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri $y=0$ simetri düzleminde de çizdirilerek her iki simetri düzlemindeki hız profillerinin aynı olduğu görülmüştür. Bu grafikler Şekil 5.80 ve Şekil 5.81'de verilmiştir. $y=0$ simetri düzleminde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde oluşturulan hız profilleri ise Şekil 5.82'de verilmiştir.



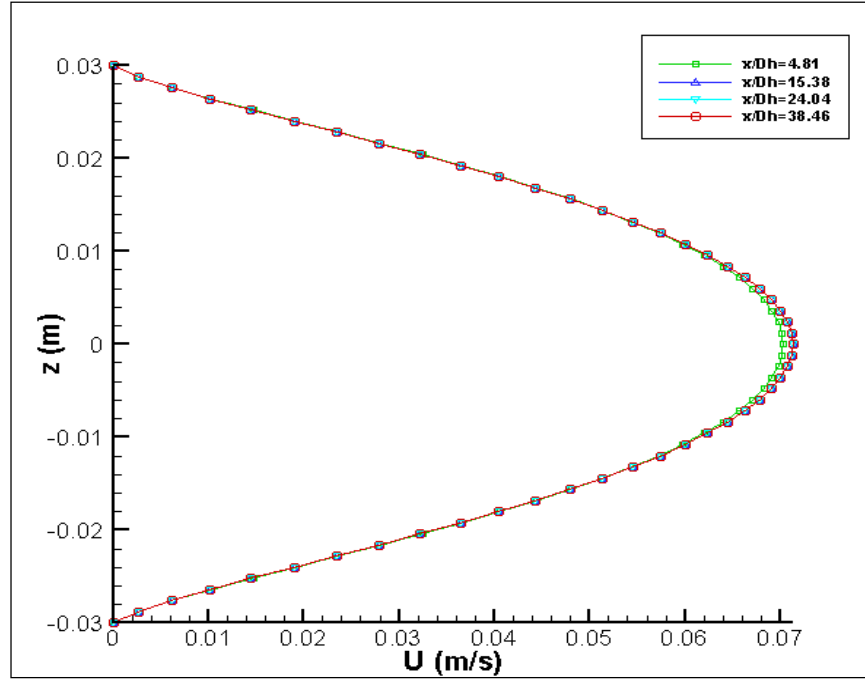
Şekil 5.76. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



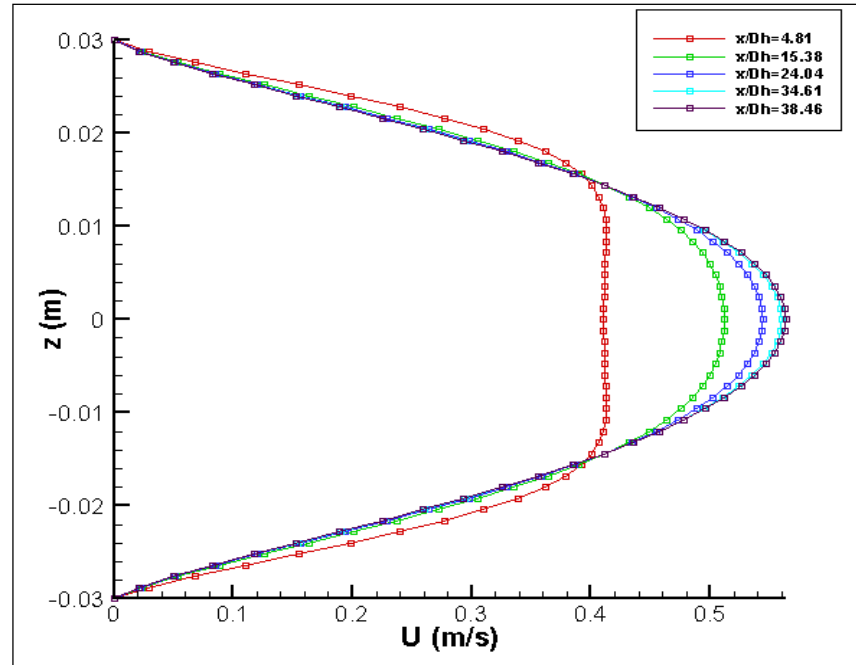
Şekil 5.77. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



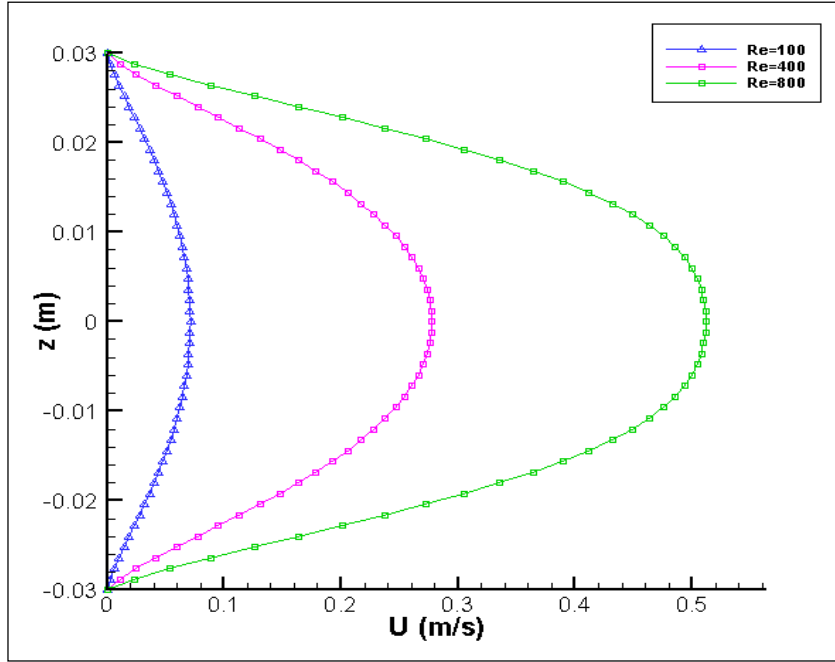
Şekil 5.78. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.79. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



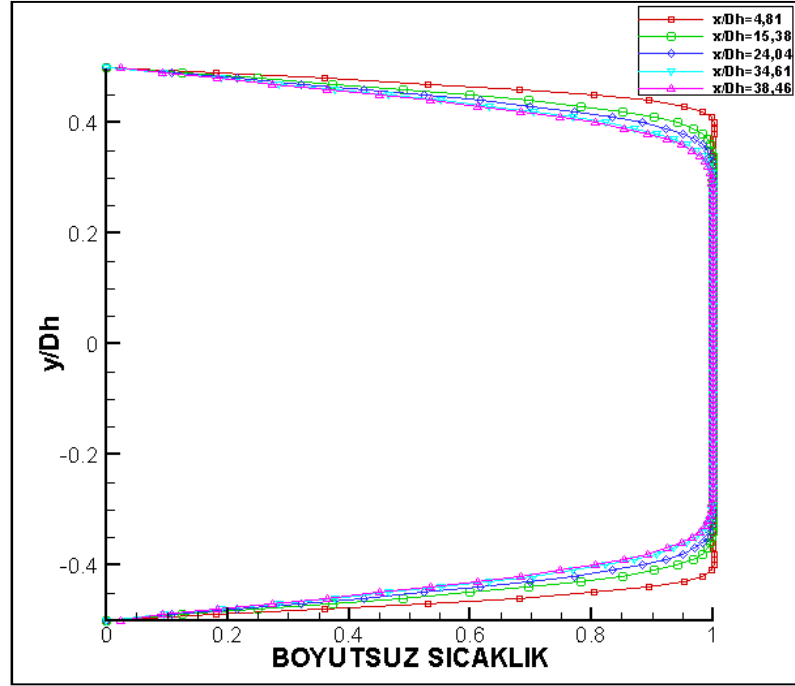
Şekil 5.80. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit sıcaklık duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



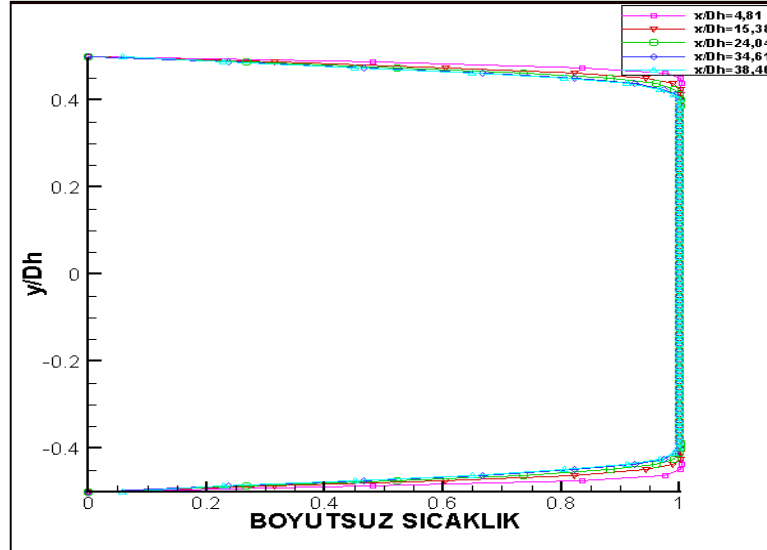
Şekil 5.81. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x-mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit sıcaklık koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri

Kanal boyunca sıcaklık dağılımı sürekli olarak değişmektedir. Kanal boyunca sabit sıcaklık duvar koşulunda su akışkanı için boyutsuz sıcaklığın (θ) kanal yüksekliği ile değişimi $Re=100$ ve $Re=800$ için farklı x-mesafelerinde incelenmiş ve bu değişime ait grafikler Şekil 5.83 ve Şekil 5.84'te verilmiştir. Kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklığın değişimi simetri düzleminde oluşturulan yüzeyde ($z=0$) incelenmiştir.

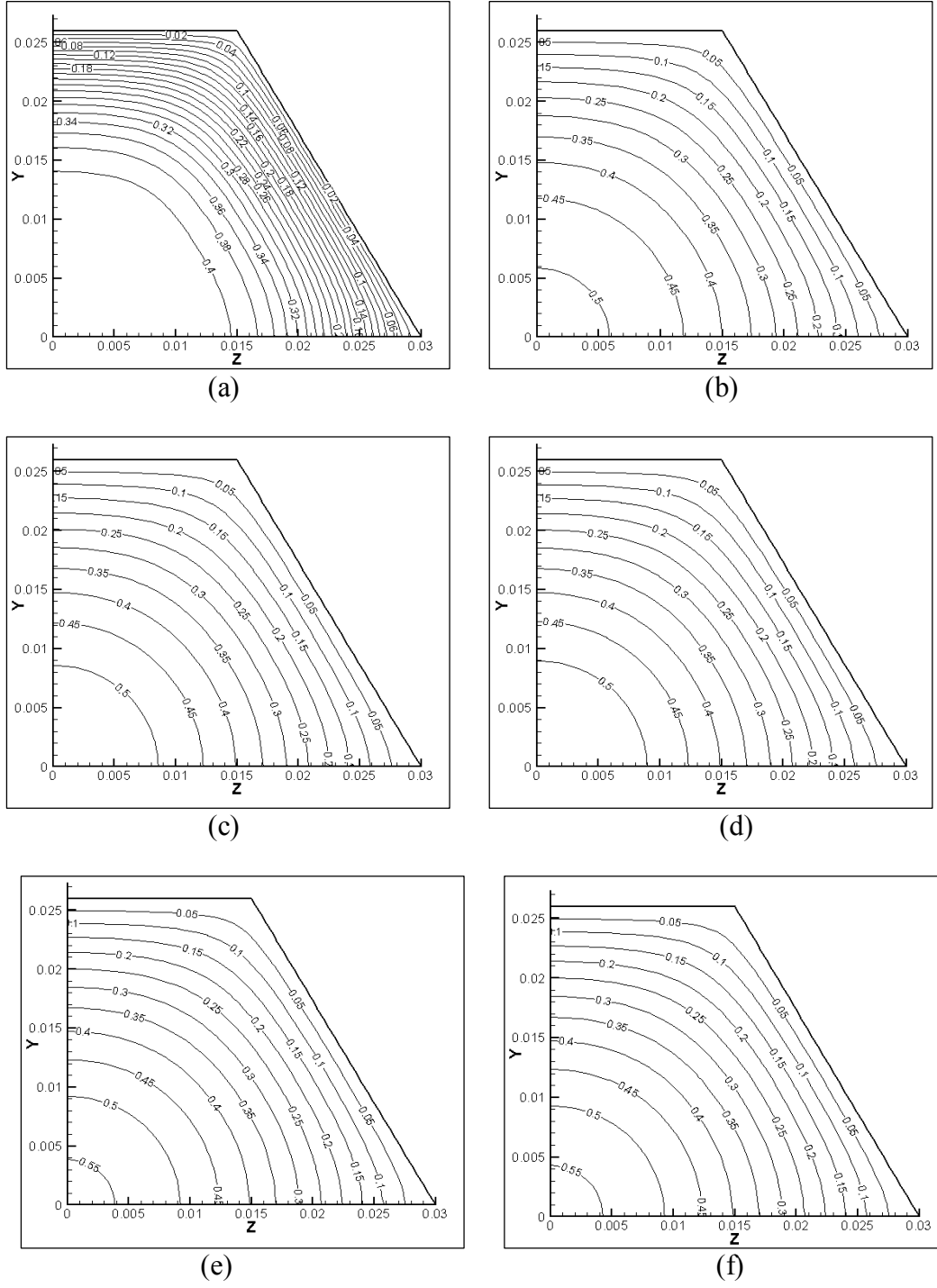
Kanal boyunca $x/D_h=4,81$, $15,38$, $24,04$, $28,85$, $34,61$ ve $38,46$ boyutsuz mesafelerinde y-z kesitlerindeki hız- kontur dağılımı grafikleri $Re=800$ ve $Re=100$ için Şekil 5.85 ve Şekil 5.86'da verilmiştir. Şekil 5.85'te görüldüğü üzere $Re=800$ için hız dağılımı etilen glikol akışkanı için incelendiğinde akışın x-mesafelerinde hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara kanal çıkışından itibaren ulaştığı görülmüştür. Şekil 5.86'da ise $Re=100$ için hız dağılımı incelendiğinde $x/D_h=15,38$ 'den itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür.



