

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

**ADYABATİK MİKROKANALLARDA AKIŞIN
FLUENT İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Hasan Esat GÜNEY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mesut GÜR

Eylül 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ADYABATİK MİKROKANALLARDA AKIŞIN
FLUENT İLE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Hasan Esat GÜNEY

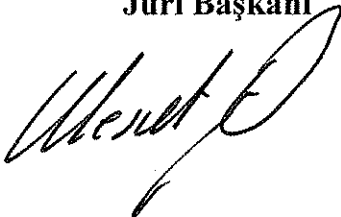
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 06/ 09 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Mesut GÜR

Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Seyhan Uygur
ONBAŞIOĞLU

Üye



Doç.Dr.
Tahsin ENGİN

Üye



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalıőmamda bana danıőmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan, bilimsel fikir ve tecrübelerinden yararlandığım danıőman hocam sayın Prof.Dr.Mesut Gür'e, deneysel tecrübelerinden yararlandığım ve çalıőmalarımda yardımını esirgemeyen sayın Dr.Nezaket Parlak'a, tecrübelerinden yararlandığım ve kullandığım Fluent programında bana teknik destek sağlayan sayın Prof.Dr.Seyhan Uygur Onbaşıoğlu'na (İTÜ, Makine Fakültesi), alıőma süresince manevi desteğini esirgemeyen aileme ve değerli arkadaşım Selvi Vanlıoğlu'na teşekkür ederim.

Hasan Esat Güney

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1.Çalışmanın Hedefi ve Kullanılan Metod.....	2
BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1.Boru İçerisinde Akış.....	3
2.1.1. Silindirik borularda akış.....	3
2.1.2. Tam gelişmiş akışta basınç düşümü ve sürtünme faktörü....	5
2.1.3. Hacimsel debi ve Hagen-Poiseuille denklemi.....	6
2.1.4. Mikro ölçekli borular.....	7
2.1.5.Giriş uzunlukları.....	8
2.1.6. Viskoz ısınma.....	8
2.2. Korunum Denklemleri.....	9
2.2.1. Kütlenin korunumu.....	9
2.2.2.Momentum korunumu.....	10
2.2.3.Enerji korunumu.....	12
BÖLÜM 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	14
3.1. Mikro Kanallarda Akış Analizi İçin Yapılmış Çalışmalar.....	14

BÖLÜM 4. HAD VE HAD İLE ÇALIŞAN PROGRAMLAR	18
4.1. Nümerik ve Sayısal Analiz.....	18
4.2. HAD'nin Tanımı.....	19
4.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi.....	19
4.2.2. Sonlu hacimler yöntemi.....	21
4.3. HAD' nin Çalışması	22
4.3.1. HAD analizlerinin temel Basamakları.....	22
4.3.2. Modelleme hedefinin belirlenmesi.....	23
4.3.3. Gridi çizmek ve oluşturmak	23
4.3.4. Sayısal modeli kurmak.....	23
4.3.5. Çözümün yapılması	24
4.3.6. Sonuç ve değerlendirme	24
4.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Çalışan Bilgisayar Programları.....	24
4.4.1. Gambit.....	24
4.4.1.1. Gambit mesh elemanları.....	25
4.4.1.2. Gambit mesh atma çeşitleri.....	25
4.4.2. Fluent.....	25
4.4.2.1. Fluent' in teknik özellikleri.....	26
4.4.2.2. Fluent programının çalışma prensibi.....	27
4.4.2.3. Modelin tanımlanması ve fluent programında çözümü.....	29
 BÖLÜM 5. MİKROBORUDA AKIŞIN SAYISAL MODELLENMESİ.....	30
5.1. Gambit Programında Modellenme	30
5.1.1. Gambit programının açılması ve çözücü seçimi.....	30
5.1.2. Boru çizimi.....	30
5.1.3. Gambitte mesh geometrisinin oluşturulması.....	31
5.1.4. Gambitte sınır şartlarının belirlenmesi.....	31
5.1.5. Gambitte oluşturulan modelin kaydedilmesi.....	32
5.2. Fluent Programında Çözdürülecek Modelin Tanımlanması.....	33
5.2.1. Fluent programı çalıştırılması.....	33
5.2.2. Mesh yapısının okunması ve raporlanması.....	33

5.2.3. Mesh yapısının kontrol edilmesi.....	34
5.2.4. Akışkanın kesit boyutlarının tanımlanması.....	34
5.2.5. Mesh yapısının gösterilmesi.....	34
5.2.6. Çözücü özelliklerinin tanımlanması	34
5.2.7. Enerji denklemi çözümünün tanımlanması.....	35
5.2.8. Akış şeklinin tanımlanması.....	36
5.2.9. Akışkan özelliklerinin tanımlanması.....	36
5.2.10. Sınır şartlarının belirlenmesi.....	36
5.2.11 Başlangıç değerlerinin tanımlanması.....	37
5.2.12 İterasyon parametrelerinin belirlenmesi.....	37
5.2.13. Çözümün iterasyonla yakınsaması.....	37
5.3. Oluşturulan Modelin Özellikleri.....	38
BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI İLE HAD SONUÇLARININ	
KARŞILAŞTIRILMASI.....	40
6.1. Basınç Düşüşü Değerlerinin Karşılaştırması	40
6.2. Sıcaklık Artışı Değerlerinin Karşılaştırması	43
6.3. Sıcaklık Artışı ve Basınç Düşüşü İçin Vektör ve Kontür	
Grafikleri	47
6.3.1. 50 µm çapındaki mikrobörü için grafikler.....	48
6.3.2. 76 µm çapındaki mikrobörü için grafikler	50
6.3.3. 101 µm çapındaki mikrobörü için grafikler.....	53
BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: İvme ($m \cdot s^{-2}$)
c_p	: Özgül ısı ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
D	: İç çap (m)
E	: Enerji ($kJ \cdot s^{-1}$)
Ec	: Eckert sayısı
F	: Kuvvet (N)
f	: Darcy sürtünme faktörü
f_v	: Viskoz ısınma nedeniyle oluşan sürtünme faktörü
g	: Yerçekimi ivmesi ($m \cdot s^{-2}$)
h	: Isı taşınım katsayısı ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
h	: Entalpi ($kJ \cdot kg^{-1}$)
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
k	: Isı iletim katsayısı ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
\dot{m}	: Kütle debi (kg/s)
P	: Basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds sayısı
r	: Yarıçap (m)
t	: Zaman (s)
T	: Sıcaklık (K)
ΔT_{ref}	: Referans sıcaklığı (K)
ΔT_v	: Viskoz ısınmadan kaynaklanan sıcaklık artışı (K)
U	: Akışkanın ortalama hızı ($m \cdot s^{-1}$)
u	: Akışkanın hızı ($m \cdot s^{-1}$)
u_{ort}	: Akışkanın ortalama hızı ($m \cdot s^{-1}$)
V	: Hız vektörü

Yunan

sembolleri

ρ	: Yoğunluk (kg. m-3)
σ_{ij}	: Yüzey gerilme tensörü
μ	: Dinamik viskozite (N.s.m-2)
θ	: Açısal koordinat (m)
Q	: Hacimsel debi (m ³ .s-1)
ϕ	: Viskoz fonksiyon

Alt indisler

ref	: Referans
kr	: Kritik
KH	: Kontrol hacmi
eff	: Efektif
x,y,z	: Kartezyen koordinatlar (m)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1.	HAD modellemenin özet şeması.....	22
Şekil 5.1.	Gambitte boru modelleme.....	31
Şekil 5.2.	Gambitte sınır şartlarının belirlenmesi.....	32
Şekil 5.3.	Fluent programında mesh yapısının okunması.....	33
Şekil 5.4.	Fluent programında çözümünün tanımlanması.....	35
Şekil 5.5.	Fluent programında Enerji Denkleminin İşaretlenmesi.....	35
Şekil 5.6.	Akış şeklinin tanımlanması.....	36
Şekil 5.7.	İterasyon parametrelerinin belirlenmesi.....	37
Şekil 6.1.	50 µm mikroborda basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi.....	40
Şekil 6.2.	76 µm mikroborda basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi.....	41
Şekil 6.3.	101 µm mikroborda basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi....	41
Şekil 6.4.	50 µm, 76 µm ve 101 µm mikrobolarda Fluent programı ile elde edilen basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi.....	42
Şekil 6.5.	50 µm , 76 µm ve 101 µm mikroborda Fluent programı ve Hagen-Poiseuille denklemi ile elde edilen basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi.....	43
Şekil 6.6.	50 µm mikroborda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi.....	44
Şekil 6.7.	76 µm mikroborda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi.....	44
Şekil 6.8.	101 µm mikroborda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi.....	45
Şekil 6.9.	50 µm, 76 µm ve 101 µm mikroborda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi.....	46
Şekil 6.10.	50 µm , 76 µm ve 101 µm mikroborda Fluent programı ve Morini denklemi ile elde edilen sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi.....	47

Şekil 6.11.	50 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi.....	48
Şekil 6.12.	50 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı.....	49
Şekil 6.13.	Şekil 6.13. 50 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 6.14.	Şekil 6.14. 76 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi.....	51
Şekil 6.15.	Şekil 6.15. 76 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı.....	52
Şekil 6.16.	Şekil 6.16. 76 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı.....	53
Şekil 6.17.	Şekil 6.17. 101 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi.....	54
Şekil 6.18.	Şekil 6.18. 101 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı.....	55
Şekil 6.19.	Şekil 6.19. 101 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı.....	56

ÖZET

Anahtar kelimeler: Fluent, Mikrokanal, Viskoz ısınma, Basınç düşümü, HAD

1980' li yılların başlarından itibaren mikrocihazlar ve mikro ölçekli malzemeler uzay, haberleşme, bilgisayar, elektronik, biyoteknoloji ve endüstri alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanlarda önemli derecede araştırma ve çalışma gereksinimini ortaya çıkmıştır. Bu noktada, mikro cihazların araştırılması konusunda önemli kriterlerden biri ise akışkan akışının ve ısı geçişinin incelenmesidir. Bu alanda deneysel ve nümerik bir çok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi için kullanılan Fluent programı ile adyabatik mikrokanallarda akışın karakteristiği incelenmiş olup deneysel sonuçlar ve mevcut bağıntılar ile karşılaştırılmıştır.

MODELLING OF FLUID FLOW WITH FLUENT IN ADIABATIC MICROCHANNELS

SUMMARY

Key Words: Fluent, Microchannel, Viscous heating, Pressure drop, CFD

Since the beginning of 1980's micro devices and micro scaled materials have been widely used in aero space, communication, computer science, electronics, biotechnology and such industrial areas. The latest developments in these fields have caused serious demand for research in micro devices. At this point, one of the major criterion in micro devices is the examine of fluid flow and heat transfer. Many experimental and numerical studies have been done in this range, fluid flow and heat transfer.

In this study, with the help of Fluent Computer Program (using for computational fluid dynamics), characteristics of flow in adiabatic micro channels have been analysed and experimental outcomes have compared to existing correlations.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte makro boyutlarda yapılan çalışmalar kadar mikro boyutlarda da bir çok çalışma yapılmaktadır. Özellikle son yıllarda mikro ölçekteki kanallarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı klasik bağıntılar ile benzerlik gösterse de bu bağıntılardan farklı çıkan bir çok çalışma da mevcuttur. Bu durum göstermektedir ki bu alanda her ne kadar çalışma yapılmış olsa da henüz yeterli değildir çünkü ortak çözümler ve sonuçlar ortaya çıkmamıştır.

Günümüzde boyutları 1 μm ile 1 mm arasında değişen mikro ölçekli cihazlar kullanılmaktadır ve ileriki yıllarda sayılarının ve kullanım alanlarının artması muhtemel bir gerçektir. Bilişim, çevre, otomotiv, proses kontrolü, metroloji, savunma, havacılık, uzay, ecza, kimya, tıp ve biyoloji gibi çok çeşitli ve çok yaygın bir kullanım alanı bulunan bu mikro ölçekli cihazlar konunun önemini ve araştırma yapılmaya ne kadar ihtiyaç duyulduğunu çok açık bir şekilde göstermektedir. Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler içerisinde dolaşan akışkanı mikrokanallar vasıtasıyla iletmektedirler. Bu kanallardaki ısı, akış karakteristiği, basınç ve diğer bir çok özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı son yıllarda bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmüş ve yürütülmeye devam edecektir.

Bu çalışma, bütün bu sebeplerden dolayı henüz gelişmekte olan ve aydınlanmaya ihtiyaç duyulan bu alana katkı sağlaması açısından yapılmıştır.

Sunulan bu çalışma, laminer akış bölgesi için akışkan olarak suyun kullanıldığı farklı çaplardaki adyabatik pürüzsüz ergimiş silika mikroborularda deneysel olarak Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü doktora tezi [1] çalışması içerisinde Nezaket Parlak tarafından elde edilmiş sonuçların ve sayısal bağıntıların, bir HAD çözücüsü olan Fluent programı ile modellenmesi ve çözümlenmesi ile elde

edilen sonuçlarla karşılaştırılmasını, yorumlanmasını içermektedir. Bu sayısal, deneysel ve Fluent çözümlerinin karşılaştırılmalı incelenmesindeki amaç makro ölçekteki bağıntıların mikro ölçekte de kullanılabilirliğinin ve mikro ölçekteki analizlerde HAD çözümlerinin uyumluluğunun belirlenmesidir.

1.1. Çalışmanın Hedefi ve Kullanılan Metod

Güngeçtikçe mikro ölçekli malzemelerin kullanımında artış görülmekte ve bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Teknolojinin de bu yöndeki mikro ölçeklere eğilim göstermesi sonucunda önemli bir konu olmaya başlamıştır. Mikro borularda akış özellikleri de bu açıdan bilinmesi çok önemli parametreler arasındadır. Bu çalışmada mikro ölçekteki borularda basınç düşüşü ve viskoz ısınma konularının aydınlatılmasına yönelik olarak bilgisayar destekli HAD yöntemlerinden biri olan FLUENT adlı paket bir program ile modelleme ve çözümlene yapılmıştır. Bu program, sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Daha önce yapılmış olan deneysel sonuçlarla ve sayısal bağlantılarla, Fluent sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Boru İçerisinde Akış

Dairesel kesitli borulardaki iç akış için akış tipini belirleyen Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{\rho \cdot u_{\text{ort}} \cdot D}{\mu} \quad (2.1)$$

Şeklinde tanımlanır. Reynolds sayısı, akışkana etkiyen atalet kuvvetlerinin viskoz etkilere oranı olarak tanımlanır. Akışın türbülanslı olmaya başladığı Reynolds sayısına kritik Reynolds sayısı denir. Farklı geometriler ve akış şartları için kritik Reynolds sayısı değeri farklıdır. Dairesel borulardaki iç akış için kritik Reynolds sayısının genelde kabul edilen değeri $Re_{kr} = 2300$ 'dür [2].

Laminer akışta sürtünme faktörü yüzey pürüzlülüğünden bağımsız ve sadece Re sayısına bağlıdır.

2.1.1. Silindirik borularda akış

Newton tipi, sıkıştırılmaz ve simetrik ($u_r = 0$) olduğu, akışta dönme olmadığı ($u_\theta = 0$), yerçekimi etkisinin ihmal edildiği ve sabit basınç dağılımının söz konusu olduğu x- doğrultusunda sonsuz uzunluktaki silindirik kanalda; süreklilik denklemi;

$$\left(\frac{1}{r} + \frac{\partial r u_r}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial r u_x}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.2)$$

şeklindedir.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$u = u(r) \quad (2.4)$$

olduğu bu durumda x , θ ve r momentum denklemleri aşağıdaki şekilde;

x -momentum;

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) \quad (2.5)$$

r - momentum;

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (2.6)$$

$$P = P(x) \quad (2.7)$$

elde edilir ve basıncın sadece x 'e bağlı olduğu bulunur. θ momentum denkleminde de aynı şekilde 0 elde edilir. Böylece silindirik kanalda akış hızı x momentumun integralinden;

$$r \frac{du}{dr} = \frac{r^2}{2\mu} \frac{dP}{dx} + C_1 \quad (2.8)$$

Olur. Burada C_1 integral sabitidir. Denklemin her iki yanını r 'ye bölünüp tekrar integral alınır;

$$u = \frac{r^2}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + C_1 \ln r + C_2 \quad (2.9)$$

bulunur. C_2 ikinci integral sabitidir. Aşağıdaki sınır şartları uygulanırsa;

$$r = 0 \text{ için } \frac{du}{dr} = 0 \text{ ve } 0 = 0 + C_1, C_1 = 0 \text{ olur.}$$

$$r = R \text{ için } u = \frac{R^2}{4\mu} \frac{dP}{dx} + 0 + C_2 = 0, C_2 = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{dP}{dx} \text{ olur.}$$

Eksenel hız;

$$u = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} (r^2 - R^2) \quad (2.10)$$

olur. $r=0$ 'da yani merkezde hız maksimum ve $U = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{dP}{dx}$ olur ve;

$$\frac{u}{U} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2.11)$$

elde edilir [2].

2.1.2. Tam gelişmiş akışta basınç düşümü ve sürtünme faktörü

Boru içerisinde akışın devamlılığı için basınç farkı gerekir. Öte yandan viskoziteden dolayı oluşan gerilmeler akışa karşı bir direnç göstermektedir. Akış tam gelişmiş hale gelince viskoz kuvvetler, atalet kuvvetleri ve basınç arasında bir denge durumu oluşur.

Tam gelişmiş bir akış bölgesi düşünülürse basınç düşümü yani $\frac{dP}{dx}$ sabittir. Yatay boruda basınç düşüşü sıfır olmadığından basınç kuvvetinin viskoz etkileri yenmesi gereklidir.

Laminer akış için,

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu L u_{ort}}{R^2} = \frac{32\mu L u_{ort}}{D^2} \quad (2.12)$$

şeklindedir.

