

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ FAZLI AKIŞLARA SAYISAL YÖNTEMLERİN
UYGULANMASI**

Mak. Müh. İbrahim Utku BAŞYAZICI

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail Teke

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
2 İKİ FAZLI AKIŞLARA GENEL BAKIŞ	2
3 İKİ FAZLI AKIŞLAR İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR	3
3.1 İki Fazlı Akışın Temel Değişkenleri	3
3.2 İki Fazlı Akış Mekanizmasında Etkili Kuvvetler	5
3.3 İki Fazlı Akışlar İçin Çözümleme Yaklaşımları	6
3.3.1 Homojen Akış Modeli	6
3.3.2 Ayrık Akış Modeli	7
3.3.3 Akış Haritası Modelleri	7
3.4 İki Fazlı Akışta Basınç Düşüşünün Hesaplanması	7
3.4.1 İki Fazlı Akışta Basınç Düşüşü İfadesi	9
3.4.2 Lockhart Martinelli Korelasyonu	10
3.4.3 Friedel Korelasyonu	12
3.4.4 Grönnerud Korelasyonu	13
3.4.5 Chisholm Korelasyonu	13
4 İKİ FAZLI AKIŞLARDA AKIŞ REJİMLERİ ve AKIŞ HARİTALARI	15
4.1 Dikey Borularda Akış Rejimleri	15
4.2 Yatay Borularda Akış Rejimleri	17
4.3 Akış Haritaları	21
5 İKİ FAZLI AKIŞLARIN SAYISAL ANALİZİ	24
5.1 Literatür Taraması	24
5.2 Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniğine Giriş	30
5.2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Metodolojisi	30
5.2.2 Akışkan Hareketinin Temel Denklemleri	31
5.2.2.1 Süreklilik Denklemi	32

5.2.2.2	Momentum Denklemi	33
5.2.2.3	Enerji Denklemi	35
5.2.3	Sonlu Hacim Metoduna Giriş ve Sürekli Ortam Mekaniğinde Sayısal Yöntemler	37
5.2.3.1	Sonlu Farklar Yöntemi	37
5.2.3.2	Sonlu Elemanlar Yöntemi	37
5.2.3.3	Sınır Elemanlar Yöntemi	38
5.2.3.4	Sonlu Hacim Yöntemi	38
5.3	Sonlu Hacim Metodunun İncelenmesi	39
5.3.1	Çözüm Alanının Ayrıklaştırılması	39
5.3.2	Akış Denklemlerinin Çözümünde Kullanılan Temel Yaklaşımlar	41
5.3.2.1	Ayrık Çözüm Algoritması	42
5.3.2.2	Bütünleşik Çözüm Algoritması	43
5.3.3	Akış Denklemlerinin Ayrıklaştırılması	43
5.3.3.1	Birinci Dereceden Akış Yönü Metodu	45
5.3.3.2	Üs Kanunu Yaklaşımı	45
5.3.3.3	İkinci Dereceden Akış Yönü Metodu	47
5.3.3.4	QUICK Yaklaşımı	47
5.3.3.5	Merkezi Ayrıklaştırma Şeması	48
5.3.3.6	Ayrıklaştırma Şemasının Seçilmesi	49
5.3.3.7	Ayrıklaştırılmış Denklem Sisteminin Elde Edilmesi	49
5.3.4	Çözüm Metodlarının İncelenmesi	50
5.3.4.1	Basıncın Enterpolasyonu	51
5.3.4.2	Basınç ve Hızın Eşleştirilmesi İçin Algoritmalar	51
5.3.4.3	Yakınsama Kriteri ve Rahatlatma Parametreleri	53
5.3.4.4	Nümerik Difüzyon	54
5.3.4.5	Zamana Bağlı Analizler	55
5.4	Türbülans Modelleri	55
5.4.1	Türbülans Modelinin Seçimi	56
5.4.2	k-ε Türbülans Modeli	57
5.4.3	Cidar Kenarında Akışın Modellenmesi	61
5.5	İki Fazlı Akışların Sayısal Çözümü İçin Modeller	64
5.5.1	İki Fazlı Akış Modellerinin Sınıflandırılması	65
5.5.1.1	Euler - Lagrange Yaklaşımı	65
5.5.1.2	Euler – Euler Yaklaşımı	66
5.5.1.2.1	VOF Modeli	66
5.5.1.2.2	Karışım Modeli	66
5.5.1.2.3	Eulerian Model	67
5.5.2	İki Fazlı Akış Modelinin Seçimi	67
5.5.3	VOF Modelinin İncelenmesi	69
5.5.3.1	Hacimsel Oran Denklemi	70
5.5.3.2	Fiziksel Özellikler	71
5.5.3.3	Momentum Denklemi	71
5.5.3.4	Enerji Denklemi	71
5.5.3.5	Arayüzey Geometrisinin Tespiti İçin Algoritmalar	72
5.5.3.5.1	Geometrik Yeniden Yapılandırma	73
5.5.3.5.2	Alıcı –Verici Şeması	74
5.5.3.5.3	Açık Euler Şeması	75
5.5.3.5.4	Kapalı Şema	76