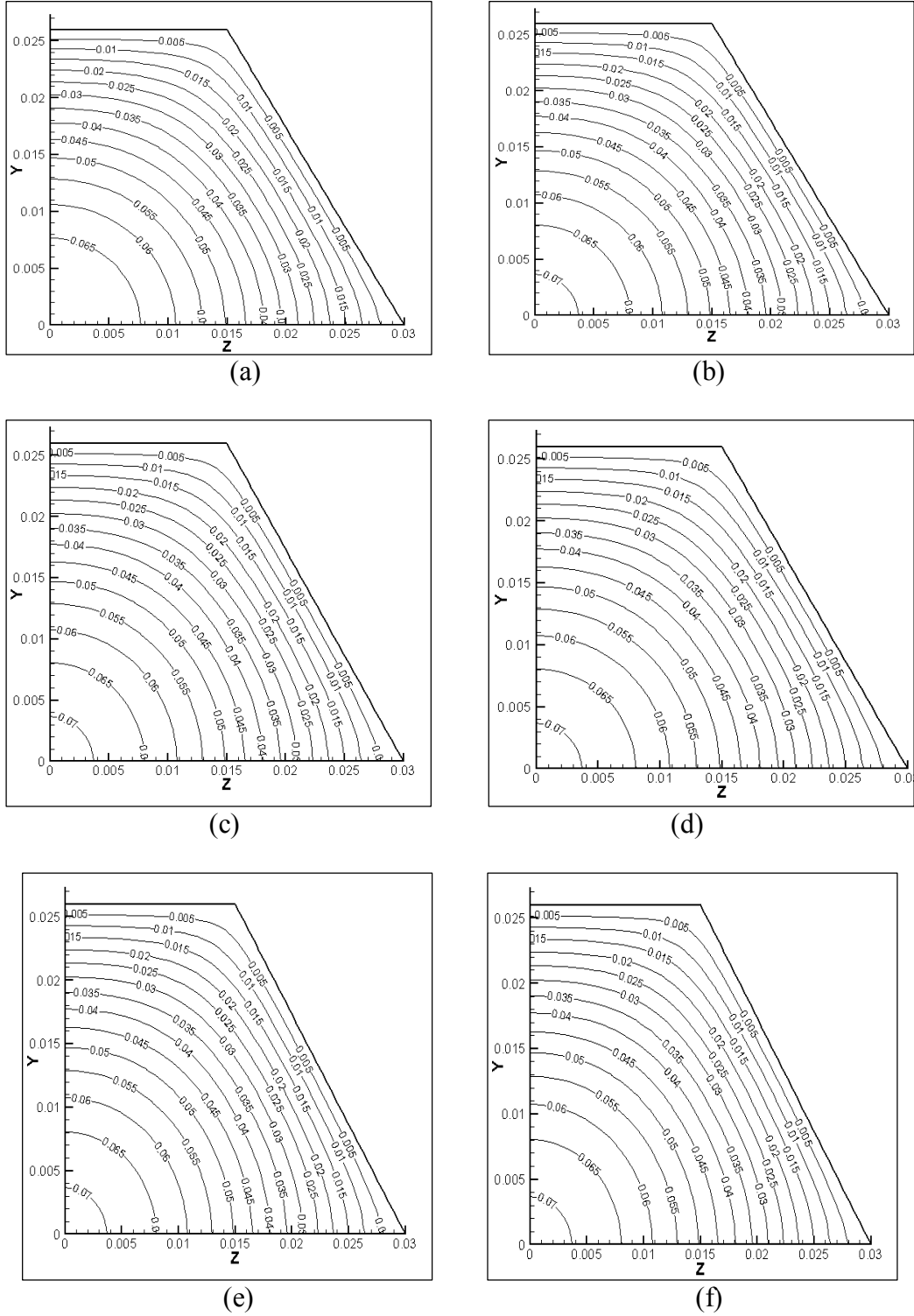
Şekil 5.82. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için etilen glikol akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi



Şekil 5.83. Sabit sıcaklık duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için etilen glikol akışkanının farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi

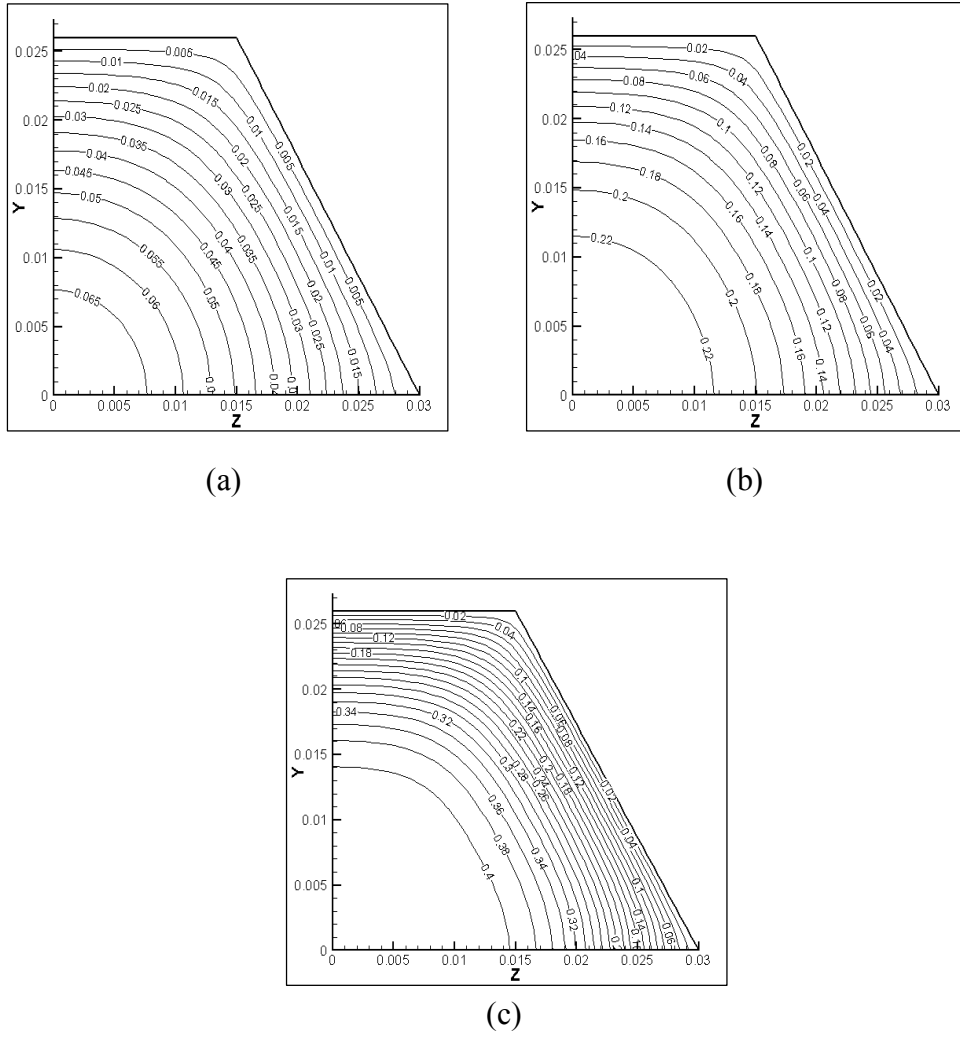


Şekil 5.84. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



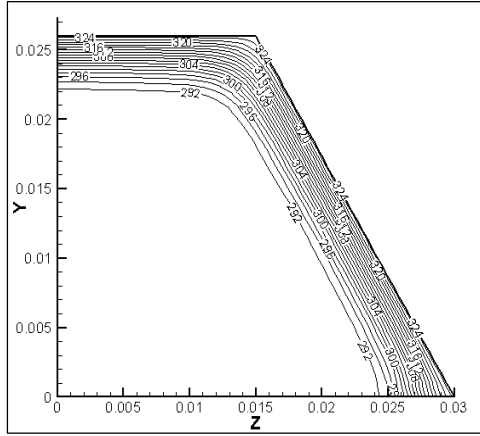
Şekil 5.85. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$

Çalışmada ayrıca Reynolds sayısının hız dağılımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. $x/D_h=4,81$ iken y-z kesitindeki hız dağılımları üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Şekil 5.87’de $Re=100$, 400 ve 800 için hız dağılımlarının incelenmesi sonucu artan hızla birlikte kanal duvar kenarlarında görülen hız sınır tabakası kalınlığında azalma gözlenmiştir.

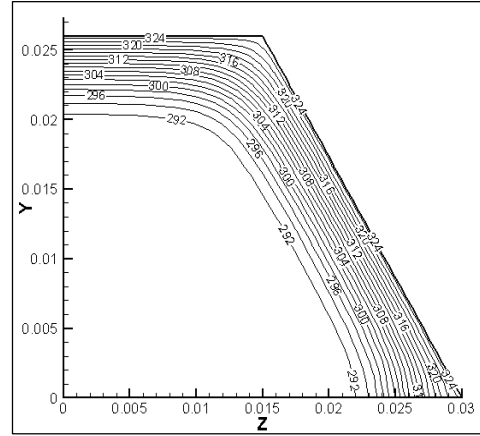


Şekil-5.86.Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ ’de y-z kesitindeki hız dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

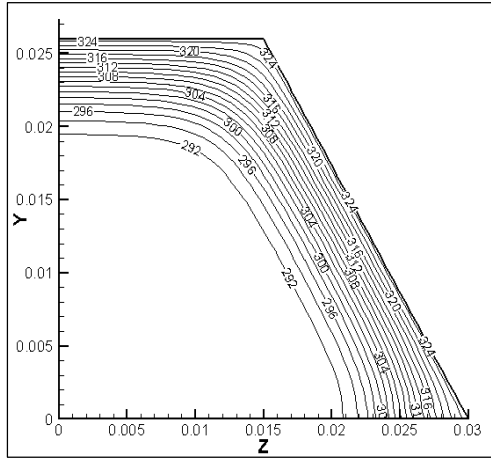
Kanal boyunca $x/D_h=4,81$, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61 ve 38,46 boyutsuz mesafelerinde y-z kesitlerindeki sıcaklık dağılımı grafikleri $Re=100$ için Şekil 5.88’de verilmiştir.



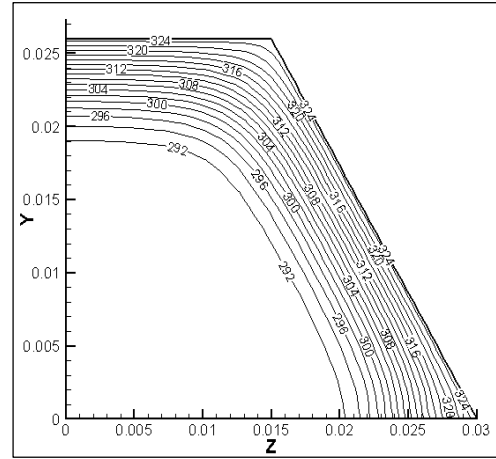
(a)



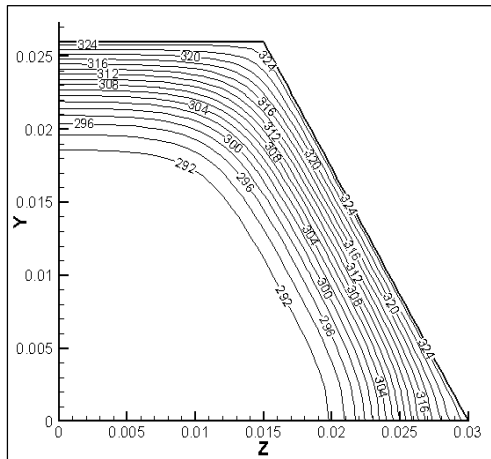
(b)



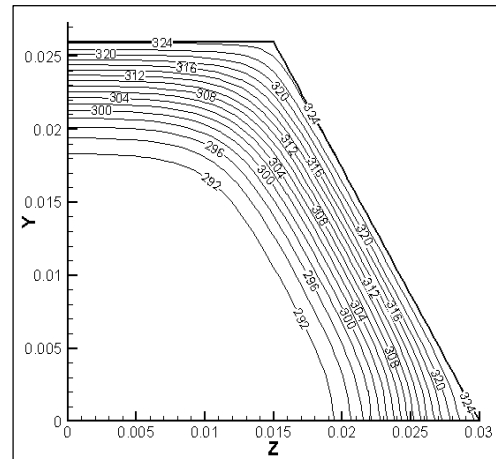
(c)



(d)



(e)

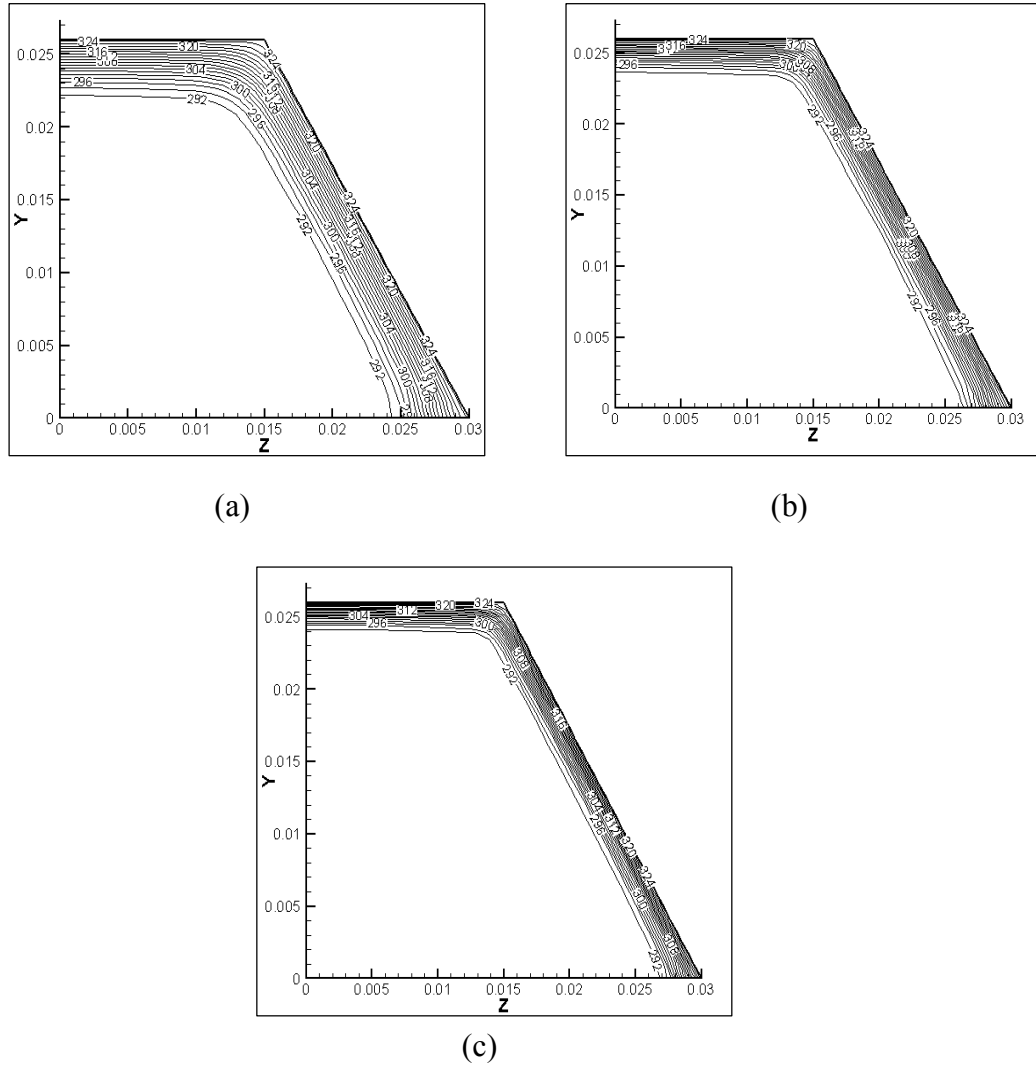


(f)