Kuvvetlerden kaynaklanan basınç düşüşü tersinmez bir basınç kaybını temsil eder ve bunun bir kayıp olduğunu vurgulamak için basınç kaybı ΔP olarak adlandırılırsa, tam gelişmiş iç akışların tüm türleri için basınç kaybı,

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_{ort}^2}{2} \quad (2.13)$$

biçiminde ifade edilir.

Bu bağıntıda f Darcy sürtünme faktörüdür. Denklem (2.12) ve (2.13) birbirine eşitlenirse dairesel boruda laminer akış için sadece Reynolds sayısına bağlı sürtünme faktörü şu şekilde ifade edilebilir,

$$f = \frac{64\mu}{\rho D u_{ort}} = \frac{64}{Re} \quad (2.14)$$

olur [2].

2.1.3. Hacimsel debi ve Hagen-Poiseuille denklemi

Silindirik bir boruda laminer akış için hacimsel debi şu şekilde ifade edilir;

$$Q = \frac{\pi D^4}{128\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.15)$$

Silindirik boruda basınç düşüşünü ifade eden denklem G. Hagen (1797-1884) ve J. Poiseuille (1799-1869) çalışmaları sonucu Hagen-Poiseuille denklemi olarak bilinir ve şu şekilde;

$$\Delta P = \frac{128\mu LQ}{\pi D^4} \quad (2.16)$$

ifade edilmiştir.

2.1.4. Mikro ölçekli borular

Mikro kanallarda literatürde geçiş bölgesi başlangıç Reynolds değeri yani kritik Reynolds sayısı için birçok deney yapılmıştır.

Sharp and Adrian yaptıkları deneylerde iç çapları 50 – 247 µm arasında değişen kanallarda Re sayısının 400 – 2900 arasındaki değerlerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda geçiş bölgesinin Re = 1800 – 2300 değerleri arasında olduğunu belirlemişlerdir [3].

Pfund et al. paralel plakalar arasından akan su için basınç kaybı ve sürtünme çarpanı deneyleri yapmışlardır. 521 µm derinlikteki kanal için sürtünme çarpanı, Re sayısı ile azalmış ve laminer akış için bulunan değer klasik bağıntılarla uyumluluk göstermiştir. Bu deneyler için geçiş bölgesinin Re = 2200 civarında başladığı belirlenmiştir [4].

Liu and Garimella, pleksi-glas üretimi 244– 974 µm arasında değişen hidrolik çaptaki dikdörtgen kesitli mikro kanallarla yaptıkları deneyde geçişin Re = 2000'de olduğunu belirlemişlerdir [5].

Sıvı ve gaz akışkanların mikro ölçekte akış ve ısı geçişi özelliklerinin karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda elde edilen deneysel sonuçlar Navier-Stokes denklemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında önemli bir sapma olduğu görülmüştür.

2.1.5. Giriş uzunlukları

Hidrodinamik giriş uzunluğu, çoğunlukla çeper kayma gerilmesinin (ve dolayısıyla sürtünme faktörünün) tam gelişmiş haldeki kayma gerilmesi değerine yüzde 2

dolaylarında yaklaştığı uzaklık olarak alınır. Laminer akışta hidrodinamik giriş uzunluğu yaklaşık olarak,

$$L_{h,laminer} \cong 0.05 Re \quad (2.17)$$

ile verilir.

Re=20 için bu değer çap kadar iken Re=2300 için yaklaşık çapın 120 katı kadar bir uzunluktur.

Türbülanslı akışta ise hidrodinamik giriş uzunluğu

$$L_{h,türbülans} \cong 1.359 D Re^{\frac{1}{4}} \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilmiştir [2].

2.1.6. Viskoz ısınma

Boru içi akışlarda basınç düşüşü iç çap ile ters orantılı olup, çap küçüldükçe basınç düşüşü artmakta ve kanal içindeki akışkanın hızı oldukça yükselmektedir. Akış esnasından viskoz etkiler sebebiyle viskoz ısınma gerçekleşmektedir. Meydana gelen bu ısınma, mikro boyutlu kanallarda makro boyuttakilere göre daha yüksek olmakta ve akışkan sıcaklığı daha çok artmaktadır. Viskoz ısınmadan kaynaklanan sıcaklık artışı, akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır bu sebeple de önem arz etmektedir.

Adyabatik koşullarda bir mikrokanal akışındaki viskoz ısınmayı belirlemek amacıyla Morini (2005) ve Xu (2003) boyut analizi yardımıyla yaptıkları çalışma sonucunda aşağıda verilen bağıntıları geliştirmişlerdir.

$$\Delta T_v = \frac{Ec}{Re} [f Re L] \frac{\Delta T_{ref}}{D} \quad (2.19)$$

Burada, ΔT_{ref} referans sıcaklık farkını ifade eder ve su için 1 K alınması önerilmiştir. Adyabatik koşullarda viskoz ısınma nedeniyle oluşan sıcaklık artışını kullanarak sürtünme faktörü aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir. [6]

$$f_v = \frac{\Delta T}{\Delta T_{ref}} \frac{D}{EcL} \quad (2.20)$$

Sürtünme faktörünün sıcaklık artışı ve çap ile doğru orantılı, Ec sayısı ve boru boyu ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

Viskoz ısınmanın büyüklüğünü ifade eden Eckert sayısıdır. Eckert sayısı dinamik sıcaklığın toplam sıcaklık artışına oranı olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Ec = \frac{U^2}{c_p \Delta T} \quad (2.21)$$

2.2. Korunum Denklemleri

2.2.1. Kütlelerin korunumu

Kütlelerin korunumu ilkesi bir Δt zaman aralığında sistemin toplam kütledeki değişim, sistem sınırlarından giren kütle ile sistemden çıkan kütlelerin farkına eşit olmasıdır. Kütlelerin korunumu şu şekilde formülize edilir; [2]

$$\frac{\partial m_{KH}}{\partial t} = \sum_{giren} \dot{m} - \sum_{çıkan} \dot{m} \quad (2.22)$$

Kartezyen koordinatlarda 3 boyutlu bir kontrol hacmi için;

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} \right) = \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} \quad (2.23)$$

şeklinde yazılır. Burada D/Dt maddesel türevi, u ise hız vektörüdür. Silindirik koordinatlar için üç boyutta (r,θ,z) süreklilik denklemi;

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial r u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_x}{\partial x}\right) = 0 \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir.

2.2.2. Momentum korunumu

Newton'un yasaları, cisimlerin hareketleri ile bunlara etkiyen kuvvetler arasındaki bağıntılardır. Newton'un birinci yasası, durmakta olan bir cismin hareketsiz kalacağını, hareket halindeki bir cismin üzerine etkiyen net bir kuvvet yoksa onun düz bir yörünge üzerinde aynı hızla hareketine devam edeceğini ifade eder. Dolayısıyla bir cismin eylemsizlik durumunu sürdürme eğilimindedir. Newton'un ikinci yasası, bir cisim ivmesinin, cisme etkiyen net kuvvet ile doğru orantılı ve cismin kütlesi ile ters orantılı olduğunu belirtir. Newton'un üçüncü yasası ise, bir cisim ikinci bir cisme kuvvet uyguladığında, ikinci cismin de birinci cisme eşit ve ters yönde bir kuvvet uygulayacağını ifade eder. Bu nedenle, oluşan tepki kuvvetinin yönü sistem olarak seçilen cisme bağlıdır. Kütlesi m olan bir cisim için Newton'un ikinci yasası aşağıdaki gibidir;

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = \frac{d(m\vec{V})}{dt} \quad (2.25)$$

Momentum, (mV) kütle ile hızın çarpımına eşittir. Kuvvet ve momentum vektörel olduğundan, net kuvvet cisim üzerine etki eden tüm kuvvetlerin vektörel toplamı ile bulunur.

Kontrol hacmine etkiyen kuvvetler; kontrol hacminin tümüne etkiyen kütle kuvvetleri(yerçekimi, elektrik ve manyetik alan kuvvetleri gibi) ve kontrol yüzeyine etkiyen yüzey kuvvetleridir (basınç kuvvetleri, viskoz kuvvetler ve temas noktalarındaki kuvvetleri gibi). Kontrol hacmi analizinde belirli bir anda kontrol

hacmine etkiyen tüm kuvvetlerin toplamı $\sum \vec{F}$ ile gösterilir ve şu şekilde ifade edilir [2];

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_{k\u00fctle} + \sum \vec{F}_{y\u00fczey} \quad (2.26)$$

Sırasıyla silindirik koordinatlarda (r,θ,x) bileşenleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} \right) \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r \\ + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + u_x \frac{\partial u_\theta}{\partial x} \right) \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_\theta \\ + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_x}{\partial \theta} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (2.29)$$

şeklinde yazılır.

2.2.3. Enerji korunumu

Enerji kapalı bir sistem sınırından ısı veya iş olarak geçebilir ve enerjinin korunumu ilkesi gereği bir proses esnasında sisteme giren veya çıkan net enerji, sistemin enerji miktarındaki değişime eşittir. Kontrol hacimlerinde kütleli debi yoluyla da enerji geçişi görülür ve enerji dengesi olarak da adlandırılan enerji korunumu ilkesi şu şekilde ifade edilir [2];

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} + \dot{E}_{üretim} = \frac{dE_{KH}}{dt} \quad (2.30)$$

Daha ayrıntılı biçimde; kontrol hacmi içerisinde birim zamandaki iç enerji değişimi (1) ; giren, çıkan akışkan akışı ile transfer edilen net enerji (2), iletimle taşınan net ısı geçişi (3), birim zamanda üretilen ısı üretimi (4) ile kontrol hacminden çevreye yapılan net iş 'in (5) toplamına eşit olmalıdır. Buna göre enerjinin korunumu denklemi 2.30 ;

[[kontrol hacmi içerisinde birim zamandaki iç enerji değişimi]]

+ [[giren, çıkan akışkan akışı ile transfer edilen net enerji]]

= [[iletimle taşınan net ısı geçişi]]

+ [[birim zamanda üretilen ısı üretimi]]

+ [[kontrol hacminden çevreye yapılan net iş]]

$$\left[\left[\rho \frac{De}{Dt} \right] + \left[e \left(\frac{De}{Dt} + \rho \nabla \cdot u \right) \right] \right] = \left[-\nabla \cdot q'' \right] + \left[q''' \right] - \left[P \nabla \cdot \vec{V} - \mu \Phi \right] \quad (2.31)$$

halini alır [7] . Denklem 2.31'den de görüldüğü gibi (5) no' lu iş terimidir. Burada Φ viskoz ısınmayı temsil eden fonksiyondur. Entalpi'nin tanımı $h = e + \left(\frac{1}{\rho}\right)P$ ve Fourier ısı iletimi kanunu $q'' = -k\nabla T$, yardımıyla denklem 2.31 sıkıştırılmaz bir akış için ise;

$$\rho c \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' + \mu \Phi \quad (2.32)$$

halini alır. Denklemi iki boyutlu (r,x) kararlı ısı üretiminin bulunmadığı Newton tipi sıkıştırılmaz bir akış için sabit fiziksel özellikler kabulüyle silindirik koordinatlarda şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(u_r \frac{\partial T_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T_\theta}{\partial \theta} + u_x \frac{\partial T_x}{\partial x} \right) \\ = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} \right) + \mu \Phi \end{aligned} \quad (2.33)$$

elde edilir. Burada, Φ viskoz ısınma ile oluşan kaybın fonksiyonudur, bu fonksiyon şu şekilde ifade edilir;

$$\begin{aligned} \Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right)^2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial r} \right)^2 - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \vec{V})^2 \right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

BÖLÜM 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Mikro Kanallarda Akış Analizi İçin Yapılmış Çalışmalar

Hidrolik çapları 3 mm'den daha büyük kanallar makro kanallar, 3 mm - 200 µm arasındakiler mini kanallar ve 1 µm ila 200 µm arasında olanlar mikro kanallar olarak sınıflandırılmaktadırlar [8].

Mikrokanallarda ilk deneysel çalışmalardan biri Wu ve Little tarafından gaz akışı için yapılmıştır [9].

Morini vd. tarafından iç çapları 127, 254, 508 ve 762 µm olan borularda azot gazının akışını incelenmiştir. Geleneksel bağıntıları kullanıp giriş ve çıkış basınç kayıplarını hesaplayarak, farklı uzunlukta borular kullanıp yan kayıplar basınç farkını hesaplayıp elimine ederek üç farklı yöntemle sürtünme faktörünü hesaplayıp karşılaştırmışlardır [10].

Sharp ve Adrian, çapları 50-247 µm arasında değişen cam mikro borularda, iyon giderilmiş su, 1-propanol ve %20 gliserin çözeltilerinin akışkan olarak kullanıldığı deneysel çalışmada, laminerden türbülanslı akışa geçişi incelemişlerdir. Kritik Reynolds sayısının 1800-2300 arasında olduğu, C sabitinin ise makro kanallardaki değer olan 64 ile örtüştüğünü ve mikro kanallardaki akışın makro kanallardakinden farklı olmadığını belirtmişlerdir [11].

Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş kritik Reynolds sayısı için araştırmacılar tarafından farklı değerler verilmektedir. Su akışı için Rands vd. 2100-2500, Baviere vd. yükseklikleri 200 -700 µm olan kanallarda su akışı için farklı yüzey pürüzlülüğünde 3400-4500 değerlerini vermişlerdir [12][13].

Mala ve Li çapları 50-254 μm arasında değişen borular içerisinde akışkanın su olduğu durumda, sürtünme karakteristiklerini incelemiştirlerdir. Borular paslanmaz çelik ve erimiş silisten yapılmıştır. Aynı akış hızı aynı boru çapında, erimiş silikadan yapılmış (FS) boru için paslanmaz çelikten yapılmış (SS) borudan daha büyük sürtünme faktörü elde edilmiştir. Diğer taraftan, laminar bölge için $f Re$ nin sabit olmadığı ve Reynolds sayısına bağlı olarak arttığı belirtilmektedir. Ayrıca $f Re$ değerleri tüm denemeler için teorik değerden büyük elde edilmiştir. Laminerden türbülanslı akışa geçiş için, kritik Reynolds sayısı boru malzemesine bağlı olarak 300-900 aralığında verilmektedir [14].

Harms vd. farklı derinliklerdeki dikdörtgen kanal ve su(iyon giderilmiş) akışı için kritik Reynolds sayısını 1500 olarak ölçmüştür [15].

Xu vd. hidrolik çapı 30-344 μm arasında değişen, 20-4000 Reynolds sayısı aralığında dikdörtgen bir mikro kanalda basınç düşüşünü incelemiştirlerdir. Çalışma akışkanı olarak iyon giderilmiş su kullanılmıştır. Kanal yapımında mekanik işleme ve silikon waferin kimyasal çözündürülmesi şeklinde iki farklı yapım yöntemi kullanılmıştır. Mekanik işleme ile elde edilen 50-300 μm kanal için $f Re$ değerleri, 100 μm için elde edilen değerlerden ve teorik değerden küçük olduğu belirlenmiş, ancak silikondan elde edilen 0-60 μm boyutundaki kanal sonuçlarının teorik sonuçlar ile uyduğu bulunmuştur. Dolayısıyla sürtünme faktöründe meydana gelen farklılıkların kanal yapım tekniğine bağlı olarak, boyutlardaki belirsizlikten kaynaklanabileceği söylenebilir denilmiştir. Türbülanslı akışa geçiş için kritik Reynolds sayısı 1500 olarak belirtilmektedir [16].

Li ZX vd. 79.9–166.3 μm , 100.25–205.3 μm , and 128.76–179.8 μm çaplarında cam, silikon ve paslanmaz çelik borularda sürtünme faktörünü deiyonize su için deneysel olarak incelemiştirlerdir. Cam ve silikon kanallar için $f.Re$ değerini 64 olarak elde etmelerine rağmen paslanmaz çelik için bu değer %15-%37 arasında büyük elde etmişlerdir [17].

Viskoz disipasyon etkisi çapı 100 μm den küçük kanallardaki sıvı akışı için önemli bir etken olarak kendini göstermektedir. Klasik teoride Adyabatik mikrokanallarda

sıcaklığın Eckert Reynolds ve Poiseuille sayıları ile arttığı belirtilmiştir. Akışkanın termofiziksel özellikleri ve mikro kanalın kesit geometrisi üzerindeki rolü analiz edilmiştir. Viskoz ısınmaya bağlı olarak artış gösteren akışkan vizkozitesi Reynolds sayısının artışıyla birlikte sürtünme faktöründeki düşüşü açıkladığı araştırmacılar tarafından gözlenmiştir [6].

Laminer den türbülansa geçiş akışı için dairesel olmayan kanallarda çok farklı Reynolds sayısı değerlerine rastlanmaktadır. Bu da klasik teoriden sapma göstermektedir. Literatürdeki deneysel çalışmalara göre mikro kanallarda kritik Reynolds sayısı geometriden, kesitten ve bağlı pürüzlülüğünden etkilenmektedir. Morini çalışmasında deneysel ve klasik teoriyi karşılaştırmış ve 40 μm 'den büyük kanallarda laminerden türbülansa geçiş için uyumluluk bulunduğunu göstermiştir [18].

Mala v.d. çalışmalarında su için silindirik paslanmaz çelik ve erimiş silika mikro kanalda çalışmalar yapılmıştır. Kanal çapları 50 ile 254 μm arasında seçilmiştir. Mikro kanalda sabit akış debisinde basınç değişimi klasik teoriden yüksek elde edilmiştir. Düşük debilerde ve Reynolds sayılarında teori ve deneysel sonuçlar arasında uyum sağlanmıştır. Çap küçüldükçe teorik ve deneysel sonuçlar birbirinden uzaklaşmaktadır. Ayrıca akış davranışları kanalın malzemesine bağlı olarak değişmektedir. Sürtünme faktörü teoriye göre yüksek elde edilmiştir [14].

Celeta v.d. çalışmada yüzey pürüzlülüğünün adyabatik mikrokanal için etkisi incelemiştir. 70 ile 326 μm çapları arasında değişen mikrokanallarda çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca 30 μm nin altındaki pürüzsüz kanallar için suyun hidrodinamik davranışları araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda sürtünme faktörü için Hagen-Poiseuille yasası $Re > 300$ için uygun bulunmuştur. Bütün deneysel çalışmalar göz önüne alındığında geçiş Reynold sayısı yaklaşık olarak Re sayısı 2000 ve 3000 arasında elde edilmiştir [19].

Shen vd. çalışmalarında 26 adet çapları 300-800 μm dikdörtgen kesitli mikrokanalda çalışmalar yapılmıştır. Pürüzlülük %4-6 arasında değişmektedir. Bu çalışmalar deiyonize su kullanılarak yapılmıştır. Reynolds sayıları ise 132-1257 arasında değişmektedir. Ayrıca giriş akışkan sıcaklıkları 30, 50 ve 70C seçilmiştir. Sürtünme

faktörü ve ortalama Nusselt sayıları klasik teoriden sapma göstermiştir, bu da yüzey pürüzlülüğüne atfedilmektedir [20].

Bu çalışmada deneysel ve nümerik çalışmalar ile laminer akışın karakteristiği incelenmiştir. Pürüzsüz erimiş silika ve pürüzlü paslanmaz çelik mikro kanallarda yapılan çalışmalar 50-100 µm ve 373-1570 µm çapları arasında gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelik kanallarda yüzey pürüzlülüğü % 2.4, %1.4, %0,95 olarak alınmıştır. Deneysel sonuçlarda deiyonize su için Reynolds sayısı 20-2400 arasında olmuştur. Sürtünme faktörü için deneysel çalışmaların sonuçları ile teori uyumluluk göstermiştir ve yüzey pürüzlülüğü arttıkça artış gözlenmiştir. Ayrıca su için yapılan çalışmalarda eğer yüzey pürüzlülüğü %1.5 in altında olursa deneysel ve teorik çalışmalar birbiriyle uyumlu olmaktadır [21].

Daha önce yapılan çalışmalar da gösteriyor ki mikro kanallarda akış ve ısı transferi henüz tam anlamıyla netlik kazanmamış durumdadır. Literatürde az sayıda deneysel ve teorik çalışmalar bulunmaktadır. Viskoz disipasyon etkisi yüksek hızlı mikro akışlarda ihmal edilemeyecek derecede önemli bir duruma gelmektedir. Fakat ne yazık ki bunu tam olarak açıklayabilecek ve doğrulayabilecek kanıt ve analizler henüz sunulamamıştır. Bu çalışmada da mikro kanallarda viskoz disipasyon etkisi teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada viskoz sayısı olarak adlandırılan V_i kısa gösterimi viskoz disipasyon enerjisinin akış enerjisi artışı ile yakın olduğundan bahsedilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuç ile viskoz disipasyon etkisinin hangi aralıkta önemli bir etki olmaya başladığını göstermektedir;

$$V_i Pr^{-0.1} \leq 0.056 \text{ (viskoz disipasyon etkisi yok)}$$

$$V_i Pr^{-0.1} \geq 0.056 \text{ (viskoz disipasyon etkisi önemli) [22]}$$

Celeta v.d. çalışmalarında çapları 70 µm ile 326 µm arasında değişen dairesel ve adyabatik mikro kanallarda akışı incelemiştirlerdir. Bütün çaplar için $Re > 300$ durumunda Hagen-Poiseuille yasasına uygun sonuçlar elde etmişlerdir. Geçiş bölgesi Reynolds sayısı için ise 2000-3000 arasında değerler bulmuşlardır [23].

BÖLÜM 4. HAD VE HAD İLE ÇALIŞAN PROGRAMLAR

4.1. Nümerik ve Sayısal Analiz

Sayısal çözüm yöntemleri, ileri düzeyde matematiksel problemleri bilgisayar üzerinde çözmek için kullanılan bir yoldur. Bu sayısal teknikler, mühendislerin karşılaştıkları mesleklerine özgü problemlerini çözmek için sık sık başvurdukları bir alan haline gelmiştir. Bu yöntemlerin en büyük avantajı analitik çözümü olmayan problemlerin bile sonuçlarının bu yöntemlerle elde edilebilmesidir. Analitik metotlar genellikle matematiksel fonksiyonlar şeklinde çözümler üretirler. Sonra bu genel çözümler bazı belirli veriler için sayısal sonuçlar şekline dönüştürülürler. Nümerik çözümlerde sonuçlar daima sayısaldir. Sayısal çözümlerin bir önemli farkı da yaklaşık çözüm üretmeleridir. Ancak bu yaklaşık çözümler istenildiği ölçüde hassas elde edilebilmektedir. Hassasiyet artırıldıkça işlem adımları artmakta fakat artan işlem adımları karşısında, çok hızlı olan günümüz bilgisayarları kısa sürede sonuca gidebilmektedir. Bazen analitik çözümlerde bile aynı değerleri elde etmek için yapılan hesaplamalarda da aynı düzeylerde hatalar bulunabilmektedir.

Analitik çözümler karmaşık problemlerin çözümü için yeterli olamamaktadır. Basit geometriler ve bunların matematiksel olarak koordinat sisteminde gösterilmesi sonucu çözüme ulaşabilmektedir. Ayrıca birçok değerin sabit kabul edilmesi veya bazı kabullerin yapılması gerekmektedir ki çözüm yapılabilsin. Hatta termal şartların çok basit olması gerekmektedir ki çözüm yapılabilsin.

Ayrıca modelleme konusunda analitik çözümlerde gerçeğe yaklaşmak daha da zor olacağı için kaba çözümlerler yapılabilir, fakat nümerik analizlerde gerçeğe uygun modelleme ve çözümleme daha sağlıklı ve olasıdır.

Mühendislik problemleri geniş ve kapsamlı bir şekilde parametrelerle çalışmayı gerektirmekte ve sonuca göre başlangıç parametrelerinde değişimler gerektirebilmektedir. Bu gibi durumlarda zamandan ve sıkıcı uzun işlemlerden tasarruf edebilmek için nümerik metodlar önem arz etmektedir.

Bazı problemler analitik metotla çözülebilmekte fakat hiç gerek yok iken birçok karmaşık işlemler için çok fazla efor sarf edilmesi gerekmektedir [24].

4.2. HAD'nin Tanımı

Genel olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(HAD), her türlü akışkan ve akışının değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal çözümlerle akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok veriye ulaşılr. Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği araştırma–geliştirme ve ürün tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bir uçak kanadının üzerindeki basınçlar, bir yeraltı rezervuarının sıcaklık dağılımı, bir ortamdaki hava akımı dağılımı veya hareketli bir arabanın etrafındaki hava hızı gibi akış ile ilgili birçok parametre bulunabilir. Son yıllardaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği teorisi ve bilgisayar yazılımlarındaki gelişmeler yüksek türbülanslı akışların ve dinamik sistemlerin nümerik olarak incelenmesine ve sanal ortamda simüle edilmesine olanak sağlamıştır [25].

4.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar metodu mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor problemleri kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla çözebilen yaklaşık çözüm metotlarından biridir. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir.

Bu teknik, 1950'li yıllarda bilgisayarın gelişmesi ile kendini göstermiştir. Günümüzde de donanım ve yazılımdaki gelişmelere paralel olarak, mühendislik

alanındaki gelişmelerle beraber sonlu elemanlar yöntemi de karmaşık problemlere uygulanmakta ve güvenli sonuçlar vermektedir. Kullanıldığı yerler bir uçağın yada bir otomobilin yapısal analizinden nükleer bir tesis gibi karmaşık bir termal sistemin veya kanal, su yolu, yada yeryüzü üzerinde bulunan herhangi bir akışkanın akış analizini içine alan çok geniş bir alan kapsamaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin temel kavramı sıcaklık, basınç veya deplasman gibi herhangi bir sürekli niceliğin küçük ve sürekli parçaların birleşmesi ile oluşan bir modele dönüştürülmesidir. Bu metoda göre; orijinal geometri, malzemenin yüzeyinde ve içinde noktalar içeren elemanlar dizisi tarafından yerleştirilir.

Model cevabı tekil bir eleman için ele alınır. Şöyle ki; fonksiyonun sürekliliği, içeride düzenleyici olan denklemlere uyan noktalar arasında sağlanır. Örneğin, bir elastik problem için sonlu elemanlar formülasyonu noktasal yer değişimleri belirlemek için gerçek iş prensibi kullanılarak çıkarılır. Uyumluluk, neredeyse tamamen içerideki dengede sağlanır. Önce tekil bir elemanın noktasal cevabı çıkarılır, daha sonra katının bütününe davranışı her bir elemanın katkısı birleştirilerek elde edilir.

Sonlu elemanlar metodunun en önemli özelliklerinden biri kıvrılmış, eğrilmiş sınırların yüksek izoparametrik elemanlar kullanılarak, gerçekçi olarak tanımlanabilmesidir. Gerçek çözüm, ağı tanımlayan ortalama eğimin yerleştirildiği bölgede elde edilir. Sonuçlar, noktasal serbestlik dereceleri ağı düzenleyerek artırılacağını göstermektedir. Genel çözüm, düzenleyici denklemin gerçek çözümüne dönüştürülebilir.

Sonlu Elemanlar Metodunun üç temel niteliği vardır. İlk olarak geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit bölgelere ayrılır. Bu aşamada probleme konu olan çözüm bölgesi uygun şekilde elemanlara ayrılır. Elemanlara ayırma işlemi, problemin çözümünün yaklaşırlığı açısından oldukça önemlidir.

Sonlu elemanlar metodu ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşım, çözüm işleminde izlenecek yolu değiştirmez. Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır. [26]

- a) Cismin sonlu elemanlara bölünmesi
- b) İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi
- c) Eleman rijitlik matrisinin oluşturulması
- d) Sistem rijitlik matrisinin oluşturulması
- e) Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması
- f) Sınır şartlarının belirlenmesi ve uygulanması
- g) Sistem denklemlerinin çözümü

4.2.2. Sonlu hacimler yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, sonlu elemanlar yöntemine benzer olarak çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma ilkesine dayanır. Sonlu hacimler yönteminde de, sonlu elemanlar yöntemine benzer olarak sonlu farklar metodu temel olarak alınmıştır. Ancak gelişmişlik olarak sonlu farklar yönteminden oldukça hassastır. Sonlu elemanlardan farklı olarak bu yöntem akış denklemlerini sayısal olarak çözülebilecek cebirsel denklemlere dönüştürmek için kontrol hacmini esas alan bir teknik kullanır. Yani bu teknik, akış denklemlerinin integrasyonunu her kontrol hacminde alma ilkesine dayanır. Bu integrasyon sonucu her bir kontrol hacmini karakterize eden denklemlerin ortaya çıkmasını sağlar.

Sonlu hacimler yöntemi ile problem çözme işleminde genellikle şu adımlar kullanılır [26];

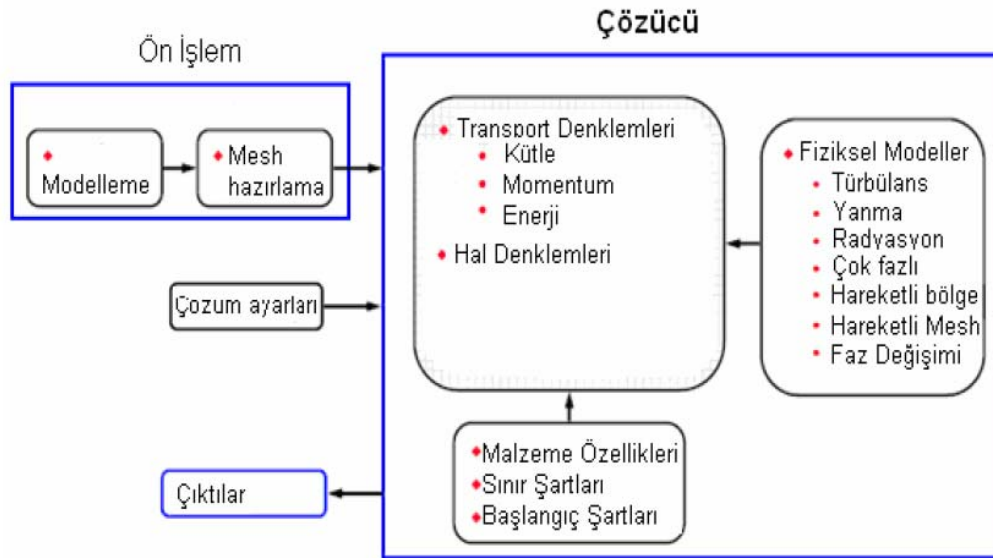
- a) Çalışılacak bölgenin ağ programları sayesinde oluşturulacak sayısal analize uygun ağ ile kontrol hacimlere bölünmesi.
- b) Sırasıyla momentum denkleminin, süreklilik denklemlerinin ve daha sonra enerji veya türbülans gibi diğer aranan denklemlerin çözümü.
- c) Sonuçlandırılan denklem takımlarının iteratif çözücü sayesinde daha doğru değerlere yükseltilmesi.

- d) Yakınsaklığın kontrol edilmesi.
- e) Çözümün elde edilmesi.

4.3. HAD' nin Çalışması

Hesaplama akışkanlar dinamiği sonlu elemanlar, sonlu hacimler, sınır elemanları, sonlu farklar yöntemlerini kullanır. Domain kontrol hacimlerinin(veya hücrelerin) sonlu seti üzerinde ayrışma yapılarak çözüm yapılır. Genelde kütle, momentum, enerji, vb. korunum denklemleri kontrol hacimlerine göre hazırlanan denklem takımları ile çözülür.

Kısaca şu şekilde şematize edilebilir [27];



Şekil:4.1 HAD modellemenin özet şeması

4.3.1. HAD analizlerinin temel basamakları

Problemi tanımlama ve ön işlem yapma:

1. Modellemenin hedefi belirlenir.
2. Modeli yapılacak domain belirlenir.
3. Grid tasarlanır ve yapılır.

Çözüm:

4. Sayısal model kurulur.
5. Çözüm yapılır ve kontrol edilir.

İşlem sonrası:

6. Sonuçlar incelenir.
7. Modelde düzeltmeler yapılır.

4.3.2. Modelleme hedefinin belirlenmesi

Aranan sonuçlar (basınç düşümü, kütle debisi vb.) ve bu sonuçların nasıl kullanılacağı aşağıdaki maddeler göz önünde bulundurularak belirlenir:

Modelin hangi opsiyonlara göre çözüleceği,

Analizlerde bulunan gerekli fiziksel modeller(türbülans, sıkıştırılabilirlik, radyasyon gibi.),

Yapmak zorunda kalınan basitleştirme varsayımları,

Yapılabilecek varsayımlar(simetri, periyodik vb.),

Yalnız modelde hazır bulunan fonksiyonlar veya kullanıcının hazırlamış olduğu özel fonksiyonlar (C programlama dili ile yazılmış).

4.3.3. Gridi çizmek ve oluşturmak

Model geometrisine uygun grid yapısı(Quad/hex, tri/tet, hybrid gibi gridler) belirlenir. Ayrıca geometri ve akışın kompleksliğine bağlı olarak gerekli olan grid yoğunluğu saptanır.

4.3.4. Sayısal modeli kurmak

Verilen bir problemin sayısal modelini kurmak için aşağıdaki noktalar dikkate alınmaktadır [28]:

Uygun fiziksel model seçimi(Türbülans, yanma, çok fazlı vb.)

Maddesel özelliklerin belirlenmesi (Sıvı, katı, karışım vb.),
 Çalışma şartlarının tanımlanması (atmosfer basıncı, yerçekim ivmesi vb.),
 Bütün sınır bölgelerinde sınır şartlarının tanımlanması,
 Başlangıç değerlerinin verilmesi,
 Çözümde hangi kontrol metotlarının kullanılacağı,
 Yakınsama kriterlerinin ayarlanması.

4.3.5. Çözümün yapılması

Korunum denklemleri lineer denklemler halinde çözülür. İterasyon sonucu yakınsama sağlanmaya çalışılır. İterasyon sayısı ise yakınsama durumuna göre tercih edilir.

4.3.6. Sonuç ve değerlendirme

İterasyon sonucu elde edilen değerler grafikler, çizimler yardımı ile incelenebilmekte veya değer olarak okunabilmekte ve istenilen durum ve şartlara göre sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilebilmektedir. Bu şekilde değerlendirme sonucunda örneğin oluşturulan modelden çok fazla sayıda üretim yapılacaksa sorunlar veya sorun oluşturabilecek durumlar bu şekilde önceden şekillendirilebilmekte ve ileride oluşabilecek aksaklıklar daha önceden ve henüz modelleme aşamasında çözülebilmeye şansı bu yöntemle sahip olunmaktadır.

4.4. Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Çalışan Bilgisayar Programları

4.4.1. Gambit

Hesaplmalı akışkanlar dinamiği ve sonlu hacimler analizlerinde model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemleri için kullanılan bir yazılımdır.

Gambit, iki boyutta kare, dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü mesh elemanlarını kullanarak istenilen sayısal ağın basit ve hızlı bir şekilde oluşturulması için kullanılan bir yazılımdır.

4.4.1.1. Gambit mesh elemanları

Hex: Altıgen mesh elemanlarına denir

Hex/Wedge: Model öncelikle hex tipi mesh elemanları ile oluşturulur. Kalan kısımlar ise kama tipi elemanlar ile tamamlanır.

Tet/Hybrid: Mesh dörtgen hacimlerden oluşur. Modelin şekline göre diğer mesh elemanları ile de tamamlanabilir.

4.4.1.2. Gambit mesh atma çeşitleri

Map: Altıgen elemanlarla atılan düzgün mesh tipidir.

Submap: Modeli map mesh atılabilecek hacimlere böler.

Tet/Primitive: Dört yüzü bulunan hacimi dört adet altıgen elemana bölerek mesh atma çeşididir.

Cooper: Modelin yüzeyinin silidir hacimleri ile süpürülerek mesh atılması tipine denir.