Şekil 5.87. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının $Re=100$ için farklı y - z kesitlerinde kanal boyunca sıcaklık dağılımları

(a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$,
(e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$

Etilen glikol akışkanının sabit sıcaklık duvar sınır koşulu için kanal boyunca sıcaklık dağılımları y-z kesitinde farklı Reynolds sayıları için incelendiğinde $x/D_h=4,81$ boyutsuz mesafesinde elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 5.89’da verilmiştir. Elde edilen grafiklerden Reynolds sayısı azaldıkça kanal içerisindeki akış sıcaklığının özellikle kanal merkezi hariç daha yüksek olduğu ve sıcaklık sınır tabakası kalınlığının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.88. Sabit sıcaklık duvar koşulunda etilen glikol akışkanının farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ ’de y-z kesitindeki sıcaklık dağılımları (a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

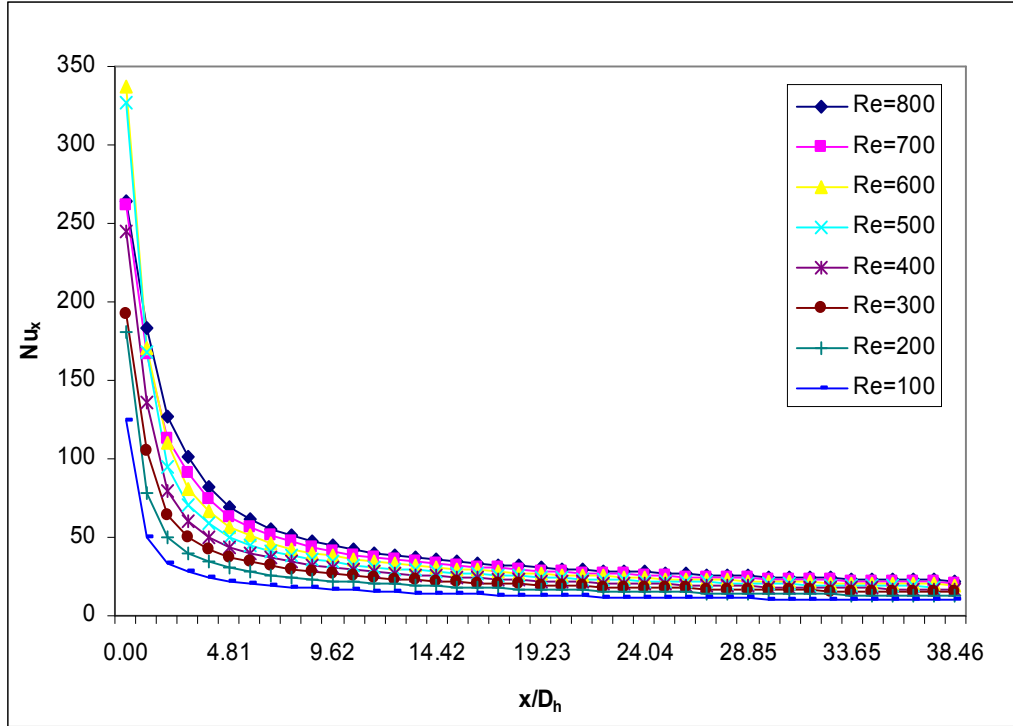
5.3.2. Sabit yüzey ısı akısı sınır şartında etilen glikol akışkanı için sonuçlar

Altıgen kesitli kanalda Reynolds sayısı 800 iken sekiz farklı hücre sayısında çalışılarak, sayısal inceleme sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu koşulu sağlayan optimum hücre sayısı belirlenmiştir. Çizelge 5.11’de farklı hücre sayıları ile gerçekleştirilen sayısal inceleme sonucunda elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Hücre sayısının 667x40x20’den 900x54x27’a değişmesi durumunda Nusselt sayısında %0,73 oranında değişim, Darcy sürtünme katsayısında ise %0,37 oranında bir değişim görülmüştür. Bu nedenle optimum hücre sayısı 667x40x20 olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda bu hücre sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 5.11. Ortalama Nusselt sayısı ile Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısına bağlı olarak değişimi

Hücre Sayısı (x,y,z)	$Nu_{m,H}$	$f_{m,H}$
267x16x8	26,97	0,125227
333x20x10	26,88	0,125948
500x30x15	26,46	0,126955
600x36x18	26,25	0,127315
667x40x20	26,15	0,127504
734x44x22	26,08	0,127663
834x50x25	26,00	0,127859
900x54x27	25,96	0,127969

Eş. 4.22 kullanılarak etilen glikol akışkanının sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca $100 \leq Re \leq 800$ aralığı için hesaplanan değerleri grafiksel olarak Şekil 5.90’da verilmiştir.



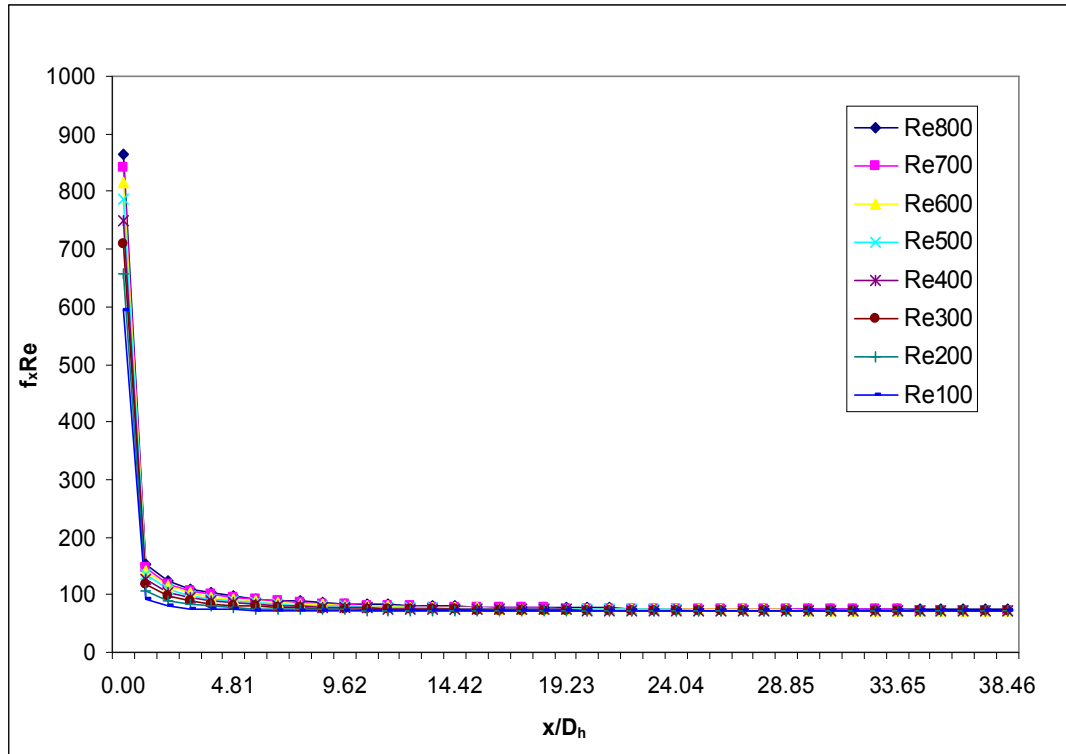
Şekil 5.89. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi

Şekil 5.90'da görüldüğü üzere kanal girişinde yerel Nusselt sayısı beklenildiği şekilde tüm Reynolds sayıları için yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında elde edilen yerel Nusselt sayılarının ise daha yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Kanal boyunca yerel Nusselt sayılarının tüm Reynolds sayıları için düşüş gösterdiği ve belirli bir mesafeden sonra düştüğü görülmüştür. Buradan çalışılan Reynolds sayısı aralığında sabit ısı akısı koşulu için etilen glikolün yüksek Reynolds sayıları için kanal boyunca ısıl olarak tam gelişmişlik koşullarına ulaşmadığı sonucu çıkarılabilir. Bu doğrultuda çalışmada seçilen hidrolik çapı 0,052 m olan düzgün altıgen kesitli kanalda etilen glikol ısıl olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmadığı görülmüştür.

Aynı akışkan ve koşullar için eksenel yönde yerel Darcy sürtünme faktörü f_x ise Eş. 4.24'te belirtilen formülle hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda kanal uzunluğu boyunca elde edilen yerel Darcy sürtünme faktörü değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.91'de verilmiştir. Şekil 5.91'de görüldüğü üzere hesaplanan $f_x Re$ değerleri

beklenildiği şekilde kanal girişinde yüksek değerler almıştır. $f_x Re$ değerinin belirli bir kanal uzunluğundan sonra değişmediği ve 72,76 sabit değerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde yerel Darcy sürtünme faktörünün sabit kaldığı kanal uzunluğundan itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı söylenebilir. Hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullar altındaki $f_x Re$ değeri 72,76 olarak bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki çalışmalarda elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.12’de verilmiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen $f_x Re$ sayısı ile literatürdeki [17], [3], [8] sonuçlar arasındaki farkın sırasıyla %17,26, %17,37 ve %17,21 olduğu görülmüştür.

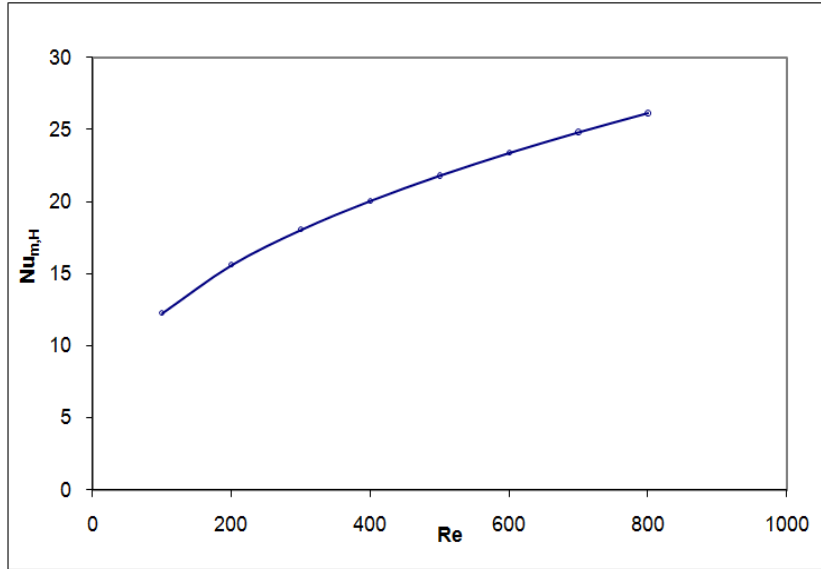


Şekil 5.90. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi

Çizelge 5.12. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda elde edilen sayısal Sonuçların literatür ile karşılaştırılması

	$f_x Re$
Sayısal Sonuçlar	72,76
Ref. [17]	60,20
Ref. [3]	60,12
Ref. [18]	60,22
Ref. [8]	60,24

Ortalama Nusselt sayısı değerleri $100 \leq Re \leq 800$ değerleri için Şekil 5.92’de verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak kanal içindeki ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.11 ile ifade edilmiştir.



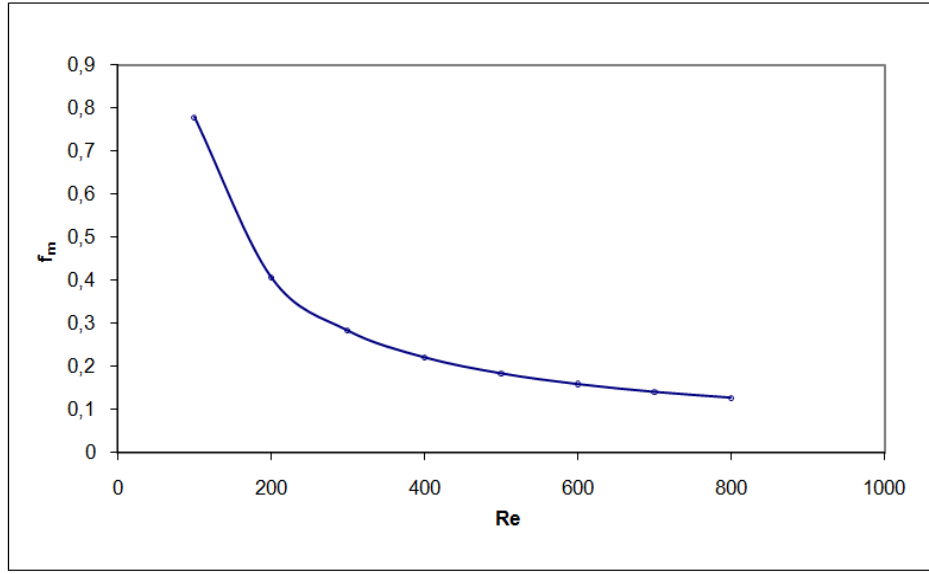
Şekil 5.91. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda kanal içerisindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

$$Nu_{m,H} = 2,28 Re^{0,364} \quad (5.11)$$

Altıgen kesitli kanalda $100 \leq Re \leq 800$ Reynolds değerleri için hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları Şekil 5.93’te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan Reynolds sayısına bağlı olarak Darcy sürtünme faktöründe azalma söz konusudur.