Tet/Hybrid: Meshin öncelikle dörtgen hacimler ile sonra diğer mesh elemanları ile atılma tipine denir.

4.4.2. Fluent

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. 1983' ten bu yana dünya çapında bir çok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır.

Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık

endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler v.b.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı bir çok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcılarına birbirinden farklı bir çok probleme aynı arayüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar.

Fluent, ürün performansını ürün henüz tasarım aşamasındayken ölçme, performansı düşüren etkenleri detaylı bir şekilde tespit ederek yine bilgisayar ortamında giderme ve piyasaya iyileştirme işlemleri tamamlanmış son ürünün verilmesi sağlayarak kullanıcılarının zorlu rekabet şartlarında emsallerinden bir adım önde olmasına katkıda bulunur.

Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminer, geçişsel ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üreterek, AR-GE bölümlerinin tasarım esnasındaki en güvenilir aracı olmaya adaydır.

4.4.2.1. Fluent' in teknik özellikleri

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

Genel Modelleme Yetenekleri

2 boyutlu düzlemsel, 2 boyutlu aksenal simetrik, 2 boyutlu döngülü aksenal simetrik (dönel simetrik) ve 3 boyutlu akışlar

Sabit rejim veya geçici rejim akışları

Bütün hız rejimleri (düşük subsonik, transonik, süpersonik ve hipersonik akışlar)

Laminer, geçiş veya türbülanslı akışlar

Newtonyan ve newtonyan olmayan akışlar

Zorlamalı, doğal, karışık konveksiyon, konjuge ısı transferi ve radyasyon

Homojen ve heterojen yanma modellerini ve yüzey tepkime modellerini de içeren kimyasal türler karışımı ve tepkimesi modelleri.

Gaz-sıvı, gaz-katı ve sıvı-katı akışlar için serbest yüzey ve çok fazlı akış modelleri Sürekli yüzeyle akuple yayık fazlar (partikül/damla/baloncuk) için Lagrangian yörünge hesaplama

Erime/katılama uygulamaları için faz değişikliği modeli

İzotopik olmayan geçirgenlik, ilk direnç, katı ısı iletimi ve gözenekli yüzey basınç zıplaması modelleriyle gözenekli ortam

Fanlar, pompalar, radyatörler ve ısı değiştirgeçleri için yığık modeller

Durağan ve dönel referans çerçeveleri

Çoklu hareketli çerçeveler için çoklu referans çerçevesi ve kayan ağ seçenekleri

Kütle korunumu ve döngü korunumu seçenekleriyle beraber rotor-stator etkileşimleri, tork konverterleri ve benzer turbomakina uygulamaları için karışım düzlemi modeli.

Kütle, momentum, ısı ve kimyasal türler için hacimsel kaynaklar

Malzeme özellikleri veri tabanı

Sürekli fiber modeli

Magnetohidrodinamik modeli

Akış kaynaklı gürültü öngörme modeli

GT-Power ile dinamik (iki-yönlü) birleşimlik

Kullanıcı tanımlı fonksiyonlarla ilerli seviyede özelleştirme yeteneği

Silindir içi akış modelleme yeteneği

Hareketli ve deforme olan ağ hareketleri [29].

4.4.2.2. Fluent programının çalışma prensibi

Sonlu hacimler yöntemi ile çalışan programlardan biri olan Fluent, Gambit veya diğer modelleme programlarından aldığı mesh dosyalarını okuyarak koşulları uygulamak için dizayn edilmiştir ve bu sayede sistemin çözümünü elde etmeye çalışır. Fluent programı, sistemi çözüme ulaştırmak için altyapısındaki aşağıda bulunan denklemleri kullanır.

Süreklilik denklemi;

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

Kütle korunumu:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right) = S_m \quad (4.2)$$

Bu kütle korunumu denkleminin genel halidir. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akış için geçerlidir. Burada S_m terimi akışkanın, akış ikinci bir faza geçmesi durumunda veya diğer kaynak terimlerini içerebilecek terim, yani kullanıcı tarafından programa verilebilecek bilgi, denklem v.b. bir terimdir.

Momentum Korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{T}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.3)$$

Burada p statik basınç, $\bar{\bar{T}}$ gerilme tensörü, \vec{g} yerçekimi kuvveti, \vec{F} kullanıcı tarafından verilebilecek diğer kaynak terimlerini içeren terimdir.

Enerji Denklemi;

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p)) = \nabla \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{T}_{\text{eff}} \cdot \vec{V}) \right] + S_h \quad (4.4)$$

Bu denklemde; E birim enerjiyi, $k_{\text{eff}} \nabla T$ iletimi, $\sum_j h_j J_j$ difüzyonu ve $(\bar{T}_{\text{eff}} \cdot \vec{V})$ viskoz disipasyonu ifade etmektedir [27].

4.4.2.3. Modelin tanımlanması ve fluent programında çözümü

Çözümü yapılacak model geometrisinin belirlenmesi, ağ yapısının (meshleme) oluşturulması ve sınır tipinin belirlenmesi Gambit programında gerçekleştirilir. Modelleme ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra .msh uzantısı olarak kaydedilen dosya, Fluent tarafından kullanıma hazır hale gelir.

Fluent programına import edilen (çağrılan) meshlenmiş modele ait fiziksel özellikler, sınır koşulları, akışkanın viskozitesi ve sıkıştırılıp sıkıştırılmadığı, malzeme özellikleri, akışın laminar bölgede mi, türbülanslı bölgede mi çözüleceği gibi gerekli tüm veriler programa tanımlanır. Daha sonra yapılan iterasyon işlemi ile yakınsama sağlanmaya çalışılır ve sonuçta elde edilen değerler kullanılır ve yorumlanır.

BÖLÜM 5. MİKROBORUDA AKIŞIN SAYISAL MODELLENMESİ

5.1. Gambit Programında Modellenme

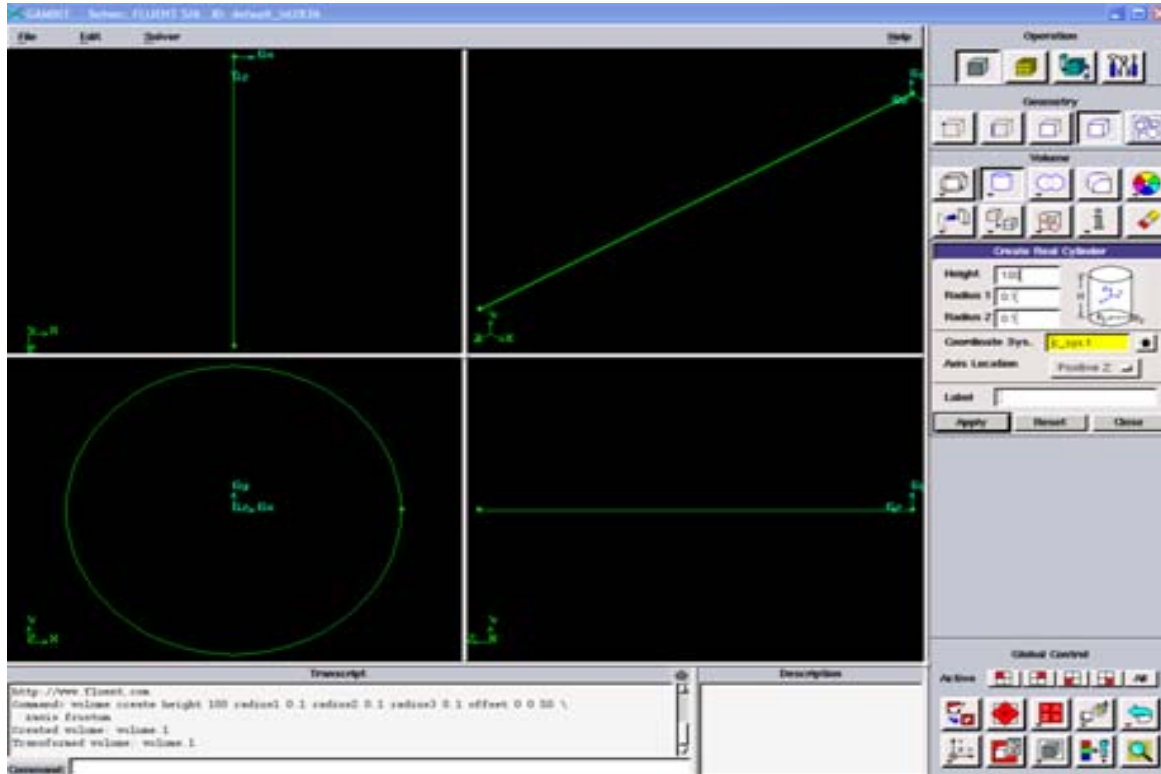
Çalışmada model 3 boyutlu olarak tasarlanmış ve Fluent programında da 3 boyut için çözümler yapılmıştır.

5.1.1. Gambit programının açılması ve çözücü seçimi

Gambit Programı bilgisayarda açılarak Ana Menü'den Solver / Fluent (5/6) komutu ile çözücü seçilir.

5.1.2. Boru çizimi

Model, 3 boyutlu çizileceğinden Operation Toolpad / Geometry / Volume / Create Real Cylinder komutu ile boru boyutları girilerek boru hacmi oluşturulur.



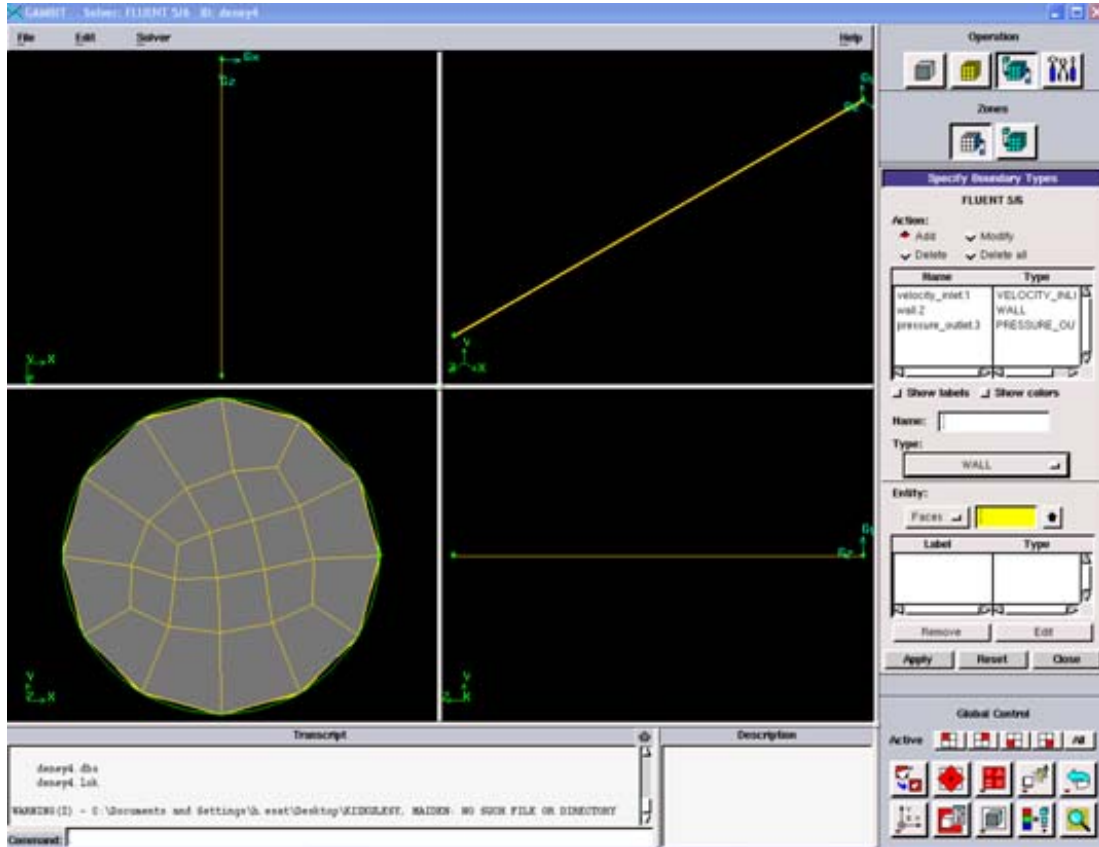
Şekil 5.1. Gambitte boru modelleme.

5.1.3. Gambitte mesh geometrisinin oluşturulması

Meshleme yaparken Operation Toolpad / Mesh / Volume / Mesh Volumes komutu seçilir. Burada mesh yapılacak hacim 'Volumes' kısmında seçilerek mesh yoğunluğu belirtilir ve buna göre meshleme işlemi yapılır.

5.1.4. Gambitte sınır şartlarının belirlenmesi

Borunun bir tarafı akışkanın gireceği kısım Velocity Inlet, diğer tarafı da akışkan çıkacağı kısım olacağından ve çıkış basıncı bilindiğinden Pressure Outlet olarak belirlenir, borunun tamamı Wall olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar için komut penceresinden, Operation Toolpad / Zones / Specify Boundary Types komutu kullanılır. Buradaki sınır şartları şu şekilde belirlenir.



Şekil 5.2. Gambitte sınır şartlarının belirlenmesi

5.1.5. Gambitte oluşturulan modelin kaydedilmesi

Ana Menü'den File / Save komutu ile yapılan işlemler gamit dosya uzantısı ile kaydedilir. Ana Menü'den File / Export / Mesh komutu ile de .msh uzantılı olarak kayıt edilir. Bu uzantı ile kaydedilerek ancak Fluent programında açılıp çözümlene yapılabilir. Ekranı çıkacak pencerede Export 2-D(X-Y) Mesh seçeneğinin yanındaki kutu seçilmemiştir çünkü mesh işlemi üç boyutlu şekilde export edilmiştir. Burada dosyayı import edebilmek için verilecek bir isimle uygun bir dosyasının içine kaydedilir. Bu işlemlerden sonra Gambitte oluşturulan çizim Fluent programında kullanılabilir duruma dönüştürülür.

5.2. Fluent Programında Çözdürülecek Modelin Tanımlanması

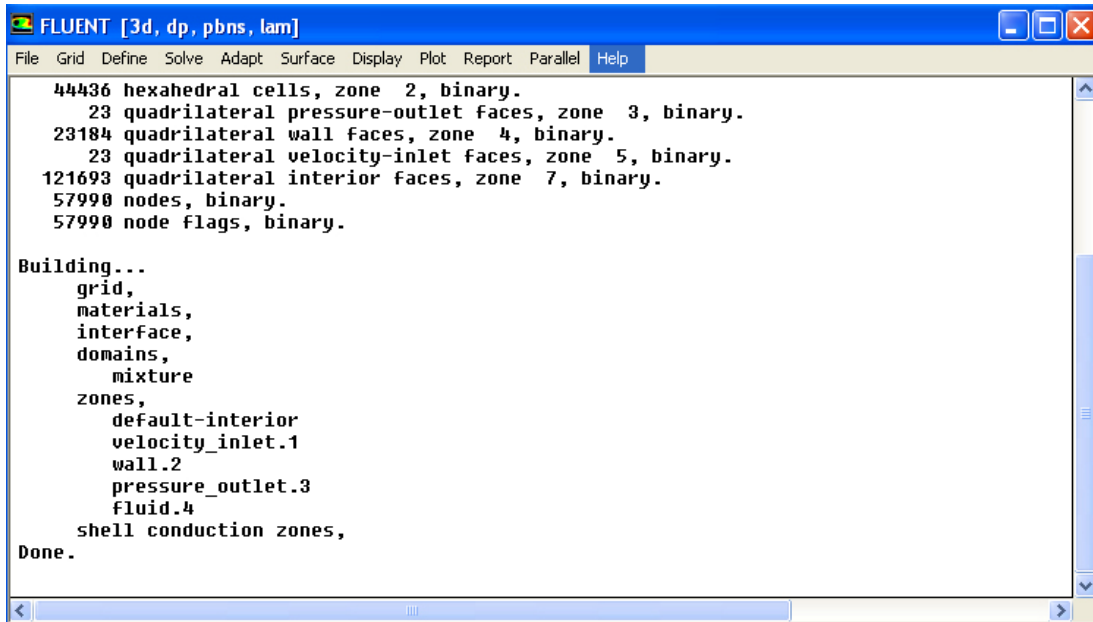
Gambit Programında modellenen sistemin Fluent Programında tanımlanması için aşağıdaki işlem sırası izlenir;

5.2.1. Fluent programı çalıştırılması

Programın 3ddp versiyonu seçilir. Böylece modelin 3 boyutlu olarak çözdürülmesi sağlanır.

5.2.2. Mesh yapısının okunması ve raporlanması

Ana Menü'den File / Read / Case komutu tıklanarak Gambitte oluşturulan .mesh uzantılı dosya Fluent Programına bu şekilde açılmış ve tanınmış olur. Fluent Programı bu dosyayı aşağıdaki şekildeki gibi okur ve yorumlar.



```

FLUENT [3d, dp, pbns, lam]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
44436 hexahedral cells, zone 2, binary.
 23 quadrilateral pressure-outlet faces, zone 3, binary.
23184 quadrilateral wall faces, zone 4, binary.
 23 quadrilateral velocity-inlet faces, zone 5, binary.
121693 quadrilateral interior faces, zone 7, binary.
57990 nodes, binary.
57990 node flags, binary.

Building...
  grid,
  materials,
  interface,
  domains,
  mixture
  zones,
  default-interior
  velocity_inlet.1
  wall.2
  pressure_outlet.3
  fluid.4
  shell conduction zones,
Done.

```

Şekil 5.3. Fluent programında mesh yapısının okunması.

5.2.3. Mesh yapısının kontrol edilmesi

Ana Menü'den Grid / Check komutu ile ağ yapısında hata olup olmadığı kontrol edilir. Özellikle alan ve hacim değerlerinin pozitif olmasına dikkat edilmelidir.