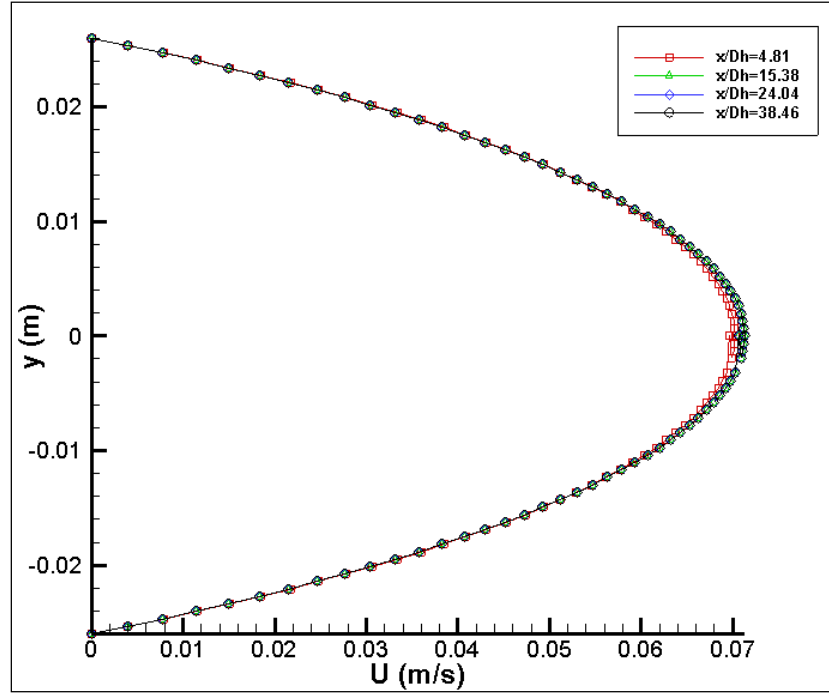
Buradan Reynolds sayısı ile Darcy sürtünme faktörü arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak Darcy sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı arasındaki fonksiyonel ilişki Eş.5.12 ile ifade edilmiştir.

$$f_{m,H}=41,34Re^{-0,869} \quad (5.12)$$

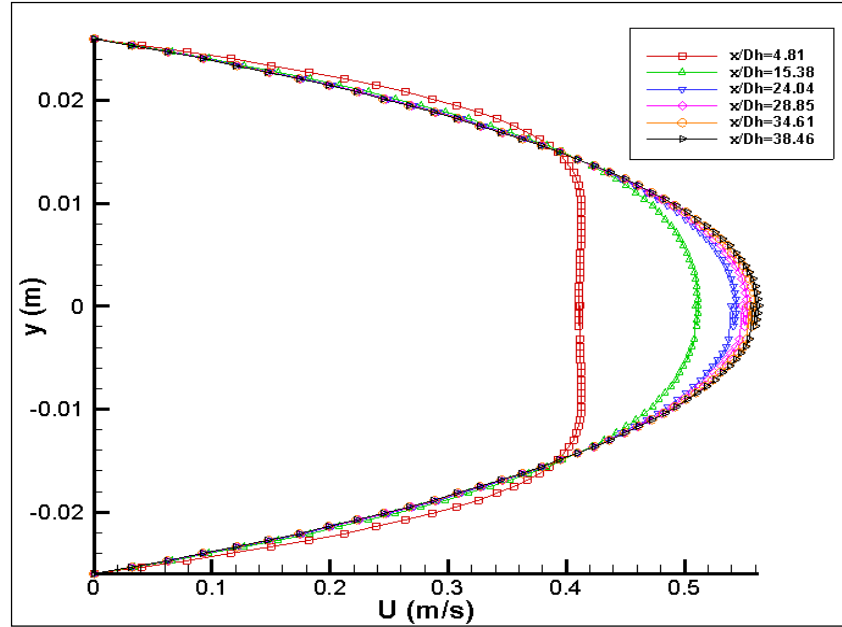


Şekil 5.92. Etilen glikol için sabit ısı akısı koşulunda ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

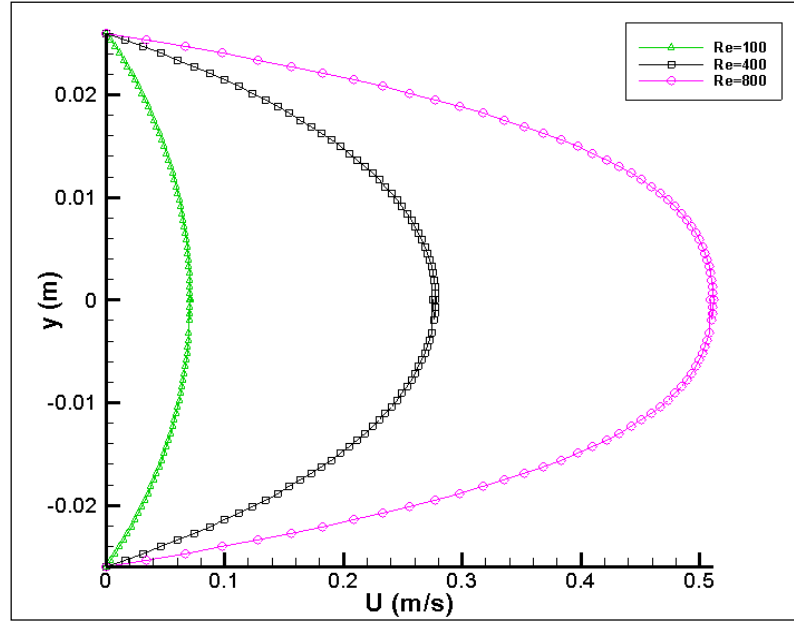
Altıgen kesitli kanalda etilen glikol akışkanının sabit ısı akısı duvar koşulu için simetri düzlemi ($z=0$) üzerindeki hız profilleri kanal boyunca farklı kesitlerde incelenmiştir. Bu kesitler $x/D_h = 4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ olarak belirlenmiştir. Belirtilen kesitlerde $Re=100$ ve $Re=800$ için kanal boyunca hız profilleri Şekil 5.94 ve Şekil 5.95'te sunulmuştur. $Re=100$ için kanal x -mesafesi $x/D_h=15,38$ iken kanal içindeki akış hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmıştır. Kanal içindeki akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşma mesafesi $Re=800$ için ise $x/D_h=34,61$ olarak belirlenmiştir. Simetri düzleminde kanal girişinden itibaren $x/D_h=15,38$ 'de oluşturulan x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları ($Re=100, 400, 800$) için hız profilleri ise Şekil 5.96'da verilmiştir. Bu grafiklerden, farklı Reynolds sayılarında kanal içindeki hız profillerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir.



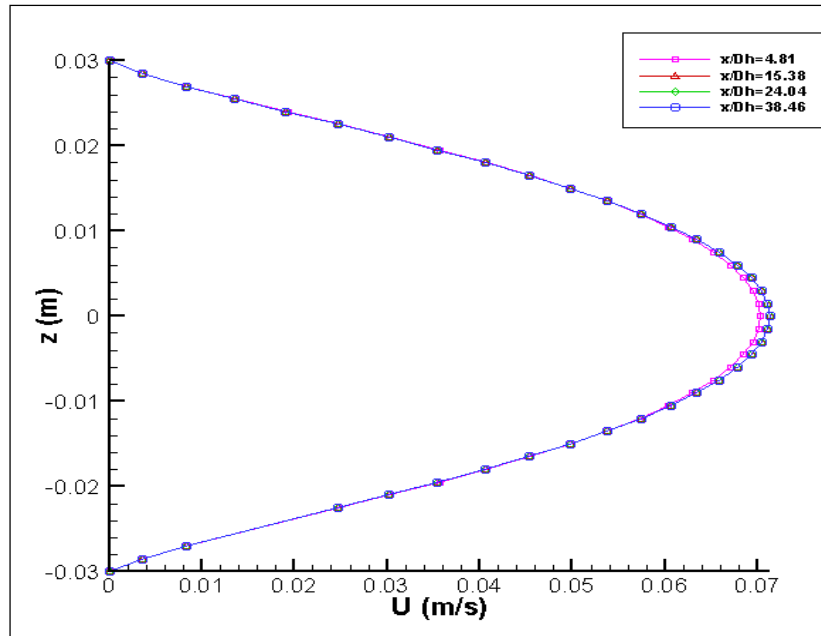
Şekil 5.93. $Re=100$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



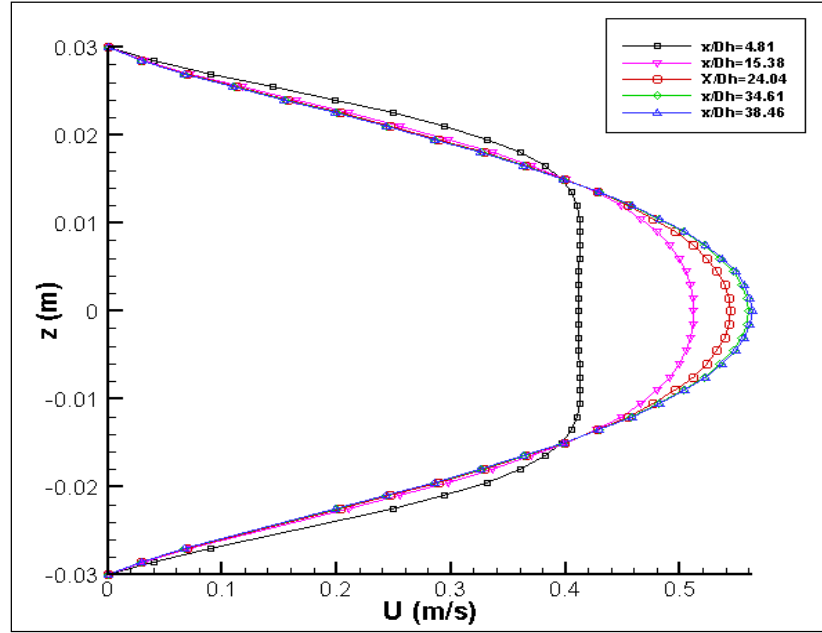
Şekil 5.94. $Re=800$ için $z=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



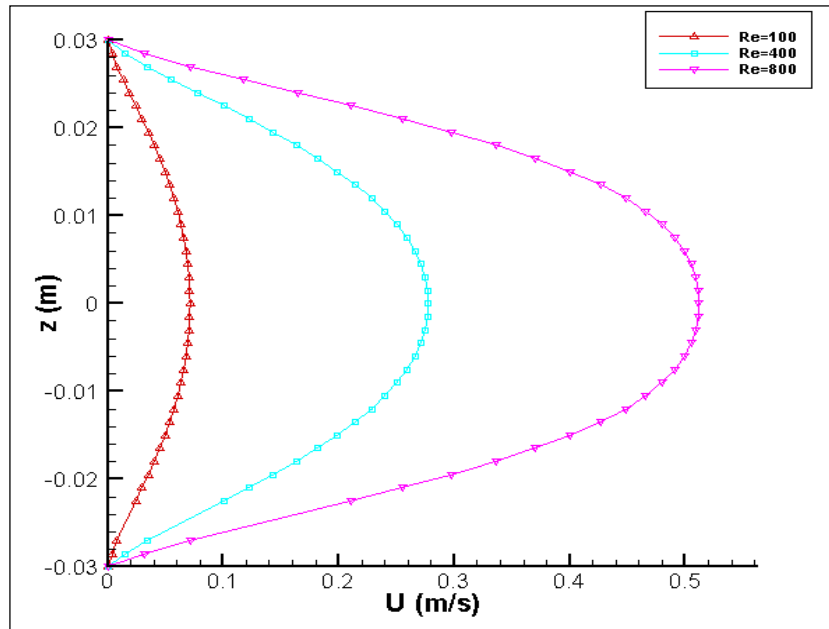
Şekil 5.95. $z=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15.38$ x - mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.96. $Re=100$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x - mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri



Şekil 5.97. $Re=800$ için $y=0$ simetri düzleminde ve farklı x -mesafelerinde kanal yüksekliği boyunca sabit ısı akısı duvar koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri

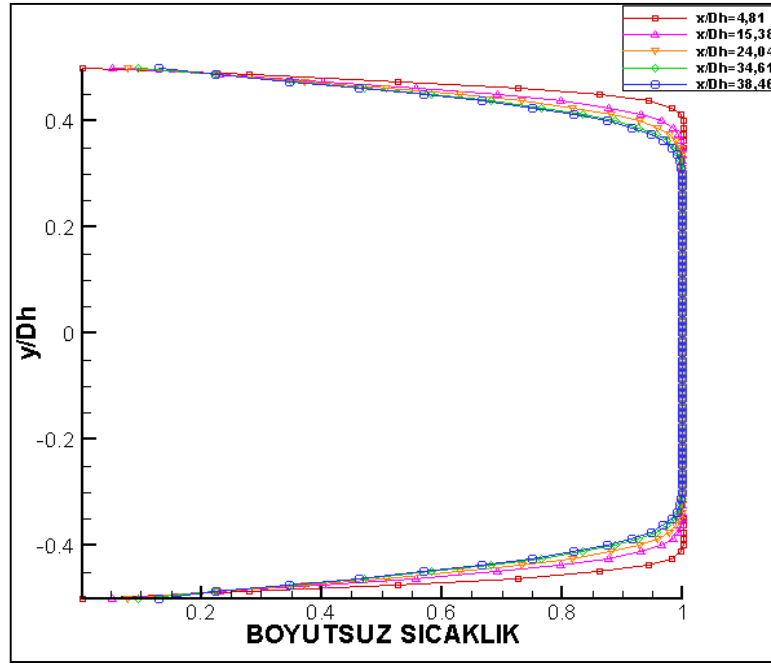


Şekil 5.98. $y=0$ simetri düzleminde ve $x/D_h=15,38$ x -mesafesinde farklı Reynolds sayıları için kanal içinde sabit ısı akısı koşulu için etilen glikol akışkanına ait hız profilleri

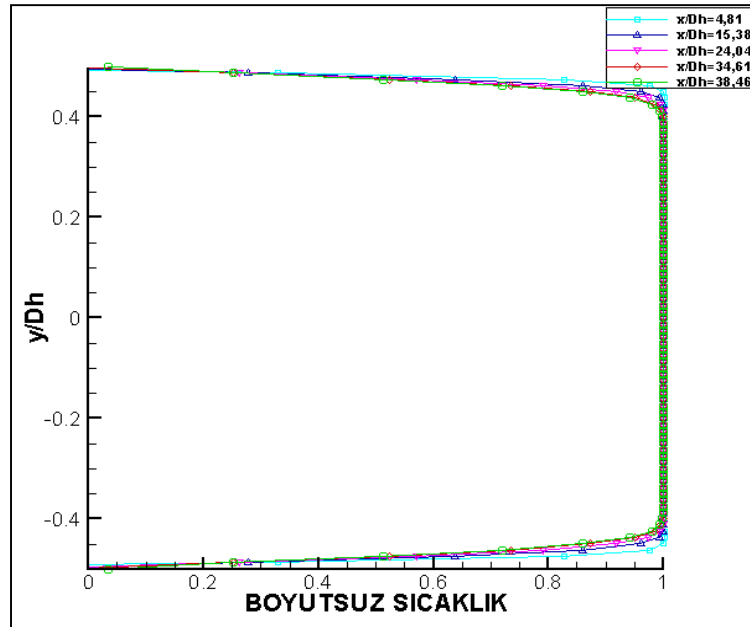
Kanal boyunca sıcaklık dağılımı sürekli olarak değişmektedir. Kanal boyunca sabit ısı akısı duvar koşulunda su akışkanı için boyutsuz sıcaklığın (θ) kanal yüksekliği ile değişimi $Re=100$ ve $Re=800$ için farklı x - mesafelerinde incelenmiş ve bu değişime ait grafikler Şekil 5.100 ve Şekil 5.101’de verilmiştir. Kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklığın değişimi simetri düzleminde oluşturulan yüzeyde ($z=0$) incelenmiştir. İnceleme sonucunda akışın $Re=100$ ve $Re=800$ için ısı olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmadığı görülmüştür. Çizdirilen grafiklerden boyutsuz sıcaklık profillerinin parabolik profile sahip olmadığı ve etilen glikol akışkanının ısı olarak tam gelişmiş koşullara düşük Reynolds sayılarında da ulaşamadığı sonucu çıkarılabilir.

Kanal boyunca $x/D_h=4,81, 15,38, 24,04, 28,85, 34,61$ ve $38,46$ boyutsuz mesafelerinde y - z kesitlerindeki hız- kontur dağılımı grafikleri $Re=800$ ve $Re=100$ için Şekil 5.102 ve Şekil 5.103’te verilmiştir. Şekil 5.102’de görüldüğü üzere $Re=800$ için etilen glikol akışkanına ait hız dağılımı incelendiğinde akışın x -mesafelerinde hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara kanal çıkışından itibaren ulaştığı söylenebilir. Şekil 5.103’te ise $Re=100$ için etilen glikol akışkanına ait hız dağılımı incelendiğinde $x/D_h=15,38$ ’den itibaren akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür.

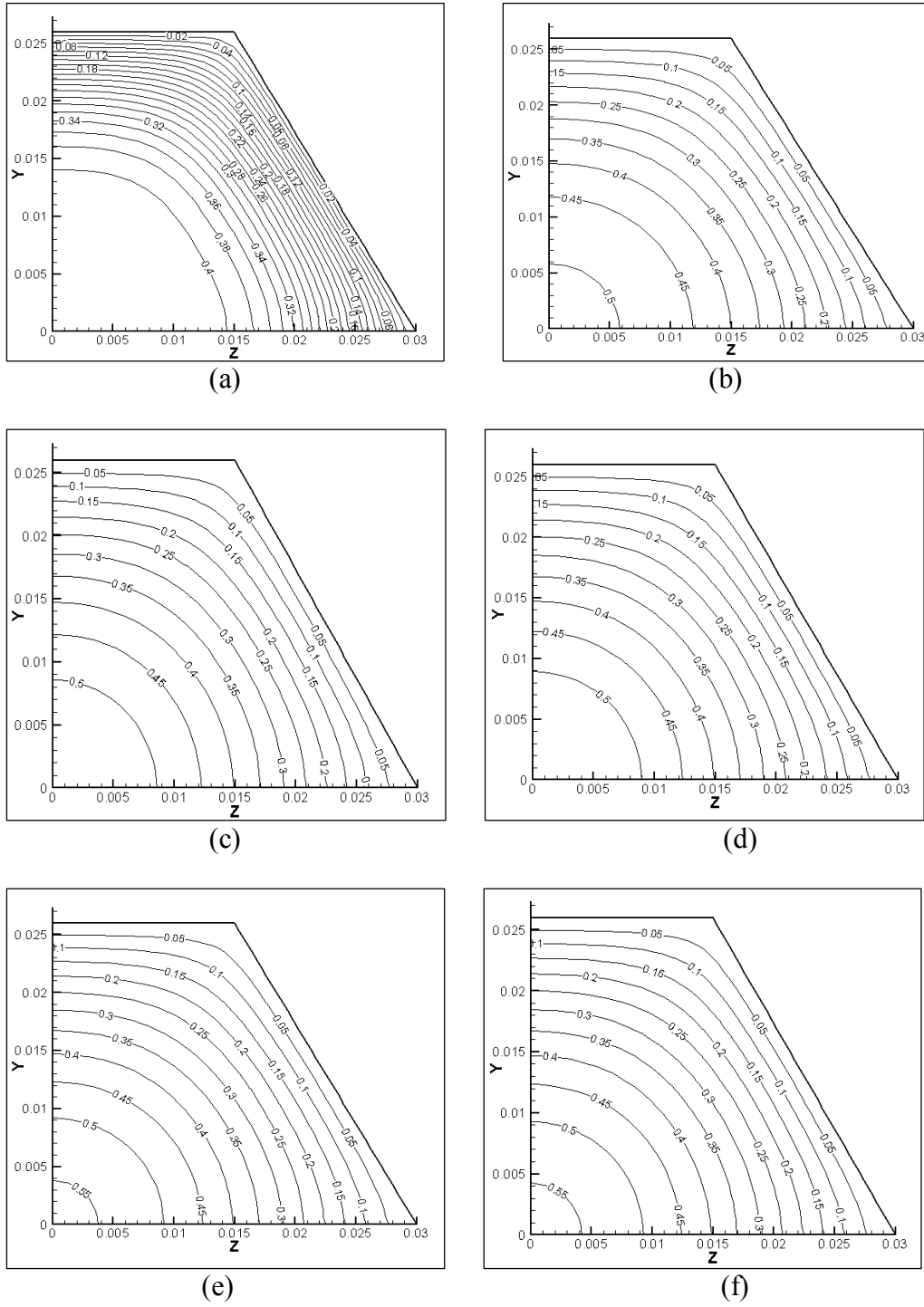
Çalışmada ayrıca Reynolds sayısının hız dağılımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. $x/D_h=4,81$ iken y - z kesitindeki hız dağılımları üç farklı Reynolds sayısı için incelenmiştir. Şekil 5.104’te $Re=100, 400$ ve 800 için hız dağılımlarının incelenmesi sonucu artan hızla birlikte kanal duvar kenarlarında görülen hız sınır tabakası kalınlığında azalma gözlenmiştir. Düşük Reynolds sayılarında kanal merkezine yakın yerlerde akışkan hız değerinin düşük olduğu görülmüştür.



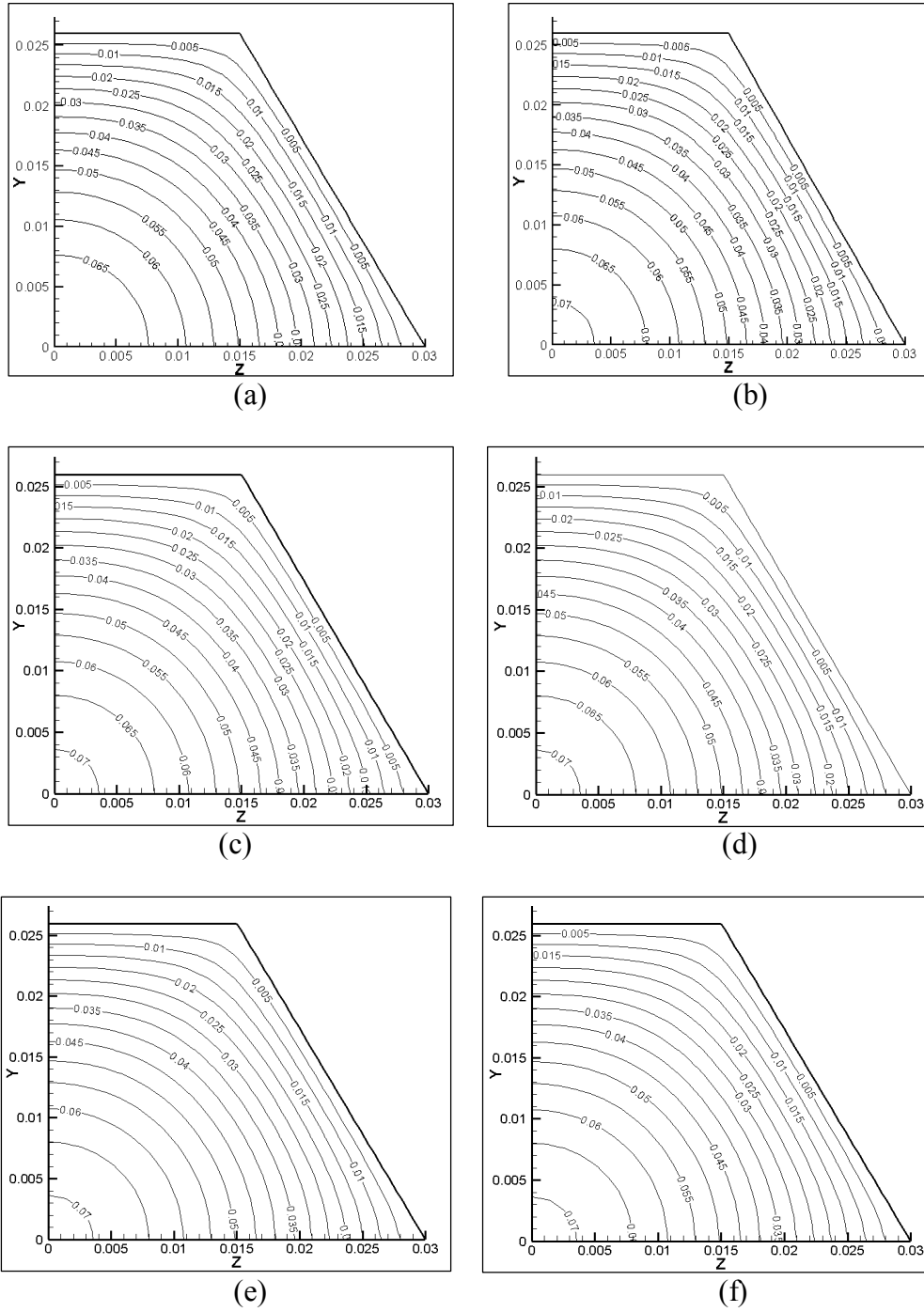
Şekil 5.99. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=100$ için etilen glikol akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişim



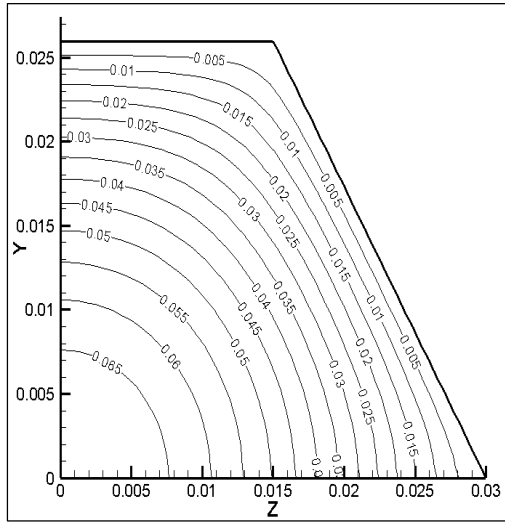
Şekil 5.100. Sabit ısı akısı duvar koşulunda $z=0$ simetri düzleminde $Re=800$ için etilen glikol akışkanının farklı x-mesafelerinde kanal yüksekliği ile boyutsuz sıcaklık değişimi



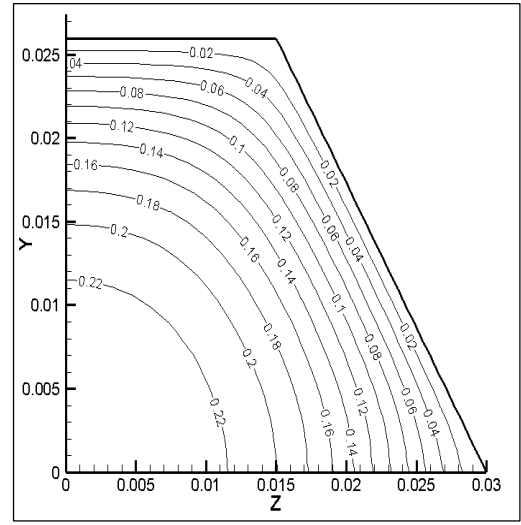
Şekil 5.101. Sabit ısı akısı duvar koşulunda etilen glikolün $Re=800$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



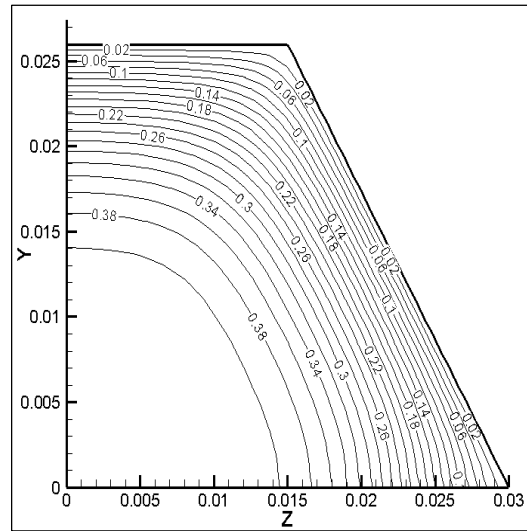
Şekil 5.102. Sabit ısı akısı duvar koşulunda etilen glikolün $Re=100$ için farklı kesitlerde y - z düzlemleri üzerinde hız konturları (a) $x/D_h=4,81$, (b) $x/D_h=15,38$, (c) $x/D_h=24,04$, (d) $x/D_h=28,85$, (e) $x/D_h=34,61$, (f) $x/D_h=38,46$



(a)



(b)



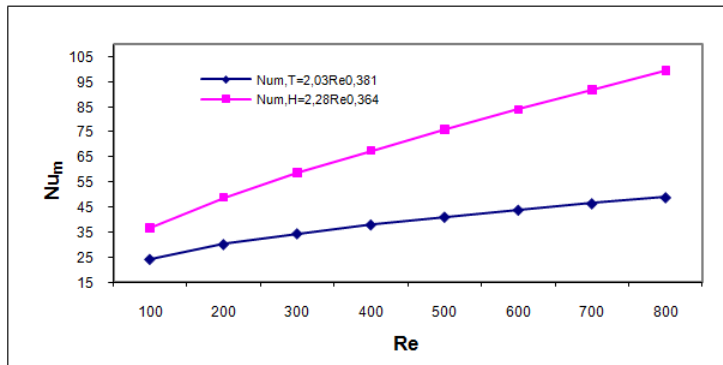
(c)

Şekil 5.103. Sabit ısı akısı duvar koşulunda etilen glikolün farklı Reynolds sayıları için $x/D_h=4,81$ 'de y-z kesitindeki hız dağılımları
(a) $Re=100$, (b) $Re=400$, (c) $Re=800$

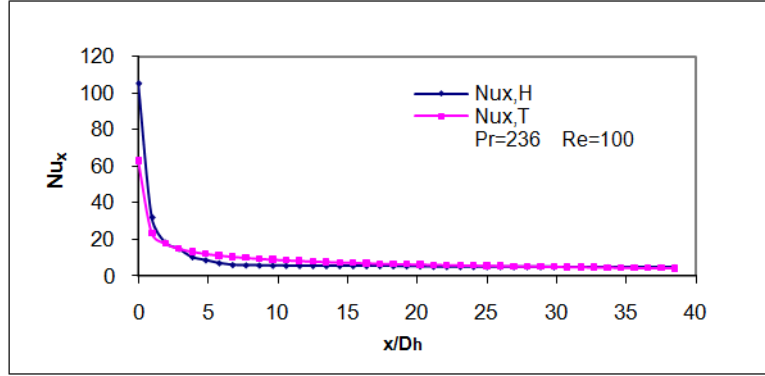
5.3.3. Altıgen kesitli kanalda etilen glikol akışkanı için sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşullarının kıyaslanması

Altıgen kesitli kanalda etilen glikol akışkanı Bölüm 5.3.1 ve Bölüm 5.3.2’de sırasıyla sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulları için $100 \leq Re \leq 800$ aralığında sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen ortalama ve yerel Nusselt sayılarının her iki koşul için farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması Şekil 5.105 ve Şekil 5.106’da verilmiştir. Her iki koşula ait analiz sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda etilen glikol akışkanının ısı olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmadığı görülmüştür. Bu koşullarda da ortalama Nusselt sayı değerlerinin sabit ısı akısı sınır koşulu için daha yüksek olduğu görülmüştür.