5.2.4. Akışkanın kesit boyutlarının tanımlanması

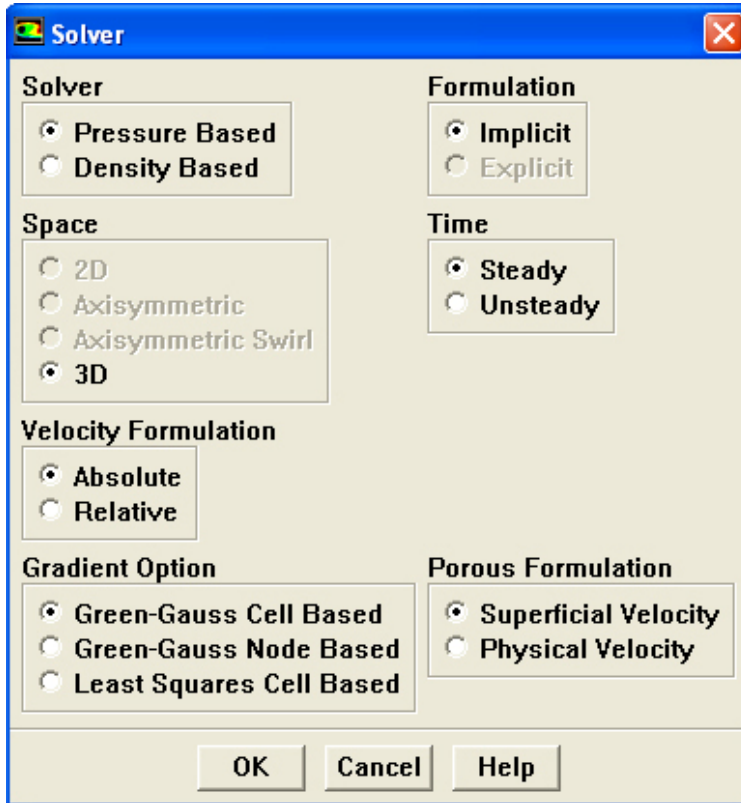
Ana Menü'den Grid / Scale komutu ile Gambit Programında yapılan çizimlerin hangi ölçü birimi ile yapıldığı tanımlanır ve ayrıca büyütme, küçültme oranlarına ihtiyaç duyulması halinde bu menüden işlem yapılır.

5.2.5. Mesh yapısının gösterilmesi

Ana Menü'den Display / Grid komutu ile mesh yapısı görüntülenir.

5.2.6. Çözücü özelliklerinin tanımlanması

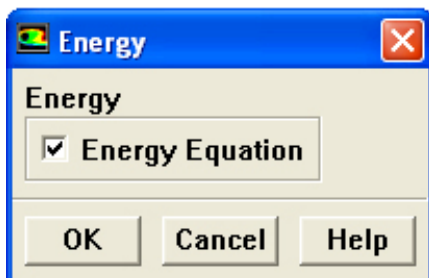
Ana Menü'den Define / Models / Solver komutu ile çözücü özellikleri şekildeki gibi düzenlenir.



Şekil 5.4. Fluent programında çözümünün tanımlanması

5.2.7. Enerji denklemi çözümünün tanımlanması

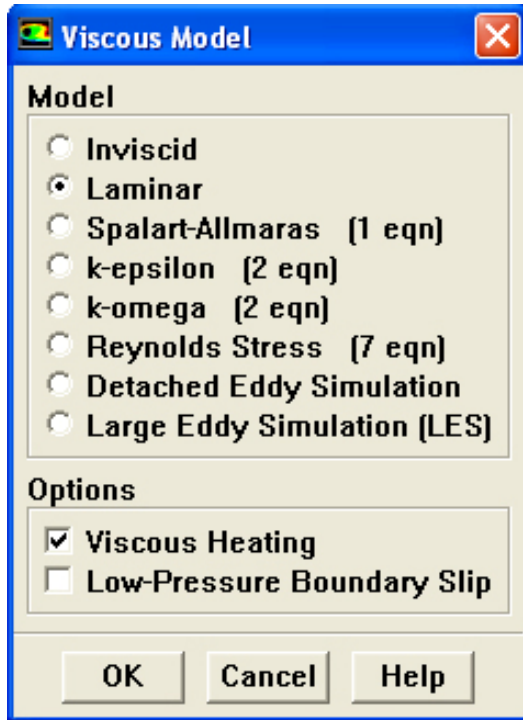
Ana Menü'den Define / Models / Energy komutu ile enerji denkleminin çözülmesi için kutu seçilir ve program enerji denklemi için de çözümlene yapmış olur.



Şekil 5.5. Fluent programında Enerji Denkleminin İşaretlenmesi

5.2.8. Akış şeklinin tanımlanması

Ana Menü'den Define / Models / Viscous komutu ile belirlenir. Laminer bölge için çözümlerde 'Laminar' seçeneği ve viskoz ısınma etkisinin de hesaplanması için 'Viscous Heating' kutusu işaretlenmiştir.



Şekil 5.6. Akış şeklinin tanımlanması

5.2.9. Akışkan özelliklerinin tanımlanması

Ana Menü'den Define / Materials komutu ile deney ortamında kullanılan akışkan özellikleri belirlenmiştir. Deney ortamında kullanılan akışkan sudur ve 293 K su için seçim yapılmıştır.

5.2.10. Sınır şartlarının belirlenmesi

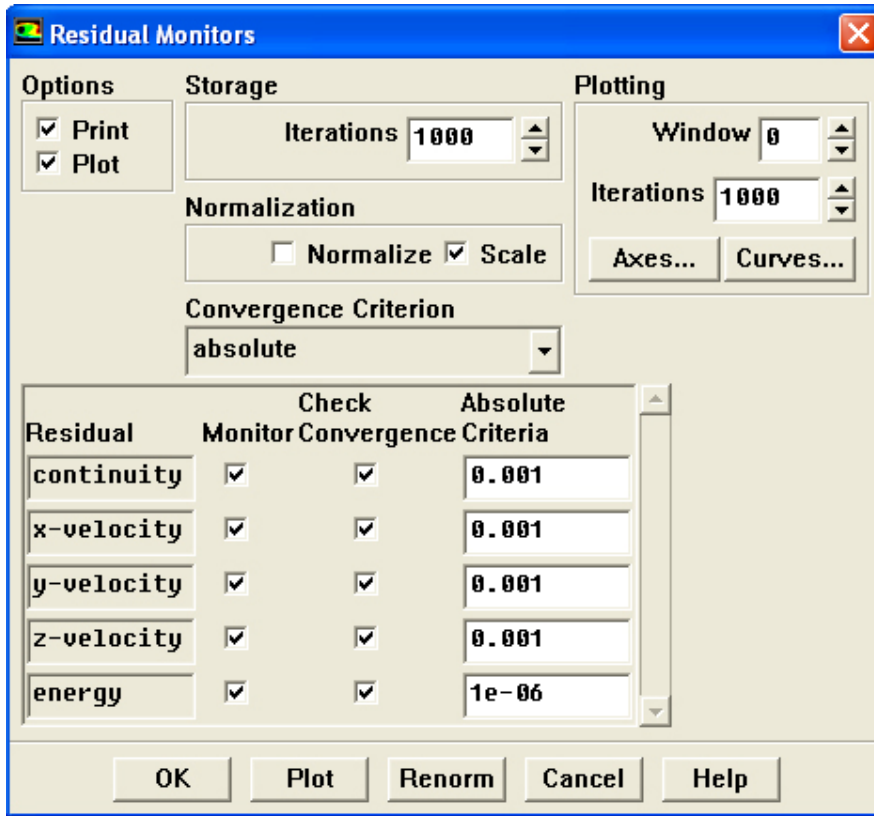
Ana Menü'den Define / Boundary Conditions komutu kullanılır. Akışkanın hızı ve giriş sıcaklığı, duvarın özelliği en önemlisi adyabatik olması ve bu özelliği bu kısımda belirlenir.

5.2.11. Başlangıç değerlerinin tanımlanması

Ana Menü'den Solve / Initialize / Initialize komutu ile programın çözüme nereden başlayacağı belirlenir.

5.2.12. İterasyon parametrelerinin belirlenmesi

Ana Menü'den Solve / Monitors / Residual komutu ile çözümün hangi değere kadar yakınsama yapacağı belirlenir.



Şekil 5.7. İterasyon parametrelerinin belirlenmesi

5.2.13. Çözümün iterasyonla yakınsaması

Ana Menü'den Solve / Iterate komutu ile iterasyon başlatılır. Çözüm yakınsadığında grafik şeklinde raporlanır.

5.3 Oluşturulan Modelin Özellikleri

Mikrokanalda akışın sayısal modellemesi için GAMBİT ve FLUENT programları kullanılmıştır. Fluent programı sonlu hacimler yöntemini kullanarak Navier-Stokes denklemlerini çözen ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programıdır. Gambit programı ise Fluent çözücüsünün kullanacağı modelin çizimi ve meshleme işleminin gerçekleştirildiği programdır. Sayısal hesaplamalarda akış kararlı, laminar, üç boyutlu olarak tanımlanmış ve çözümler ısı enerji modeli kullanılarak yapılmıştır. Sayısal model adyabatik 101 μm , 76 μm ve 50 μm iç çaplarında, 100 mm uzunluğundaki mikro borular için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, ergimiş silis mikrobörular kullanılmış ve pürüzsüz kabul edilmiştir. Mikroborunun akış hacminin tamamı hesaplama bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu alan 44436 adet altı yüzeyle (hexahedral) hacim elemanlarına bölünmüştür. Çözümleme ya da artık değer (residual) 10^{-5} değerinin altına düşene kadar sürdürülmüştür. Çözüm için kullanılan sınır şartları şu şekildedir.

Giriş için:

Akış Hızları; $u_{\text{giriş}} = 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20 \text{ m/s}$ ve
Giriş Sıcaklığı $T_{\text{giriş}} = 293\text{K}$ olarak belirlenmiştir.

Çıkış için:

Çıkış basıncı; atmosferik basınç $P_{\text{çıkış}} = 101310,5 \text{ Pa}$

Duvar:

Adyabatik duvar ve duvarda hız sıfıra eşittir.

20 °C Su için:

Yoğunluk(ρ) = 998 kg/m³
Özgül ısı(c_p) = 4187 j/kg.K
Viskozite(μ) = 959.10⁻⁶ kg/m.s

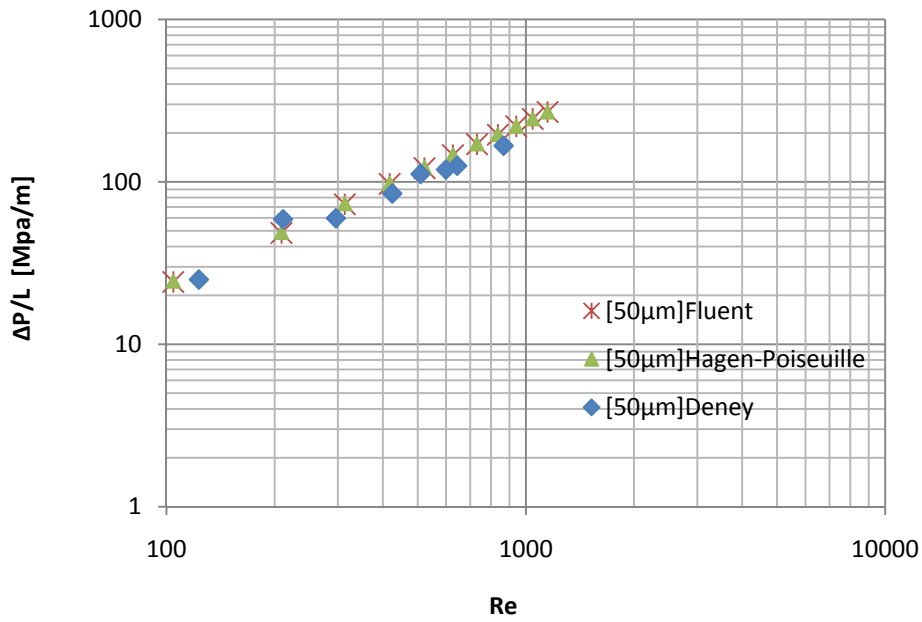
olarak alınmıştır. Yapılan çalışmalarda farklı çaplar için 100-2300 aralığında değişen Re sayıları için basınç düşümü ve sıcaklık artışı değerleri elde edilmiş olup bu veriler

bölüm 6’da deneysel veriler, sayısal çözümler ve analitik modeller karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI İLE HAD SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

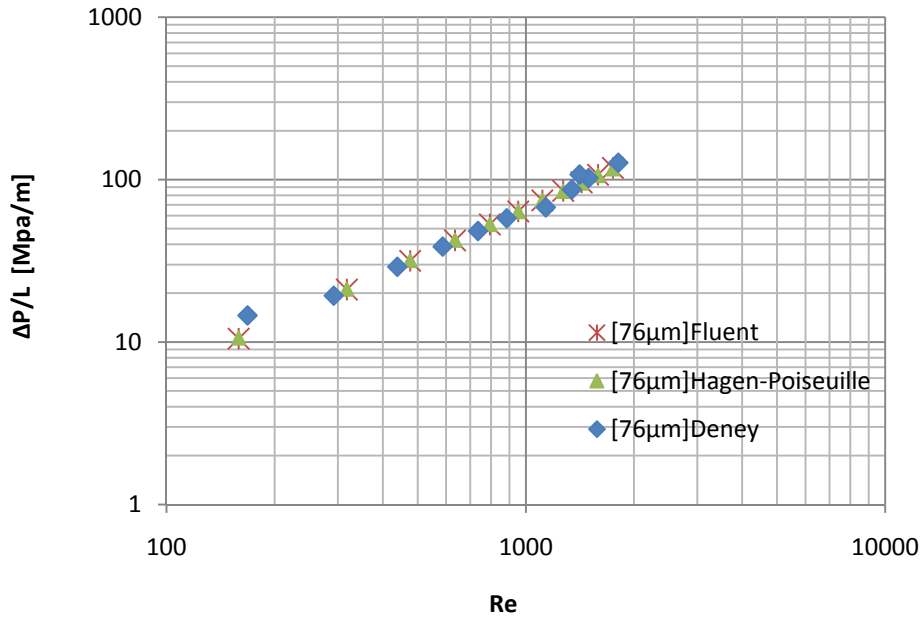
6.1 Basınç Düşüşü Değerlerinin Karşılaştırması

Adyabatik ve çapları 50 μm , 76 μm ve 101 μm olan mikro borular için yapılan HAD çözücüsü olan Fluent programı sonuçları, deneysel veriler ve Hagen-Poiseuille denklemi ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



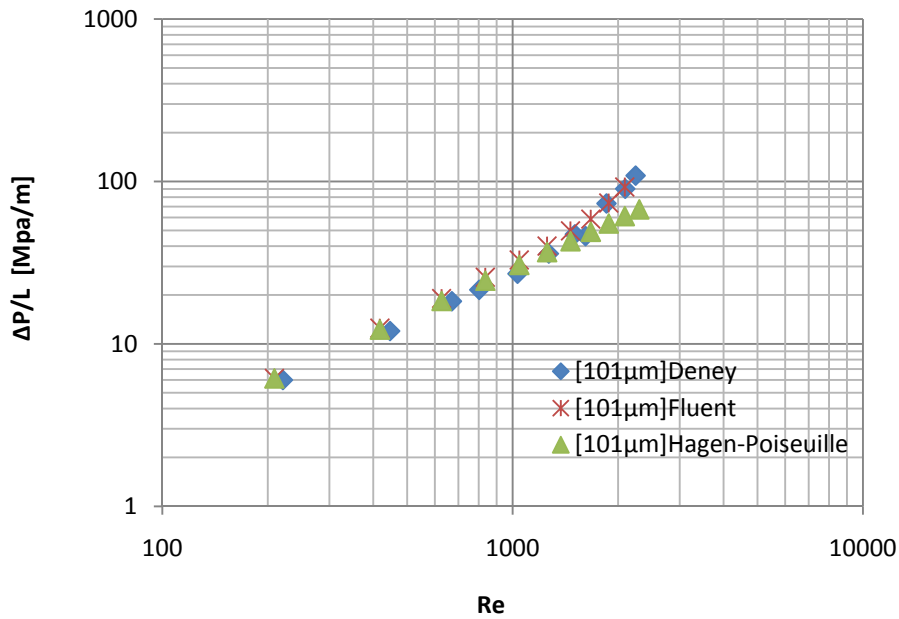
Şekil 6.1. 50 μm mikroborda basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi

Laminer akış bölgesi için şekil 6.1.'de 50 μm adyabatik mikroboru için Fluent sonuçları, deney sonuçları ve Hagen-Poiseuille denklemi yardımıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bütün sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



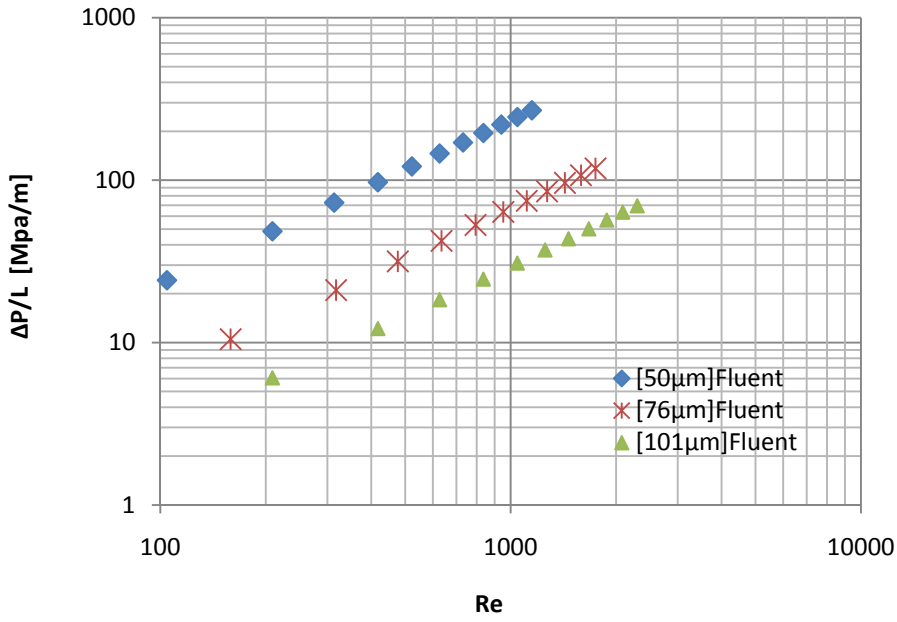
Şekil 6.2. 76 μm mikroboruda basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi