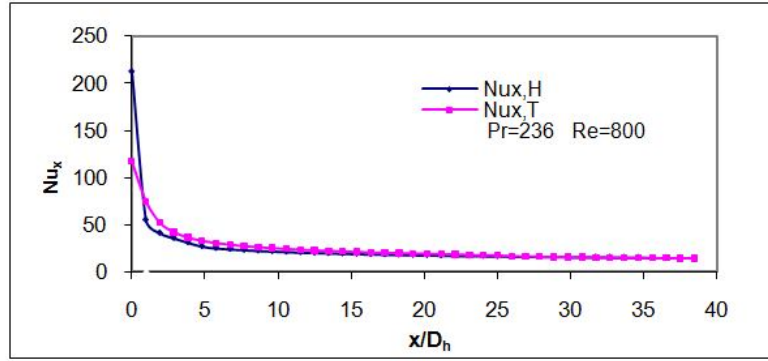
Her iki koşula ait sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında sabit duvar sıcaklığı ve ısı akısı koşulları altında etilen glikol akışkanının hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. İnceleme sonucunda elde edilen ortalama ve yerel Darcy sürtünme faktörünün her iki koşul için farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması Şekil 5.107 ve Şekil 5.108’de verilmiştir. Çalışmada hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarında elde edilen Darcy sürtünme faktörü değerinin sabit sıcaklık sınır koşulunda 72,8; sabit ısı akısı koşulunda ise 72,76 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.104. Etilen glikol akışkanı için ortalama Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşullarında farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması

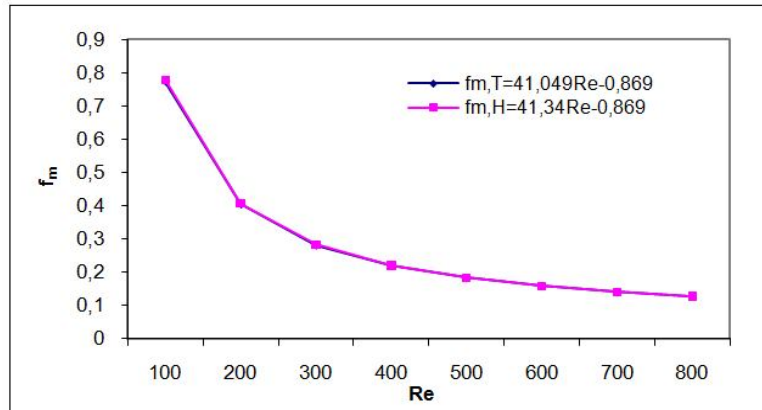


(a)

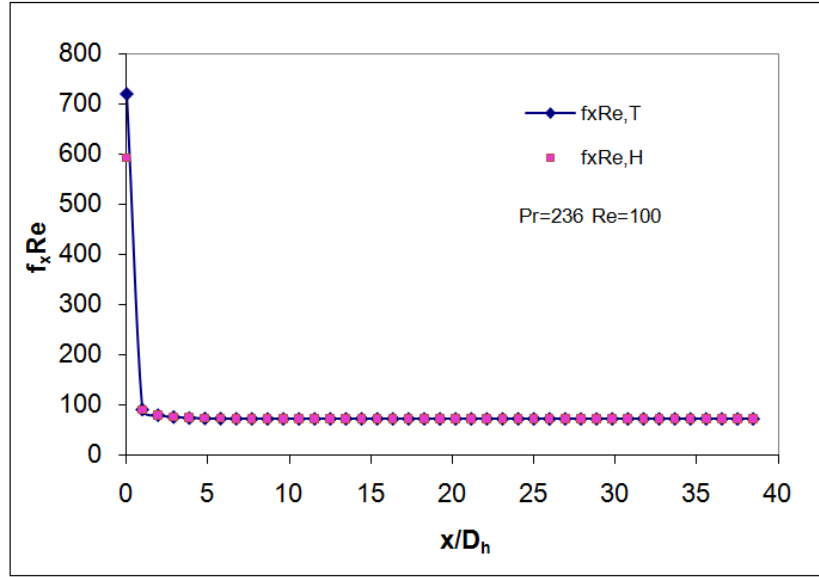


(b)

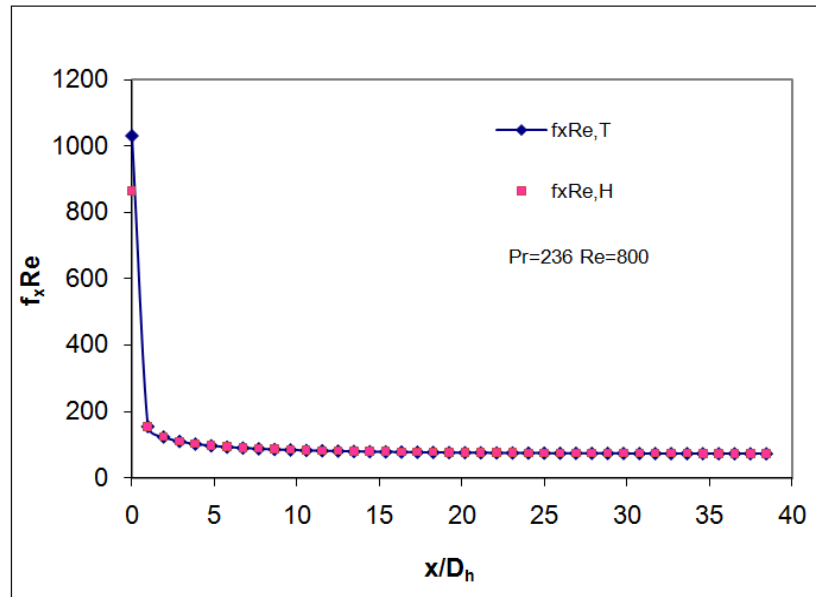
Şekil 5.105. Etilen glikol akışkanı için yerel Nusselt sayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması



Şekil 5.106. Etilen glikol akışkanı için ortalama Darcy faktörünün sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında karşılaştırması



(a)



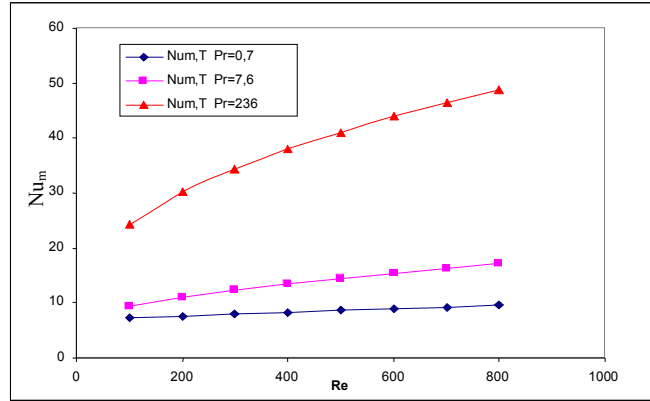
(b)

Şekil 5.107. Etilen glikol akışkanı için yerel Darcy sürtünme katsayısının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında farklı Reynolds sayılarında (a) $Re=100$, (b) $Re=800$ karşılaştırması

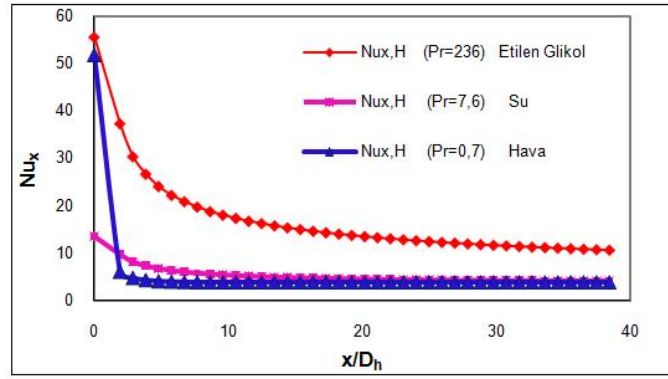
5.4. Hava, Su ve Etilen Glikol İçin Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

5.4.1. Sabit sıcaklık

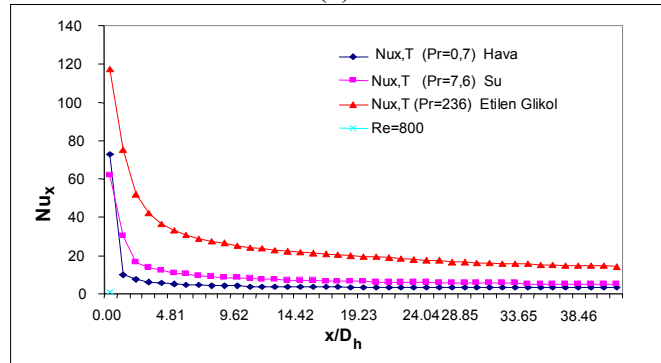
Altıgen kesitli kanalda sabit sıcaklık duvar koşulu için üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkan Reynolds sayısının 100 ile 800 aralığı için üç boyutlu sayısal olarak incelenmiştir. İnceme sonucunda 0,052 m hidrolik çapa sahip ve 2 m uzunluğundaki düzgün altıgen kanalda hava akışkanı ve su akışkanının ısıl ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. Etilen glikol akışkanının ısıl olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmadığı fakat hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşulları sağladığı görülmüştür. Şekil 5.109 ve Şekil 5.110'da sabit sıcaklık duvar koşulu için çalışmada incelenen üç farklı akışkan için farklı Reynolds sayılarında elde edilen ortalama ve yerel Nusselt sayıları verilmiştir. Şekil 5.109'dan görüldüğü üzere etilen glikol akışkanına ait farklı Reynolds sayıları için elde edilen ortalama Nusselt sayı değerlerinin en yüksek olduğu, hava akışkanı için ise en düşük olduğu görülmüştür. Şekil 5.110 incelendiğinde yerel Nusselt sayısının kanal boyunca hava ve su akışkanı için sabitlendiği görülmektedir. Fakat aynı durum etilen glikol akışkanı için söylenemez. Şekilden de görüldüğü üzere etilen glikol akışkanı kanal içinde ısıl olarak gelişmiş koşullara hala ulaşamamıştır. Benzer şekilde üç farklı akışkana ait Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı akışkan için ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 5.111'de verilmiştir. Benzer şekilde üç farklı akışkan için yerel Darcy sürtünme faktörünün farklı Reynolds sayılarında gösterimi Şekil 5.112'de verilmiştir. Yerel Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca değişimi grafiklerden incelendiğinde, çalışmada kullanılan üç akışkanın belirli bir x-mesafesinden sonra hidrodinamik olarak gelişmiş koşullara ulaştığı sonucu çıkarılmıştır. Çizelge 5.13'te sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkan için ısıl ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarındaki yerel Nusselt ve Darcy sürtünme faktörü değerleri özetlenmiştir.



Şekil 5.108. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait farklı Reynolds sayılarına karşılık gelen ortalama Nusselt değerleri

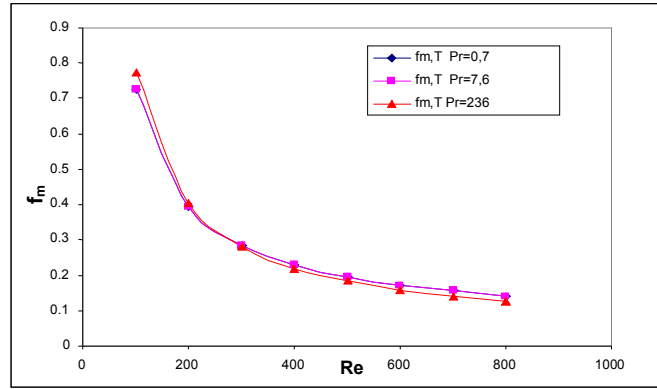


(a)

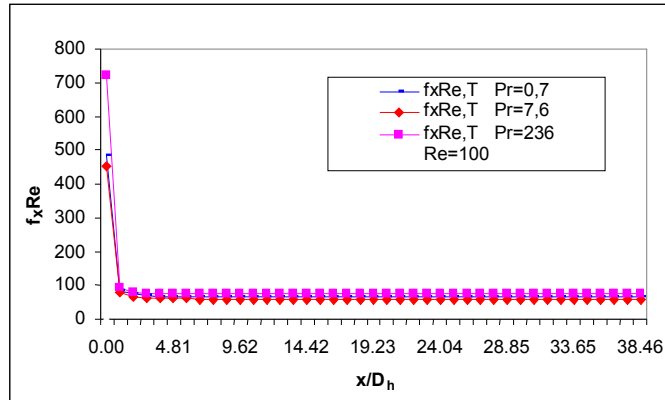


(b)

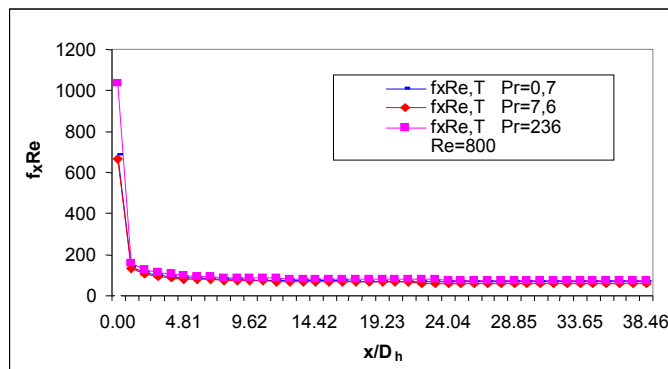
Şekil 5.109. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Nusselt değerlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) Re=100, (b) Re=800 karşılaştırılması



Şekil 5.110. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı akışkan için Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi



(a)



(b)

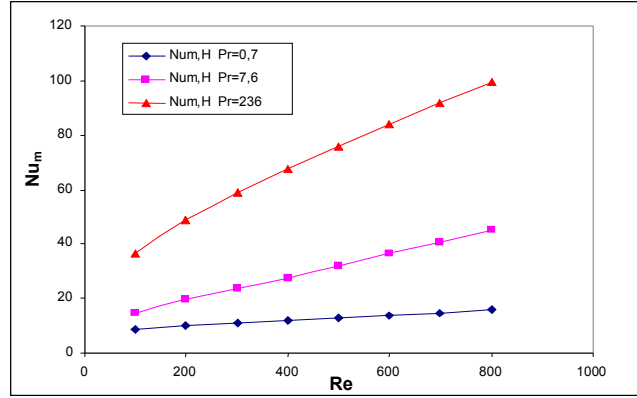
Şekil 5.111. Sabit sıcaklık duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Darcy sürtünme faktörlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) Re=100, (b) Re=800 karşılaştırılması

Çizelge 5.13. Sabit sıcaklık koşulu için tüm akışkanlara ait tam gelişmiş akış şartlarındaki yerel Nusselt ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

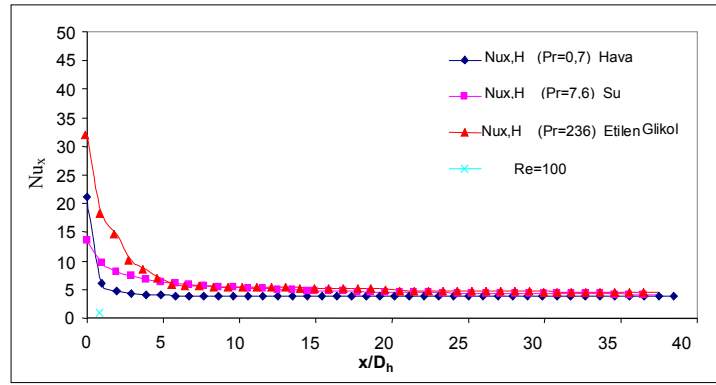
Akışkan	Nu_x	$f_x Re$
Hava	3,23	65,52
Su	3,32	58,76
Etilen Glikol	-	72,8

5.4.2. Sabit ısı akısı

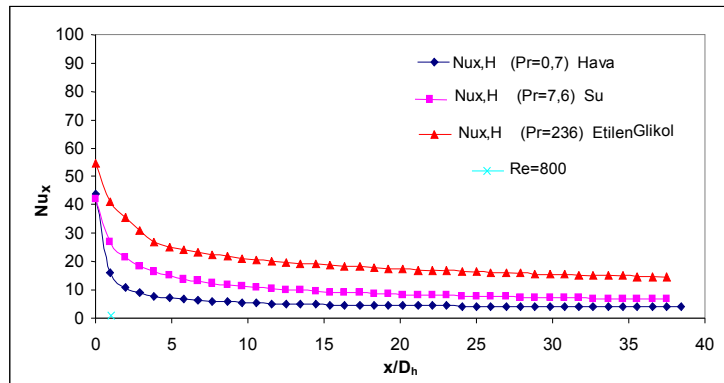
Altıgen kesitli kanalda sabit ısı akısı duvar koşulu için üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkan Reynolds sayısının 100 ile 800 aralığı için üç boyutlu sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda 0,052 m hidrolik çapa sahip ve 2 m uzunluğundaki düzgün altıgen kanalda hava akışkanının ısıl ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. Aynı koşullar için su akışkanı da ısıl ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmıştır. Etilen glikol akışkanın ısıl olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmadığı ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşulları sağladığı söylenebilir. Şekil 5.113 ve Şekil 5.114'te sabit ısı akısı duvar koşulu için çalışmada incelenen üç farklı akışkanın farklı Reynolds sayılarında elde edilen ortalama ve yerel Nusselt sayı değerleri verilmiştir. Şekil 5.114'ten görüldüğü üzere etilen glikol akışkanına ait farklı Reynolds sayıları için elde edilen Nusselt sayı değerlerinin en yüksek olduğu, hava akışkanı için ise en düşük olduğu görülmüştür. Sabit ısı akısı sınır koşulu için hava ve su akışkanlarına ait yerel Nusselt sayısının sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Şekil 5.115'ten görüldüğü üzere aynı sınır koşulları için etilen glikol ısıl olarak hala gelişmektedir. Benzer şekilde üç farklı akışkana ait ortalama Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hava için en yüksek, su için ise en düşük olduğu görülmüştür. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı akışkan için ortalama ve yerel Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 5.115 ve Şekil 5.116'da verilmiştir. Çizelge 5.14'te sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkan için ısıl ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarındaki yerel Nusselt ve Darcy sürtünme faktörü değerleri özetlenmiştir.



Şekil 5.112. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait farklı Reynolds sayılarına karşılık gelen ortalama Nusselt değerleri

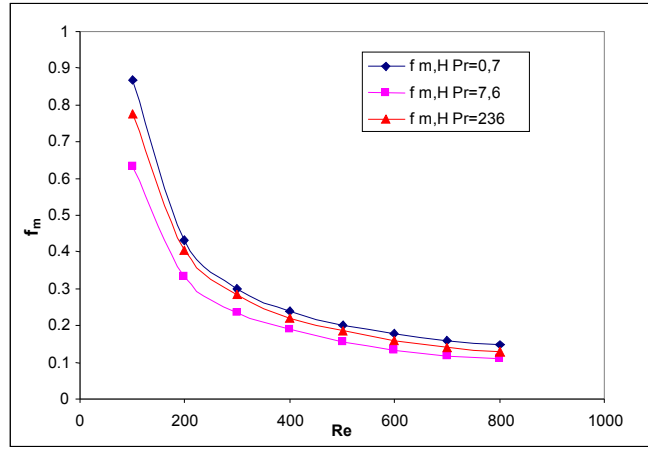


(a)

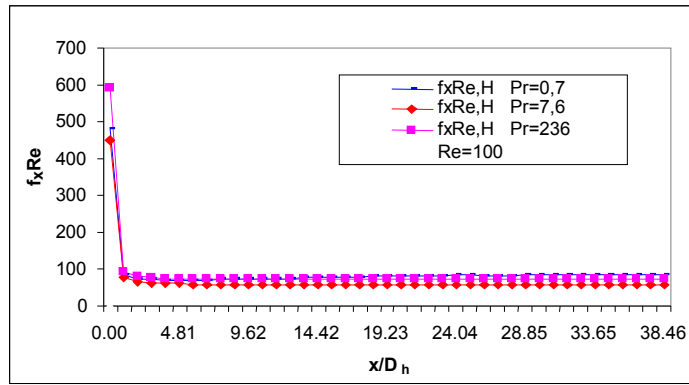


(b)

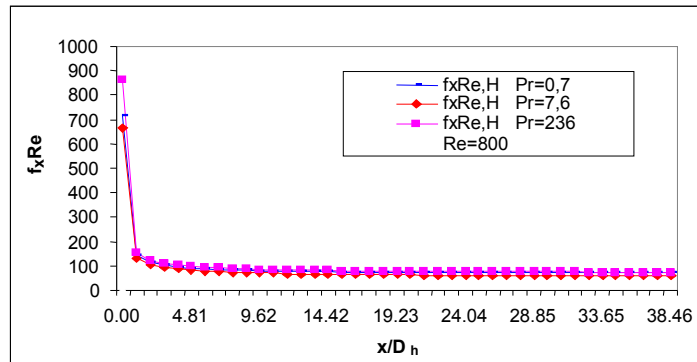
Şekil 5.113. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Nusselt değerlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) Re=100, (b) Re=800 karşılaştırılması



Şekil 5.114. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı akışkan için Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi



(a)



(b)

Şekil 5.115. Sabit ısı akısı duvar koşulunda üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkana ait yerel Darcy sürtünme faktörlerinin farklı Reynolds sayılarında (a) Re=100, (b) Re=800 karşılaştırılması

Çizelge 5.14.Sabit ısı akısı koşulu için tüm akışkanlara ait tam gelişmiş akış şartlarındaki yerel Nusselt ve Darcy sürtünme faktörü değerleri

Akışkan	Nu_x	$f_x Re$
Hava	3,85	64,8
Su	4,2	58,56
Etilen Glikol	-	72,76

5.4.3. Sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sonuçlarının değerlendirilmesi

Altıgen kesitli kanalda sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sınır koşulları için incelenen hidrodinamik ve ısıl olarak gelişmekte olan laminar akışa ait üç farklı akışkana ait analiz sonuçları Çizelge 5.15'te özetlenmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere düşük Prandtl sayısına ait hava akışkanının ($Pr=0,7$) ısıl ve hidrodinamik olarak gelişmiş koşullara yüksek Reynolds sayılarında kanal çıkışına yakın bölgede, düşük Reynolds sayılarında ise kanal girişine yakın bölgede ulaştığı görülmüştür. Daha yüksek Prandtl sayısına sahip olan su akışkanının ($Pr=7,6$) yüksek Reynolds sayılarında ısıl olarak tam gelişmiş koşullara ulaşmadığı, hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ise kanal çıkışına yakın bölgede ulaştığı görülmüştür. Su akışkanının düşük Reynolds sayılarında ise ısıl olarak tam gelişmiş koşullara kanal çıkışına yakın bölgede ulaştığı, hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ise kanal giriş bölgesinde ulaştığı görülmüştür. Yüksek Prandtl sayısına sahip etilen glikol akışkanının ($Pr=236$) ise düşük ve yüksek Reynolds sayılarında kanal içerisinde ısıl olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaşmadığı; yüksek Reynolds sayılarında kanal çıkışına yakın bölgede, düşük Reynolds sayılarında ise kanal girişine yakın bölgede hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullara ulaştığı görülmüştür. Bu bilgilerden yararlanılarak farklı Prandtl sayısına sahip akışkanların ısıl ve hidrodinamik kanal giriş uzunlukları belirlenmiştir. Hidrodinamik giriş uzunluğu kanal içerisine giren akışkanın hız profilinin uniform olduğu hız değerinin %99'ı olarak belirlenmiş olup; ısıl giriş uzunluğu ise tam gelişmiş koşullardaki Nusselt değerinin 1,05 olduğu koşuldaki yerel Nusselt sayısının elde edildiği uzunluk olarak belirlenmiştir [17]. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.16'da özetlenmiştir.

Çizelge 5.15. Tüm akışkanlara ait elde edilen analiz sonuçları (a) hava akışkanı, (b) su akışkanı, (c) etilen glikol akışkanı

Sınır Koşulu		Hava			
		Re=100	Re=800	Nu	fRe
Sabit Duvar Sıcaklığı	Hidrodinamik tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	Kanal Çıkışı	3,23	65,52
	Isıl tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	34,61		
Sabit Isı Akısı	Hidrodinamik tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	34,61	3,85	64,8
	Isıl tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	Kanal Çıkışı		

(a)

Sınır Koşulu		Su			
		Re=100	Re=800	Nu	fRe
Sabit Duvar Sıcaklığı	Hidrodinamik tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	34,61	3,32	58,76
	Isıl tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	34,61	Tam Gelişmiş Değil		
Sabit Isı Akısı	Hidrodinamik tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	34,61	4,2	58,55
	Isıl tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	34,61	Tam Gelişmiş Değil		

(b)

Sınır Koşulu		Etilen Glikol			
		Re=100	Re=800	Nu	fRe
Sabit Duvar Sıcaklığı	Hidrodinamik tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	Kanal Çıkışı	-	72,8
	Isıl tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	Tam Gelişmiş Değil	Tam Gelişmiş Değil		
Sabit Isı Akısı	Hidrodinamik tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	15,38	34,61	-	72,76
	Isıl tam gelişmiş akış mesafesi (x/D_h)	Tam Gelişmiş Değil	Tam Gelişmiş Değil		

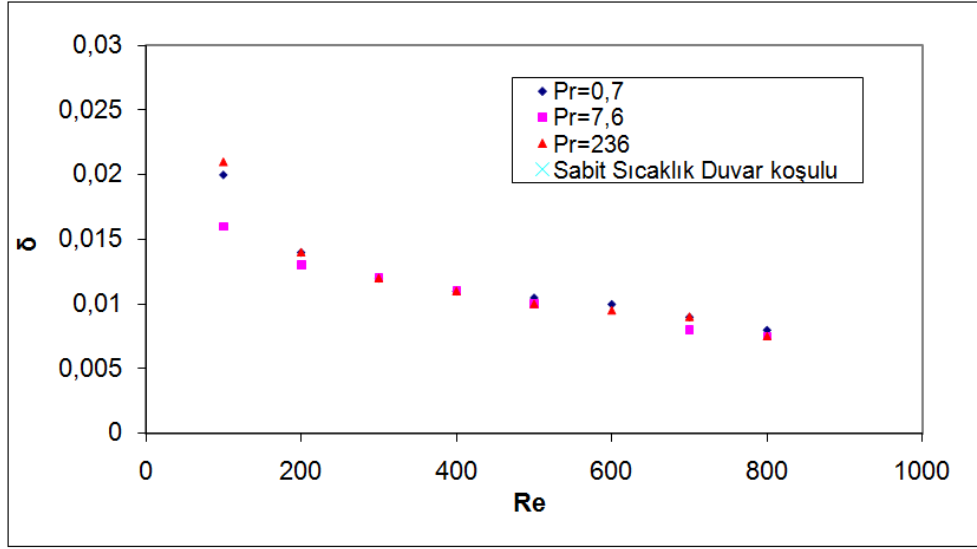
(c)

Çizelge 5.16. Çalışmada incelenen farklı Prandtl sayısına sahip akışkanlara ait ısı ve hidrodinamik kanal giriş uzunlukları

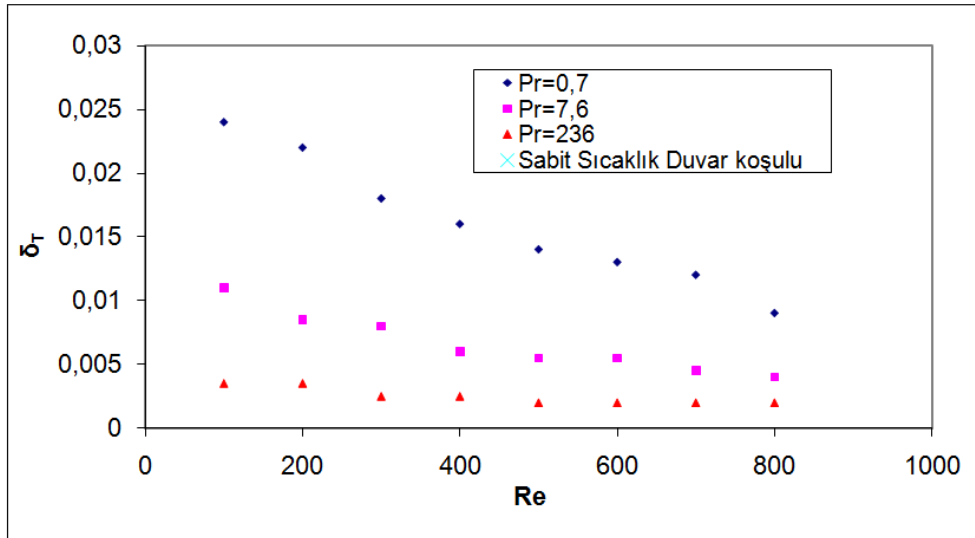
Sınır Koşulu		Hava			Su			Etilen Glikol		
		Re 100	Re 400	Re 800	Re 100	Re 400	Re 800	Re 100	Re 400	Re 800
Sabit Sıcaklık	Isıl Kanal Giriş Uzunluğu, L_t	0,15m	0,64m	1,8m	1,8m	1,9m	-	-	-	-
	Hidrodinamik Kanal Giriş Uzunluğu, L_h	0,2m	0,75m	2m	0,3m	1,0m	1,55m	0,25m	1,35m	2m
Sabit Isı Akısı	Isıl Kanal Giriş Uzunluğu, L_t	0,16m	1,05m	1,8m	1,0m	1,9m	1,95m	-	-	-
	Hidrodinamik Kanal Giriş Uzunluğu, L_h	0,22m	0,9m	1,9m	0,3m	1,1m	1,45m	0,25m	1,45m	1,55m

Çalışmada ayrıca kanal girişinden itibaren belirli bir x-mesafesinde ısı ve hidrodinamik sınır tabakası kalınlıkları farklı Reynolds sayıları ve farklı akışkanlar için incelenmiştir.