Laminer akış bölgesi için şekil 6.2.'de 76 μm adyabatik mikroboru için Fluent sonuçları, deney sonuçları ve Hagen-Poiseuille denklemi yardımıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. 50 μm borudaki gibi burada da bütün sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



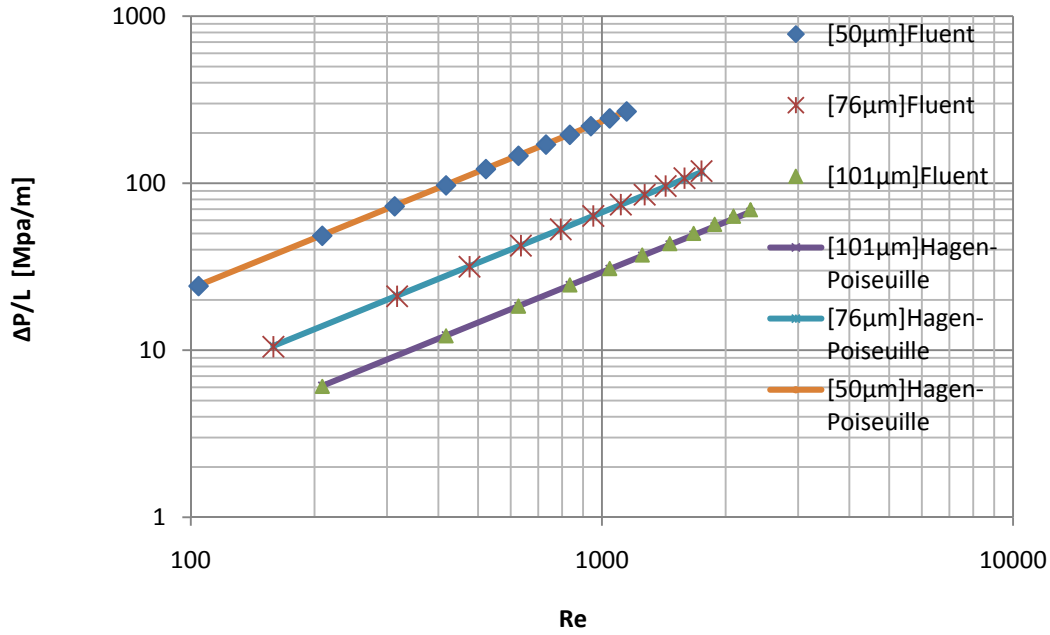
Şekil 6.3. 101 μm mikroboruda basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi

Laminer akış bölgesi için şekil 6.3.'de 101 μm adyabatik mikroboru için Fluent sonuçları, deney sonuçları ve Hagen-Poiseuille denklemi yardımıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bütün sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. 50 μm ve 76 μm mikroborulardan farklı olarak deney sonuçları ve Fluent sonuçlarının Reynolds 1500 'dan daha yüksek değerleri için çok az miktarda sapma görülmüştür.



Şekil 6.4. 50 μm , 76 μm ve 101 μm mikroborularda Fluent programı ile elde edilen basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.4.'de 50 μm , 76 μm ve 101 μm adyabatik mikroborular için Fluent sonuçları, aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi çap artışı ile basınç düşümünün azaldığı gözlenmektedir.



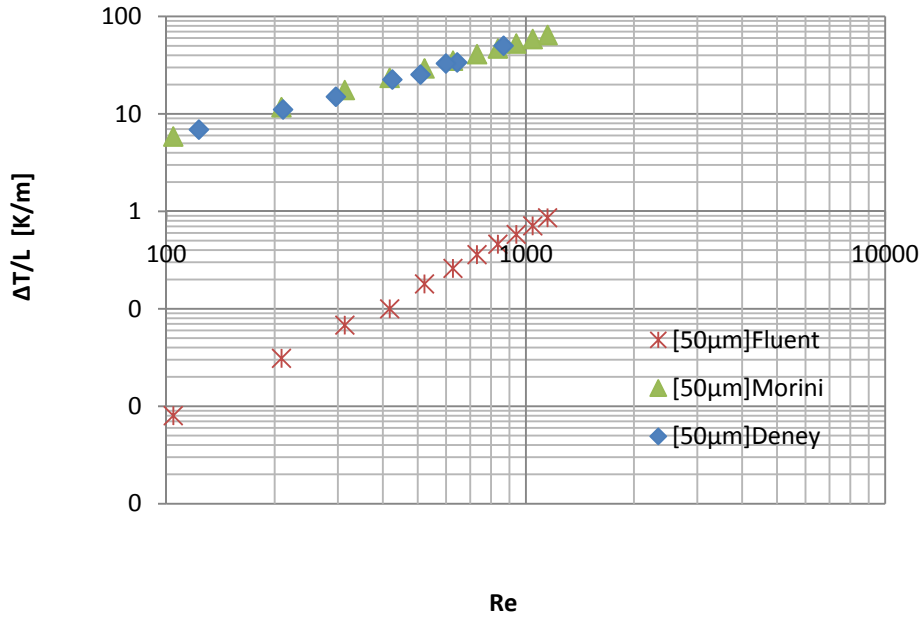
Şekil 6.5. 50 µm , 76 µm ve 101 µm mikroboruda Fluent programı ve Hagen-Poiseuille denklemi ile elde edilen basınç düşüşünün Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.5.'de 50 µm, 76 µm ve 101 µm adyabatik mikroborular için Fluent sonuçları ve Hagen-Poiseuille denklemi ile elde edilen sonuçlar aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Bütün çaplar için uyumluluk gözlenmiştir.

6.2. Sıcaklık Artışı Değerlerinin Karşılaştırması

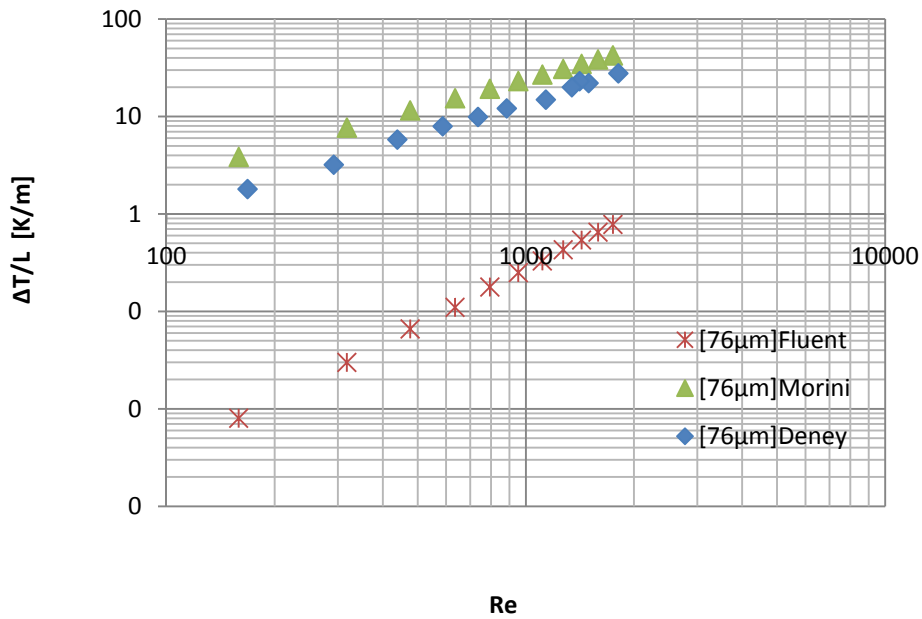
Çapın küçülmesiyle birlikte basınç düşüşü artmaktadır. Kanaldaki akış hızı artmaktadır makro kanallara göre bu sebeplerden dolayı viskoz ısınma daha önemli bir boyut kazanmaktadır. Viskoz ısınma sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Bu sebepler de mikro borularda viskoz ısınmanın ve sıcaklık artışının çok önemli olduğunu vurgulamaktadır. Sıcaklık artışı sebebiyle akışkanın fiziksel özelliklerinde de değişimler mümkün olmaktadır. Akışın karakteristiği için önemli bir etken olan bu sıcaklık artışı için elde edilen sonuçlar aşağıda karşılaştırmalı bir şekilde gösterilmiştir.

Adyabatik ve çapları 50 µm, 76 µm ve 101 µm olan mikro borular için yapılan HAD çözücüsü olan Fluent programı sonuçları, deneysel veriler ve Morini(2005) denklemi ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



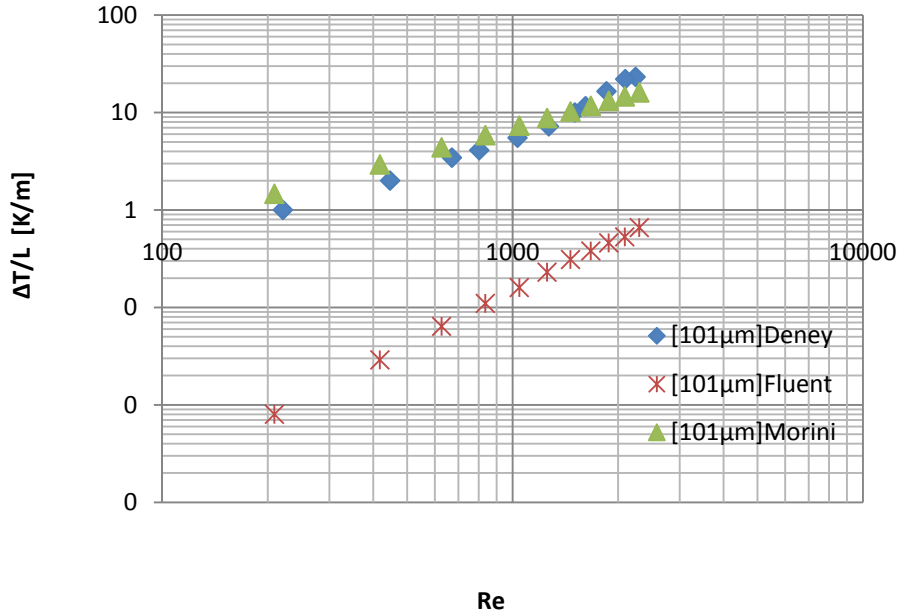
Şekil 6.6. 50 µm mikroboruda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.6.'de 50 µm adyabatik mikroboru için Fluent sonuçları, deney sonuçları ve Morini denklemi yardımıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Deney sonuçları ve Morini denklemi sonuçları birbiri ile yakınlık göstermektedir fakat Fluent sonuçları için uyum sağlanamamıştır.



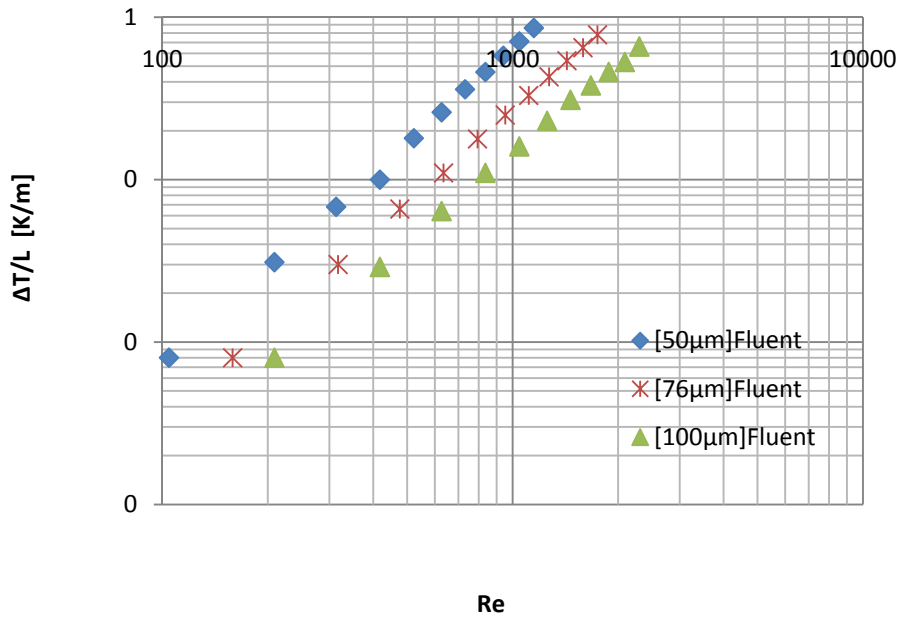
Şekil 6.7. 76 µm mikroboruda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.7.'de 76 μm adyabatik mikroboru için Fluent sonuçları, deney sonuçları ve Morini denklemi yardımıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Deney sonuçları ve Morini denklemi sonuçları birbiri ile yakınlık göstermektedir fakat Fluent sonuçları için uyum 76 μm için de gözlenememiştir.



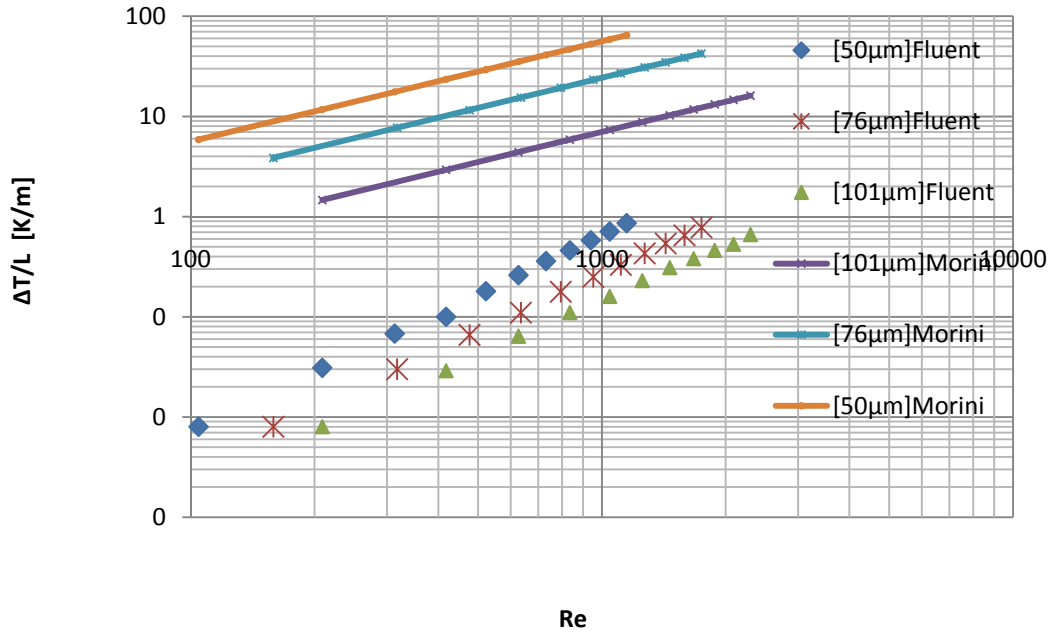
Şekil 6.8. 101 μm mikroboruda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.8.'de 101 μm adyabatik mikroboru için Fluent sonuçları, deney sonuçları ve Morini denklemi yardımıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Deney sonuçları ve Morini denklemi sonuçları birbiri ile yakınlık göstermektedir Reynolds 1500 değerinden sonra deney sonuçları biraz daha yüksek çıkmıştır fakat Fluent sonuçları için 50 μm ve 76 μm kanallarda olduğu gibi uyum gözlenememiştir.



Şekil 6.9. 50 μm , 76 μm ve 101 μm mikroroburda sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.9.'da 50 μm , 76 μm ve 101 μm adyabatik mikroroburlarda laminar akış bölgesi için Fluent sonuçları karşılaştırmalı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sıcaklık artışı aynı Reynolds sayıları için 50 μm çapta en büyük ve 101 μm boruda en küçüktür yani çap küçüldükçe sıcaklık artışının daha fazla olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.10. 50 µm , 76 µm ve 101 µm mikroboruda Fluent programı ve Morini denklemi ile elde edilen sıcaklık artışının Re sayısı ile değişimi

Şekil 6.10.'da 50 µm, 76 µm ve 101 µm adyabatik mikroborular için Fluent sonuçları ve Morini denklemi ile elde edilen sonuçlar aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Sonuçların uyumluluk gösteremediği burada da görülmektedir.