İnceleme sonucunda kanal girişinden itibaren $x=0,1m$ mesafesinde sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sınır koşullarında hidrodinamik sınır tabakası kalınlığının hava, su ve etilen glikol akışkanları için hemen hemen aynı olduğu; ısı sınır tabakası kalınlığının ise hava akışkanı için en yüksek, etilen glikol akışkanı için ise en düşük olduğu görülmüştür. Prandtl sayısının 1'den küçük olduğu durumda (hava akışkanı için)hidrodinamik sınır tabakası kalınlığının ısı sınır tabakası kalınlığından küçük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde Prandtl sayısının 1'den büyük olduğu durumda (su ve etilen glikol akışkanları için) hidrodinamik sınır tabakası kalınlığının ısı sınır tabakası kalınlığından büyük olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçlara ilişkin grafikler Şekil 5.117 ve Şekil 5.118'de verilmiştir.

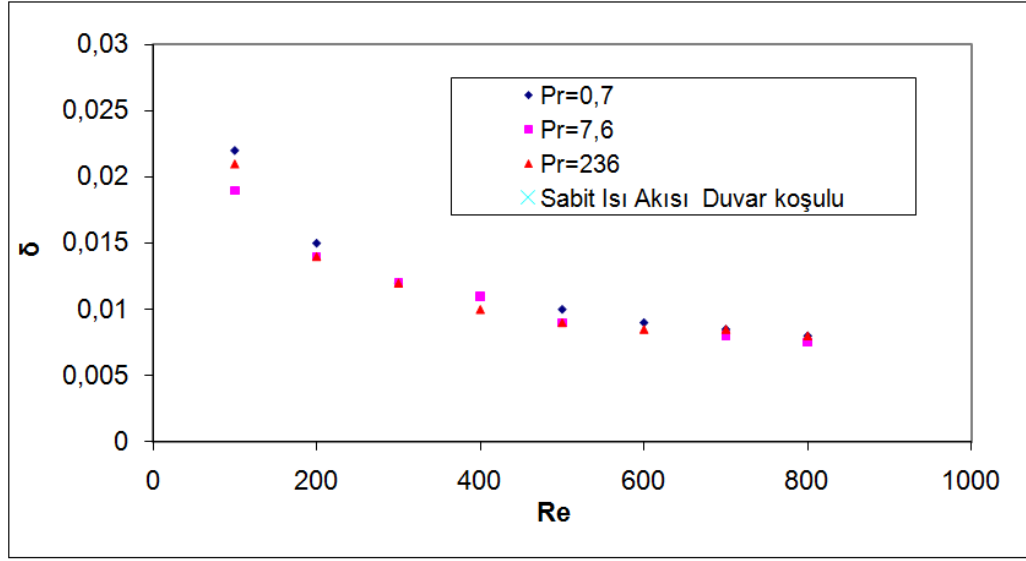


(a)

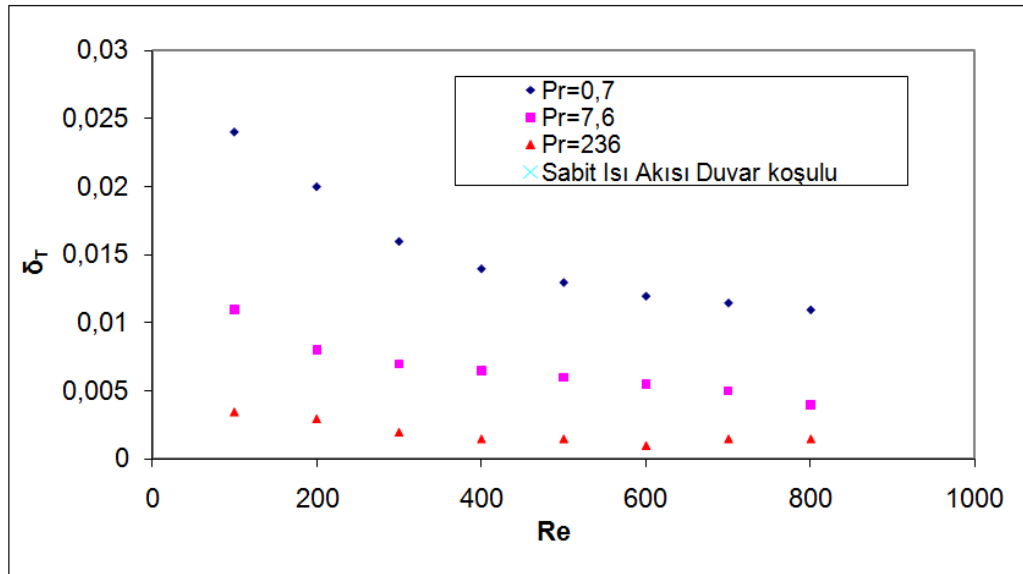


(b)

Şekil 5.117.Kanal girişinden itibaren $x=0,1$ m mesafesinde sabit sıcaklık duvar koşulu için hava, su ve etilen glikol akışkanlarına ait (a) hidrodinamik ve (b) ısı sınır tabakası kalınlıkları



(a)



(b)

Şekil 5.118. Kanal girişinden itibaren $x=0,1$ m mesafesinde sabit ısı akısı duvar koşulu için hava, su ve etilen glikol akışkanlarına ait (a) hidrodinamik ve (b) ısıl sınır tabakası kalınlıkları

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada hidrolik çapı 0,052 m ve kanal uzunluğu 2 m olan düzgün altıgen kesitli kanalda laminar, sıkıştırılamaz akışta sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu için hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkanın (hava, su, etilen glikol) üç boyutlu olarak sayısal analizi Ansys Fluent 6.3.26 ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Reynolds sayısının $100 \leq Re \leq 800$ olduğu aralık incelenmiştir. Sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşulu için hava, su ve etilen glikol akışkanlarının sayısal olarak incelenmesi sonucu ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimleri analiz edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yerel Nusselt sayısı ve Darcy sürtünme faktörünün kanal boyunca belirli x-mesafesindeki kesitlerde hız ve sıcaklık dağılımlarının grafiksel gösterimi verilmiştir. Sayısal analizi gerçekleştirilen akışkanlar ve koşullar için elde edilen sonuçlar literatürde daha önce yer alan çalışmalara ait sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki farklılık ve benzerlikler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla büyük oranda uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Altıgen kesitli kanalda hidrodinamik ve ısı olarak gelişmekte olan akış farklı akışkanlar ve farklı duvar koşulları için incelenmiştir. Farklı Prandtl sayısına sahip akışkanların kanal içindeki akış ve ısı transferi karakteristiklerinin görülmesi amacıyla hava akışkanı ($Pr=0,7$), su akışkanı ($Pr=7,6$) ve etilen glikol akışkanları ($Pr=236$) altıgen kesitli kanalda laminar akış şartlarında incelenmiştir. Reynolds sayısında görülen artış neticesinde Nusselt sayısında da artış görülmüştür. Bununla birlikte incelenen tüm akışkanlar ve koşullar için Darcy sürtünme faktöründe Reynolds sayısının artışı ile birlikte azalma gözlenmiştir. İnceleme neticesinde hidrolik çapı 0,052 m ve kanal uzunluğu 2 m olan düzgün altıgen kesitli kanalda hava ve su akışkanlarının sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı duvar koşullarında ısı ve hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış şartlarına ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte yüksek Prandtl sayısına sahip etilen glikol akışkanının her iki duvar koşulunda ısı olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaşmadığı; hidrodinamik olarak ise tam gelişmiş akış koşullarına ulaştığı görülmüştür. Altıgen kesitli kanalda hava

akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulu ile hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş koşullardaki $f_x Re$ değerinin 65,52; Nusselt sayısı değerinin ise 3,23 olduğu belirlenmiştir. Hava akışkanı için sabit ısı akısı duvar koşulunda ise ısıl olarak gelişmiş koşullardaki Nusselt değeri 3,85; hidrodinamik olarak tam gelişme koşullarına ulaşıldığı durumdaki $f_x Re$ değerinin ise 64,8 olduğu belirlenmiştir.

Benzer şekilde altıgen kesitli kanalda su akışkanının sabit sıcaklık duvar koşulu ile hidrodinamik ısıl olarak tam gelişmiş koşullardaki $f_x Re$ değerinin 58,76; ısıl olarak gelişmiş koşullardaki Nusselt değerinin 3,32 olduğu belirlenmiştir. Sabit ısı akısı duvar koşulunda ise ısıl olarak gelişmiş koşullarda Nusselt değerinin 4,2; hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaşma durumdaki $f_x Re$ değerinin ise 58,56 olduğu belirlenmiştir. Etilen glikol akışkanı için ise sabit sıcaklık duvar koşulu ile hidrodinamik olarak tam gelişmiş koşullardaki $f_x Re$ değerinin 72,8 olduğu görülmüştür. Sabit ısı akısı duvar koşulunda ise etilen glikol akışkanının hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış koşullarına ulaşıldığı durumdaki $f_x Re$ değerinin ise 72,76 olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca tüm akışkanlar ve koşullar için kanal boyunca boyutsuz sıcaklık ve hız dağılımları ile ilgili grafikler de sunulmuştur.

Bu çalışmada hidrodinamik ve ısıl olarak gelişmekte olan düzgün altıgen kesitli kanalda laminar, sıkıştırılamaz akışta sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı yüzey sınır koşulu için üç farklı Prandtl sayısına sahip akışkanın (hava, su, etilen glikol) üç boyutlu olarak sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte çalışmada farklı en/boy oranlarına sahip kanallar ve türbülanslı akış koşulları için sayısal analiz gerçekleştirilmemiştir. Daha sonraki çalışmalarda bu koşulların sayısal analizi veya deneysel olarak incelenmesi ile ilgili çalışmalar yürütülebilir.

KAYNAKLAR

1. Damean, N. , Regtien, P. P. L. , “ Velocity field of the fully developed laminar flow in a hexagonal duct”, *Sensors and Actuators A*, 92:144–151 (2001).
2. Sadasivam, R. , Manglik, M. R. , Jog, A. M. , “ Fully developed forced convection through trapezoidal and hexagonal ducts”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42: 4321–4331 (1999).
3. Nonino, C. , Giudice, D. S. , Savino, S. , “Temperature dependent viscosity effects on laminar forced convection in the entrance region of straight ducts”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 4469- 4481 (2006).
4. Asako, Y. , Nakamura, H. , Chen, Z. , Faghri, M. , “ Three dimensional laminar natural convection in an inclined air slot with hexagonal honeycomb core ”, *Transactions of the ASME*, 113: 906–911 (1991).
5. Öztop, H. F. , Şahin, A. Z. , Dağtekin, İ. , “Entropy generation through hexagonal cross sectional duct for constant wall temperature in laminar flow”, *International Journal of Energy Research*, 28: 725 – 737 (2004).
6. Aparecido, J. B. , Cotta, R. M. , “Laminar flow inside hexagonal ducts”, *Computational Mechanics*, 6: 93- 100 (1990).
7. Damean, N. , Regtien, P. P. L. , “ Poiseuille number for the fully developed laminar flow through ducts etched in < 1 0 0 > silicon”, *Sensors and Actuators A*, 90: 96–101 (2001).
8. Asako, Y. , Nakamura, H. , Chen, Z. , Faghri, M. , “ Developing laminar flow and heat transfer in the entrance region of regular polygonal ducts”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31 (12) : 2590– 2593(1988).
9. Morini, G. L., “Laminar to turbulent flow transition in micro-channels”, *International Centre for Heat and Mass Transfer, Meet-02*, Antalya, Turkey, 16-19 (2002).
10. Muzychka, Y. S. , Yovanovich, M. M. , “Laminar flow friction and heat transfer in non-circular ducts and channels Part I- Hydrodynamic problem”, *Compact Heat Exchangers, A Festschrift on the 60th Birthday of Ramesh K. Shah*, Grenoble, France, 123- 130 (2002).
11. Bahrami, M., Yovanovich, M. M. , Culham, J. R. , “Pressure drop of fully developed laminar flow in microchannels of arbitrary cross section”, *Transactions of the ASME*, 128: 1036–1044 (2006).
12. Morini, L. G., “Viscous heating in liquid flows in micro-channels ”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 3637 – 3647 (2005).

13. Versteeg, H. K. , Malalasekera, W. , “An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method 2nd Edition”, **Prentice Hall**, 9-26 (2007).
14. Anova Gambit Eğitimi, Gambit 2.4 Kullanım Kılavuzu, Ansys Fluent Inc., (Haziran 2008).
15. Anova Fluent Eğitimi, Fluent 6.3 Kullanım Kılavuzu, Ansys Fluent Inc., (Haziran 2008).
16. Incropera, P. F., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine A. S., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th ed.”, **John Wiley & Sons**, New York, 486–533 (2007).
17. Shah, R. K. , London, A. L. , “Advances in Heat Transfer, Laminar Flow Forced Convection in Ducts (A source book for compact heat exchanger analytical data)”, **Academic Pres**, New York, 253–264 (1978).
18. Bayazıtıoğlu, Y., Özışık M. N., “Elements of Heat Transfer”, **Mc-Graw Hill**, New York, 237 (1988)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EROĞUL, Funda
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.11.1985 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : ferogul@roketsan.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği Bölümü	2010
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Bölümü	2007
Lise	Halide Edip YDA Lisesi	2003

Staj Deneyimi

Yıl	Firma
06/2005-07/2005	Durmazlar AŞ. / İmal Usulleri Stajı/Stajyer
06/2006-07/2006	Man Türkiye AŞ. / Fabrika Organizasyonu Stajı/Stajyer
07/2006-08/2006	Gönka Klima / Isı ve İş Makineleri Stajı/Stajyer

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
03/2008-....	Rocketsan A.Ş.	Piroteknik Sistemler Birimi- Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Koç, S., Eroğul, F., Tınaztepe, T., H., “Accelerated Aging Study For MTV Ignition Charges”, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2009-5276 (2009).