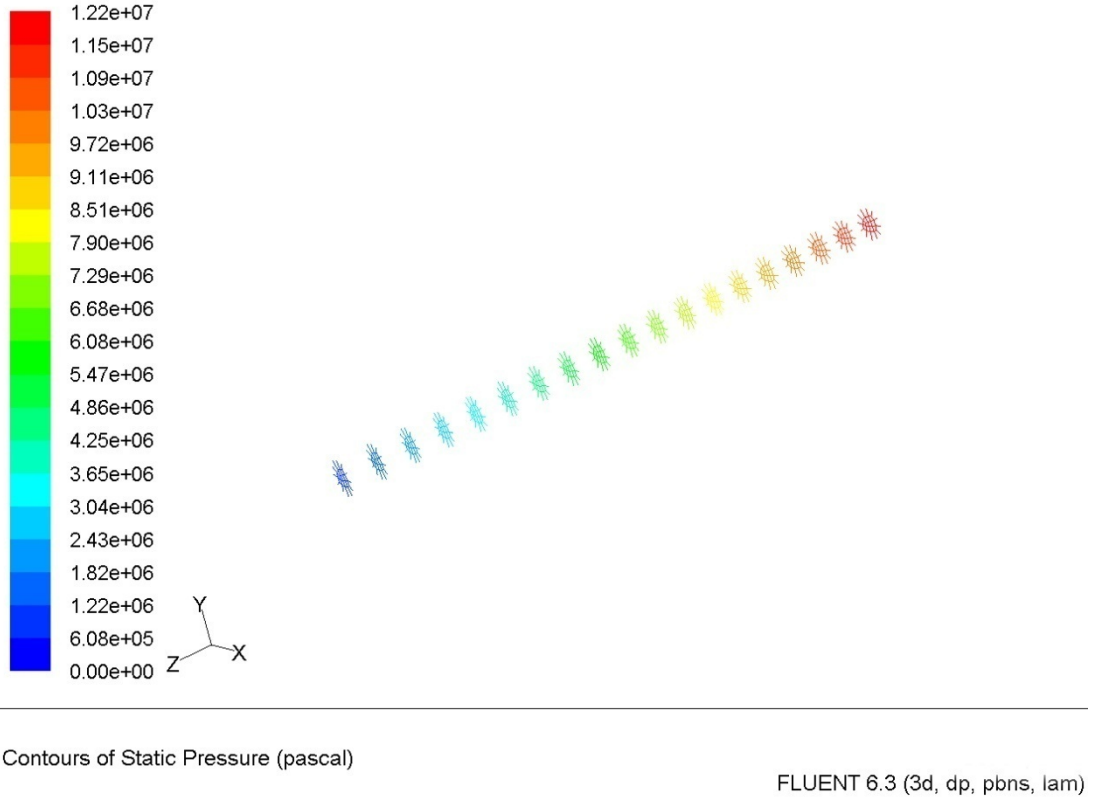
Bu sonuçlarla birlikte görülmektedir ki 50 µm, 76 µm ve 101 µm adyabatik şartlardaki mikroborularda laminar akış bölgesinde Fluent programı ile elde edilen sonuçlarda basınç düşüşü için Hagen-Poiseuille denklemi ve deney sonuçları arasında uyumluluk gözlenmiştir fakat sıcaklık artışı için Fluent programı sonuçları ile Morini denklemi ve deneysel sonuçlar arasında basınç düşüşündeki gibi bir uyum elde edilememiştir.

6.3. Sıcaklık Artışı ve Basınç Düşüşü İçin Vektör ve Kontür Grafikleri

Fluent programı ile elde edilen Adyabatik ve çapları 50 µm, 76 µm ve 101 µm olan mikro borular için grafikler aşağıda gösterilmiştir.

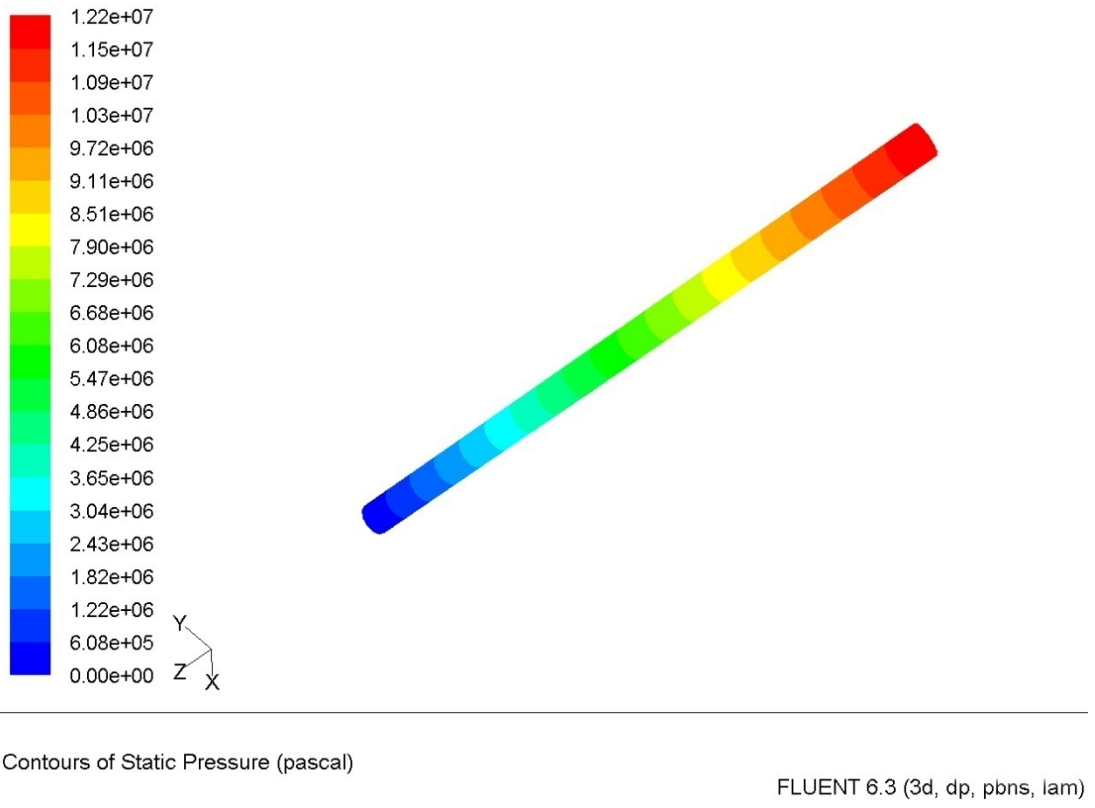
6.3.1. 50 μm \AA apındaki mikroboru için grafikler

50 μm mikroboruda 10 m/s akışkan giriş hızı için elde edilen boru boyunca basınç dağılımı ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı grafikleri sunulmuştur.



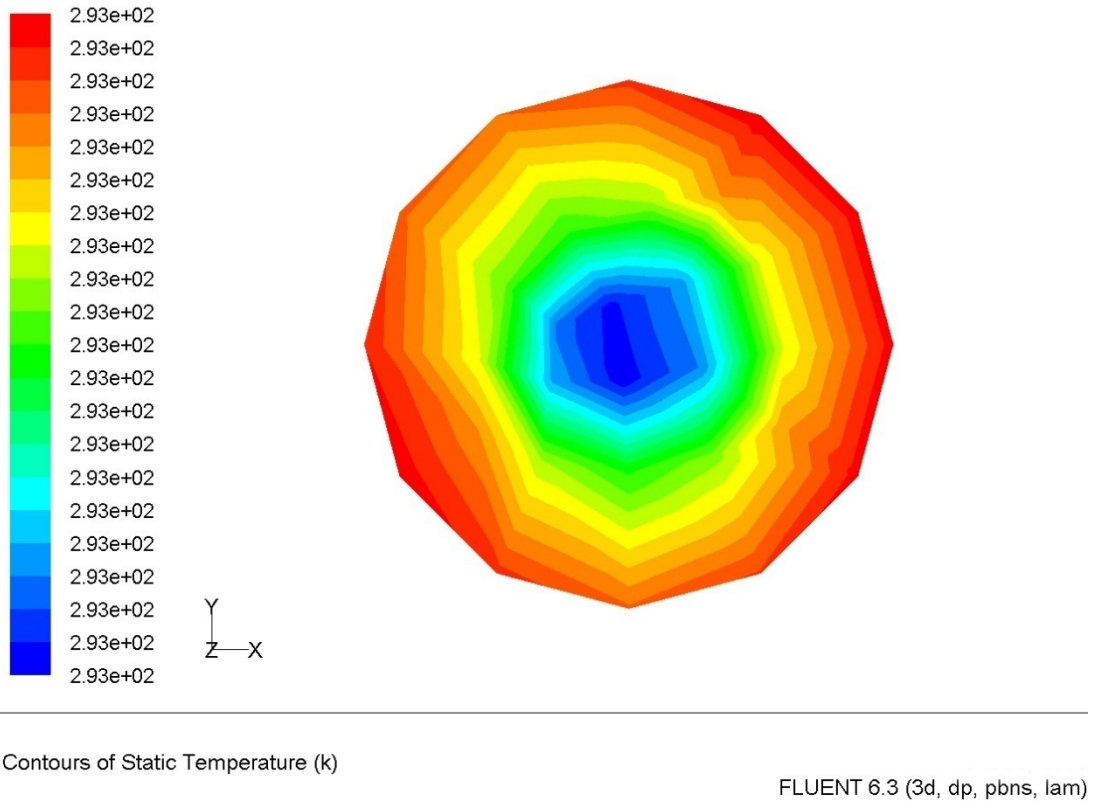
Şekil 6.11. 50 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi

Şekil 6.11.'de 50 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi görölmektedir, şekilde göröldüğü gibi boru girişinde basınç en yüksek değerindeyken boru çıkışına doğru azalarak devam etmektedir.



Şekil 6.12. 50 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı

Şekil 6.12.'de 50 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı görülmektedir. Boru giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşüşü bu grafikte de izlenebilmektedir.

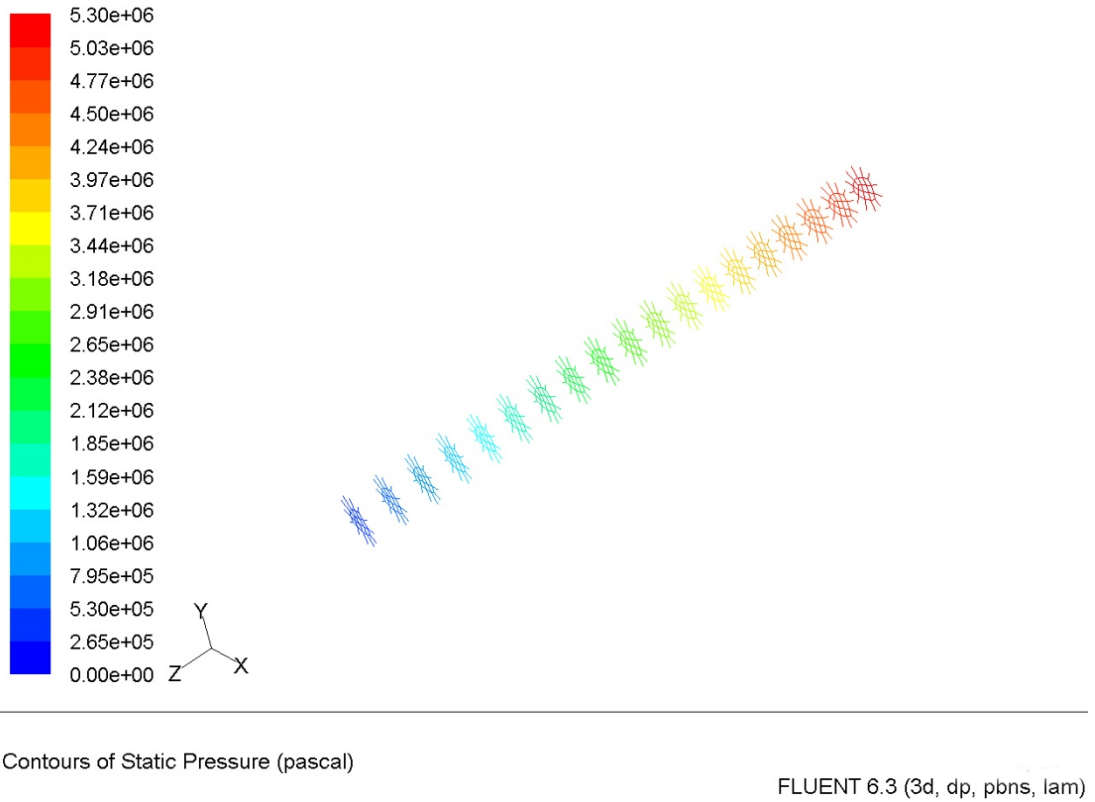


Şekil 6.13. 50 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 6.13.'de 50 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Boru girişinde sıcaklık en düşük seviyesindedir, çıkışa doğru sıcaklık artışı gerçekleşmektedir, her ne kadar deney sonuçları ve Morini denklemi sonuçlarıyla Fluent sonuçları arasında uyum sağlanamamış ve sıcaklık artışı değerleri daha düşük elde edilmiş olsa da, şekilde görüldüğü gibi sıcaklığın merkezden cidara doğru artışı bu sonuçlarda da gözlemlenebilmektedir.

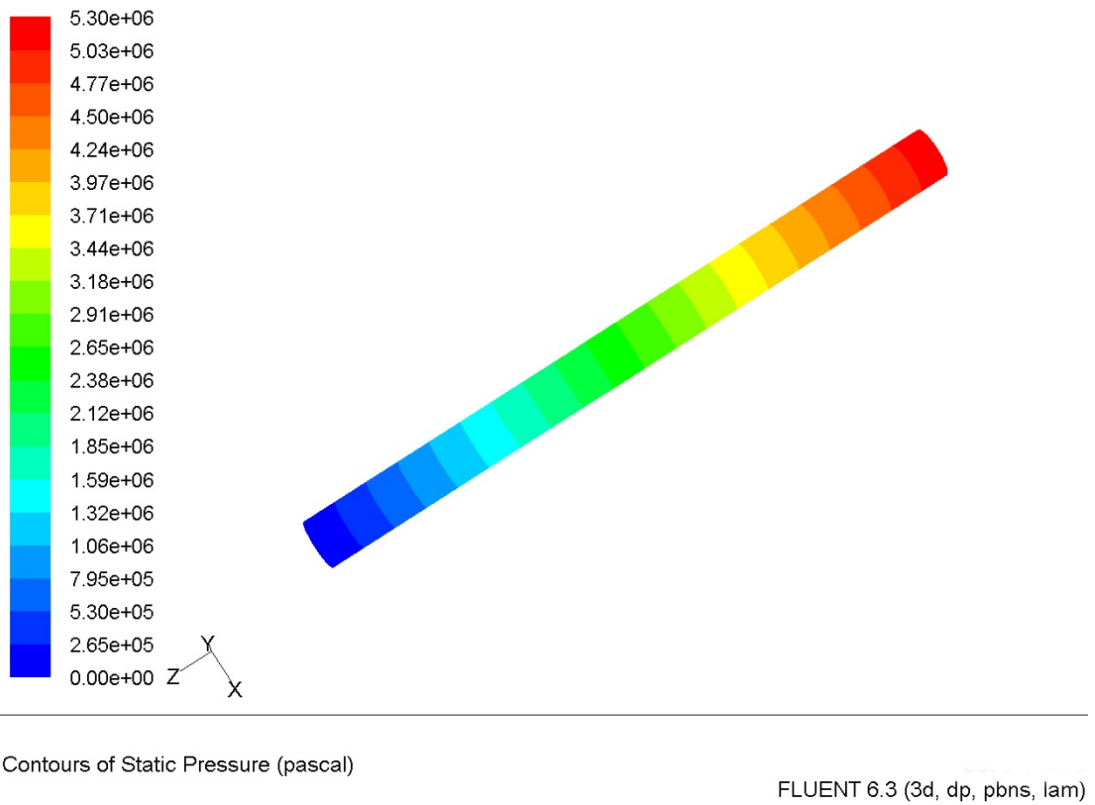
6.3.2. 76 µm çapındaki mikroboru için grafikler

76 µm mikroboruda 10 m/s akışkan giriş hızı için elde edilen boru boyunca basınç dağılımı ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı grafikleri sunulmuştur.



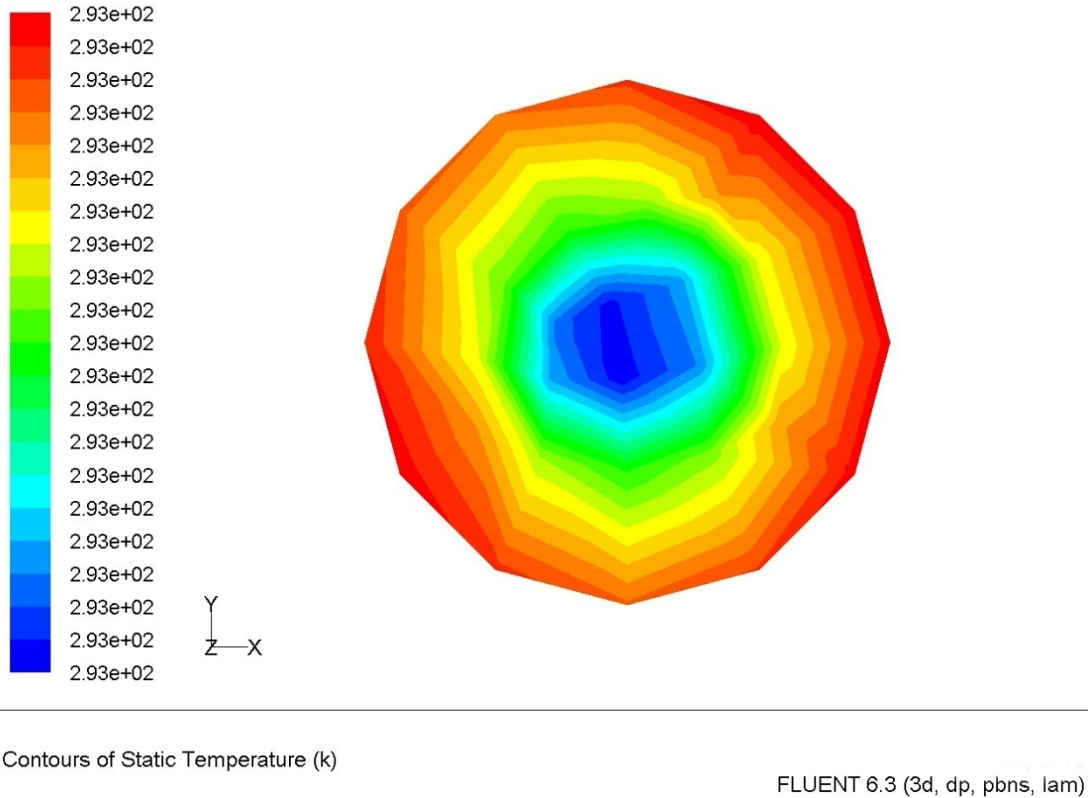
Şekil 6.14. 76 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi

Şekil 6.14.'de 76 µm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi görülmektedir, 50 µm borudaki gibi boru girişinde basınç en yüksek değerindeyken boru çıkışına doğru azalarak devam etmektedir. Bu da grafikten izlenebilmektedir.



Şekil 6.15. 76 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı

Şekil 6.15.'de 76 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı görülmektedir. Boru giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşüşü bu grafikte de izlenebilmektedir.

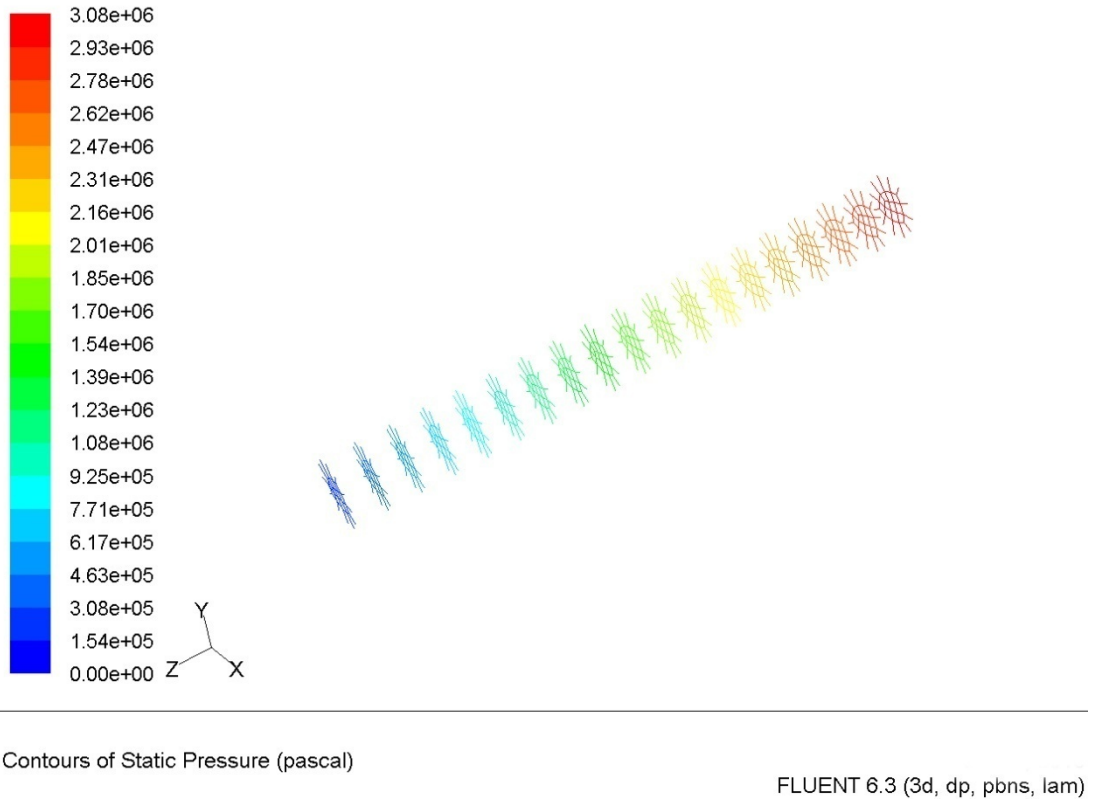


Şekil 6.16. 76 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 6.16.'de 76 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. 50 μm için elde edilen grafiğe benzer bir görünüm burada da ortaya çıkmıştır. Boru girişinde sıcaklık en düşük seviyesindedir, çıkışa doğru sıcaklık artışı gerçekleşmektedir, her ne kadar deney sonuçları ve Morini denklemi sonuçlarıyla Fluent sonuçları arasında uyum sağlanamamış ve sıcaklık artışı değerleri daha düşük elde edilmiş olsa da, şekilde görüldüğü gibi sıcaklığın merkezden cidara doğru artışı bu sonuçlarda da gözlemlenebilmektedir.

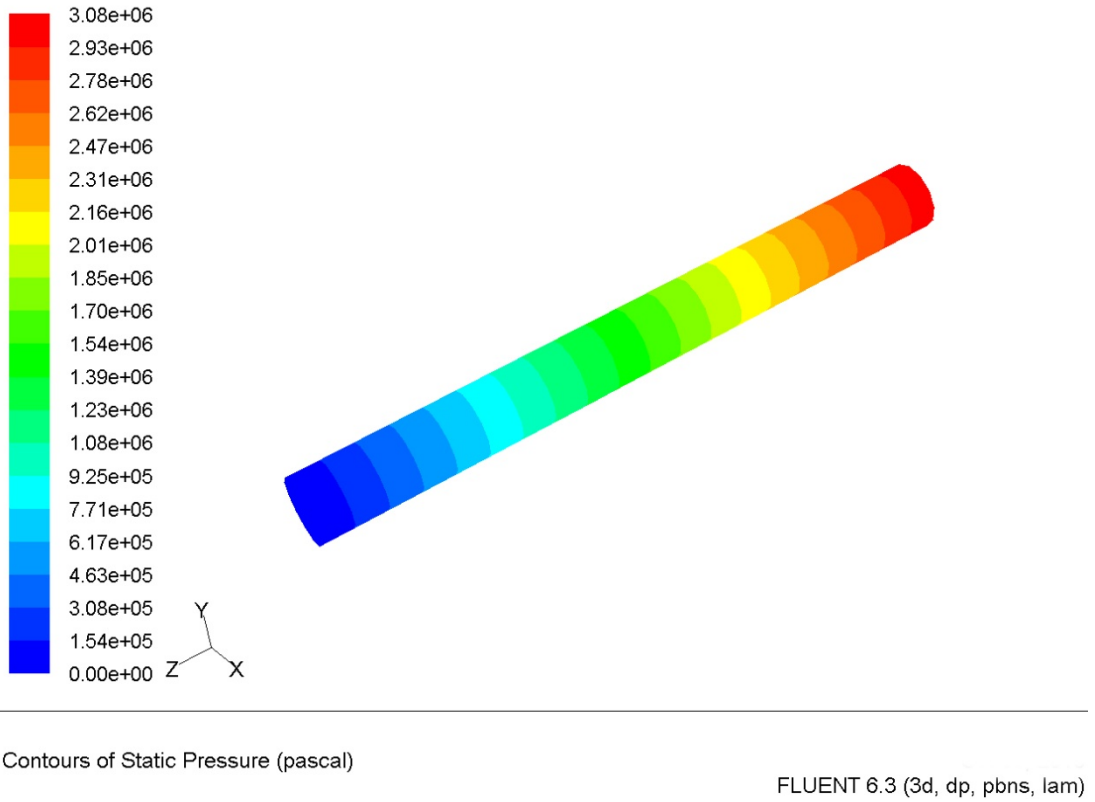
6.3.3. 101 μm çapındaki mikroboru için grafikler

101 μm mikroboruda 10 m/s akışkan giriş hızı için elde edilen boru boyunca basınç dağılımı ve boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı grafikleri sunulmuştur.



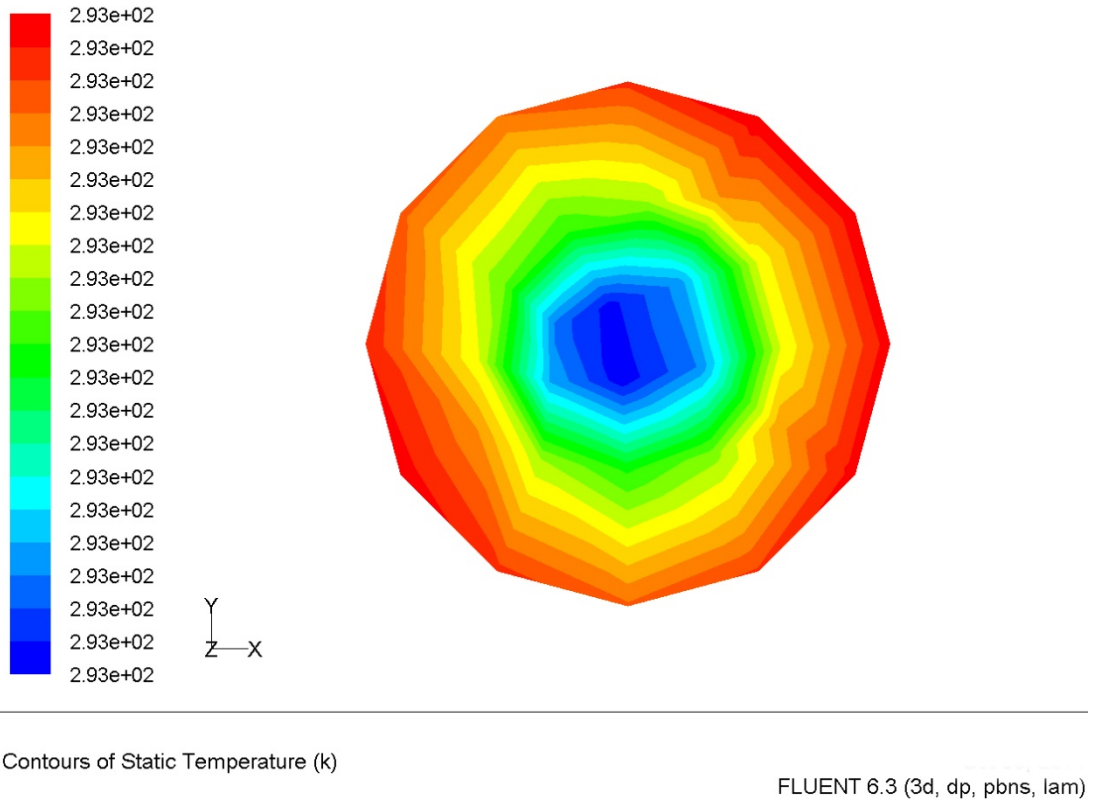
Şekil 6.17. 101 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi

Şekil 6.17.'de 101 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç değişimi görülmektedir, 50 μm ve 76 μm borudaki gibi boru girişinde basınç en yüksek değerindeyken boru çıkışına doğru azalarak devam etmektedir. Bu da grafikten izlenebilmektedir.



Şekil 6.18. 101 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı

Şekil 6.18.'de 101 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru boyunca basınç dağılımı görülmektedir. Boru giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşüşü bu grafikte de izlenebilmektedir.



Şekil 6.19. 101 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkışındaki sıcaklık dağılımı

Şekil 6.19.'de 101 μm mikroboruda Fluent ile elde edilen boru çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. 50 μm ve 76 μm için elde edilen grafiğe benzer bir görünüm burada da ortaya çıkmıştır. Boru girişinde sıcaklık en düşük seviyesindedir, çıkışa doğru sıcaklık artışı gerçekleşmektedir, her ne kadar deney sonuçları ve Morini denklemi sonuçlarıyla Fluent sonuçları arasında uyum sağlanamamış ve sıcaklık artışı değerleri daha düşük elde edilmiş olsa da, şekilde görüldüğü gibi sıcaklığın merkezden cidara doğru artışı bu sonuçlarda da gözlemlenebilmektedir.

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada laminer akış bölgesinde 50 μm , 76 μm , 101 μm çaplarında 100mm boyunda pürüzsüz adyabatik mikro borular için bir ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Fluent ile analiz yapılmış olup çıkan sonuçlar deneysel sonuçlar ile mevcut bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar da basınç düşüşü ve viskoz ısınma üzerine olmuştur.

Çalışma sonuçlarında görülmüştür ki, çap küçüldükçe basınç düşüşü değerlerinde bir artış mümkün olmaktadır ve bu sonuçlarda teorik bağıntılar ve deneysel veriler ile önemli ölçüde uyum içerisinde olmuştur. Fakat viskoz ısınma sebebiyle gerçekleşmesi beklenen sıcaklık artışı deney sonuçlarındaki artış kadar yüksek değerlerde çıkmamıştır. Bu sonuç bize göstermektedir ki kullanılan model ile Fluent kullanılarak yapılan bu çalışmada basınç düşüşü değerlerinde Hagen-Poiseuille denklemi ve deney sonuçları arasında uyum gözlemlenebilmiştir. Fakat sıcaklık artışında sonuçlar deney sonuçları ile ve de Morini denklemi ile uyumlu değildir.

Bu sebeplerden dolayı mikrokanallar için viskoz ısınmadan dolayı oluşan sıcaklık artışını Fluent programı ile elde edebilmek için modelleme aşamasında gerekli ise değişikliklerin yapılması ve programda sabit veya yardımcı denklemlerin kullanıldığı kaynak verilerinin kullanılması gerekliliği göz önünde bulundurulmalı ve buna bağlı sonuçlar incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] PARLAK, N., Mikro kanallarda akış ve ısı geçişinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2010.
- [2] CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M., Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları, Çeviri Editörü: ENGIN, T., İzmir Güven Bilimsel Kitabevi, İzmir, 2008.
- [3] SHARP, K.V., ADRIAN, R.J., Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes, TAM Reports 1030, University of Illinois at Urbana-Champaign, Collage of Engineering. 2003.
- [4] PFUND, D., RECTOR, D., SHEKARRIZ, A., Pressure drop measurements in a microchannel, AIChE J., Vol.46, No.8: 1496-1507, 2000.
- [5] LIU, D., GARIMELLA, S., Investigation of liquid flow in microchannels, AIAA Paper, 2002-2776, AIAA, New York., 2002.
- [6] MORINI, G.L., Viscous heating in liquid flows in microchannels. Int. J. Heat Mass Transfer, 48:3637-3647, 2005.
- [7] BEJAN, A., Convection Heat Transfer, second edition, Wiley, New York, 1995.
- [8] KANDLIKAR, S.G., Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 26 (2):389-407, 2002.
- [9] WU, P., LITTLE, W.A., Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature joule-thompson refrigerators. Cryogenics, 23:273- 277, 1983.
- [10] MORINI, G.L., LORENZINI, M., SALVIGINI, S., Friction characteristics of compressible gas flows in microtubes, Exp. Thermal and Fluid Science, 30: 733-744, 2006.
- [11] SHARP, K.V., ADRIAN, R.J., Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes, Experiments in Fluids, 36: 741-747, 2004.

- [12] RANDS, C., WEBB, B.W, MAYNES, D., Characterization of transition to turbulence in microchannels, *Int. J. Heat and MassTransfer*, 49: 2924-2930, 2006.
- [13] BAVIERE, R., MARINET, M.F., LE PERSON, S., Bias effect on heat transfer measurments in microchannel flows, *Int. J. Heat and MassTransfer*, 49: 3325-23337, 2006.
- [14] MALA, GH. M., LI D., Flow characteristics of water in microtubes, *Int.J. of Heat and Fluid Flow*, 20: 142-148, 1999.
- [15] HARMS, T.M., KAZMIERCZAK, M.J., GERNER, F.M, Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 20: 149-157, 1999.
- [16] XU, B., OOI, K.T., WONG, N.T., Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels, *Int. Comm..Heat and MassTransfer*, 27: 1165-1176, 2000.
- [17] LI, ZX, DU, D.X., GUO, Z.Y., Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes. *Microscale Thermophysical Eng* 7:253–265, 2003.
- [18] MORINI, G.L., Laminar to turbulent flow transition in microchannels, *Microscale Thermophys. Eng.*, 8: 15–30, 2004.
- [19] CELETA, G., CUMO, M., MCPHAIL, S., ZUMMO, G., Characterization of fluid dynamic behaviour and channel wall effects in microtube. *International Journal Of Heat Fluid Flow*, 27: 135-143, 2005.
- [20] SHEN, S., XU, J. L., ZHOU, J. J., CHEN, Y., Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47: 1311-1325, 2006.
- [21] LI, Z., He Y., TANG G., TAO, W., Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50: 3447–3460, 2007.
- [22] XU, B., OOI, K. T., MAVRIPLIS, C., ZAGHLOUL, M. E., Evaluation of viscous dissipation in liquid flow in microchannels, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13: 53-57, 2003.
- [23] CELATA, G.P., CUMO, M. MCPHAIL, S. ZUMMO, G., Characterization of fluid dynamic behaviour and channel wall effects in microtube. *Int. J. Heat and Fluid Flow* , 27: 135–143, 2006.

- [24] CENGEL, Y.A., Heat and mass transfer: A Practical Approach, McGraw Hill, Boston: 265-270, 2007.
- [25] KARAMANOGLU, Y., MOBEDI, M., ERTÖZ, A.O., Pompa tasarımının geliştirilmesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanılması, Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı 91: 46-55, 2006.
- [26] BUYRUK, E., CAN, A., KAPTAN, Y., Bilgisayar destekli makine mühendisliği uygulamaları, 5. ulusal makine mühendisliği ve eğitimi sempozyumu (7-8 Kasım), Raporlar ve Bildiriler Kitabı, İstanbul: 261-263, 2003.
- [27] Fluent, Fluent v6.0 Introductory Fluent Notes, 2002.
- [28] COMAKLI, O., YILMAZ, M., KARSLI, S., SAHIN, B.C., KAYA, M.S., Isı transfer iyileştirmesi ve iki fazlı akış kararsızlıkları, TÜBİTAK MAG Proje 105M026: 58-61, 2007.
- [29] <http://www.anova.com.tr> , 2010

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Esat GÜNEY, 12.07.1984 de Kayseri' de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kayseri'de tamamladı. 2002 yılında Kayseri Fen Lisesi' nden mezun oldu. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümüne başladı ve 2007 yılında mezun oldu. 2007-2008 yılları arasında Pozitif Mühendislik İnş. Taah. San. ve Tic. Ltd. Şti. 'de mühendis olarak çalıştı. Bu süre içerisinde çeşitli mekanik tesisat projelendirilmesinde ve şantiyelerinde görev yaptı. 2008 yılında İSKİ' de göreve başladı. Şu anda İSKİ Atıksu Arıtma Tesisleri İnşaatı Müdürlüğü' nde kontrol mühendisi olarak görev yapmaktadır.