	Sayfa
6	YATAY SİLİNDİRİK BORULARDA HALKA AKIŞIN MODELLENMESİ... 77
6.1	Sayısal Çözüm Ağının Oluşturulması 77
6.2	Sınır Koşullarının Tanımlanması ve Çözücü Ayarlarının Yapılması..... 80
7	ANALİZ SONUÇLARI 84
7.1	Fazlararası Arayüzey Geometrisi 84
7.2	İki Fazlı Basınç Düşüşleri..... 88
8	SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 95
KAYNAKLAR..... 97	
ÖZGEÇMİŞ..... 102	

SİMGE LİSTESİ

A	Akış kesit alanı, m ²
B	Chishlom değişkeni
C	Martinelli sabiti
d _i	Boru iç çapı, m
E	Fridel parametresi
F	Fridel parametresi
f	Fanning sürtünme faktörü
f _{Fr}	Froude sürtünme faktörü
g	Yerçekimi ivmesi, m/s ²
G	Kütlesel akı, kg/m ² .s
G _b	Sıcaklık gradyeni ile oluşan türbülans kinetik enerjisi
G _k	Ortalama hız gradyenin oluşturduğu türbülans kinetik enerjisi
H	Fridel faktörü
h	Entalpi, J/kg
h _{sg}	Faz geçiş entalpisi, J/kg
k	Türbülans kinetik enerjisi
L	Uzunluk, m
\dot{m}	Kütlesel debi, kg/s
N _{yüzeyler}	Yüzey sayısı
\vec{n}	Kontrol sınırına dik birim vektör
p	Basınç, Pa
dp/dz	Basınç gradyeni, Pa
Δp_{Toplam}	Toplam basınç düşüşü, kPa
Δp_{Statik}	Statik basınç düşüşü, kPa
$\Delta p_{\text{Momentum}}$	Momentum basınç düşüşü, kPa
$\Delta p_{\text{Sürtünme}}$	Sürtünme basınç düşüşü, kPa
Q	Hacimsel debi, m ³ /s
R	Yarıçap, m
R _p	İki iterasyon arasındaki fark
q	Statik kütle kurulum oranı
s	Kayma
\bar{S}_{ij}	Ortalama şekil değiştirme tensörü

$\Delta \vec{s}$	Yerdeğiştirme vektörü
t	Zaman, sn
Δt	Zaman farkı, sn
u	Kartezyen koordinat sisteminde x doğrultusundaki hız
u^*	Sürtünme hızı
u^+	Boyutsuz hız
U_i	Ortalama hız bileşeni
X_{tt}	Martinelli parametresi
x	Dinamik kütle kurulum oranı
V	Kontrol hacmi
v	Kartezyen koordinat sisteminde y doğrultusundaki hız
w	Kartezyen koordinat sisteminde z doğrultusundaki hız
Y	Chishlom parametresi
Y_M	Sıkıştırılabilir akışta genişlemenin genel viskoz kayıp terimine katkısı
y^+	Cidardan boyutsuz mesafe

Yunan sembolleri

α	Boşluk Oranı
α_p	Bir p akışkanın hacimsel oranı
β	Hacimsel kurulum oranı
Γ	Difüzyon katsayısı
δ	Tabaka kalınlığı
ε	Viskoz kayıp terimi
λ	Rahatlatma parametresi
μ	Dinamik viskozite, N.s/m ²
μ_t	Türbülans viskozitesi
μ_{eff}	Efektif viskozite
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
ρ_h	Homojen yoğunluk, kg/m ³
σ	Yüzey gerilimi, N/m
τ	Viskoz gerilme tensörü
τ_{ij}	Gerilme tensörü bileşeni
τ_w	Cidar kayma gerilmesi

\emptyset	Skaler değişken
Φ_{tt}	Martinelli iki fazlı akış çarpanı
Φ_o	İki fazlı akış çarpanı
Φ_{gd}	Grönnerud iki fazlı akış çarpanı
x	Mesafe

Boyutsuz Sayılar

Fr	Froude sayısı
Pe	Peclect sayısı
Re	Reynolds sayısı
We	Weber sayısı

Altındisler

f	Yüzey
g	Gaz
s	Sıvı
sf	Superficial

KISALTMA LİSTESİ

AMG	Cebirsel Çoklu Grid Metodu (Algebraic Multigrid Method)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
DNS	Direkt Nümerik Simulasyon (Direct Numerical Simulation)
DPM	Ayrık Faz Modeli (Discrete Phase Model)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
LES	Büyük Girdap Simulasyonu (Large Eddy Simulation)
PISO	Ayırma Operatörleri ile Kapalı Basınç Hız Eşleştirme Şeması (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)
PRESTO	Basınç Enterpolasyonu İçin Farklı Zamanlara Göre Düzenleme Opsiyonu (PREssure STaggering Option)
QUICK	Kuadratik Akış Yönü Metodu (Quadratic Upwind Scheme)
RSM	Reynolds Stres Modeli
RNG	Renormalizasyon Grup
SIMPLE	Basınç Enterpolasyonu İçin Yarı Kapalı Metod (Semi-Implicit Method for Pressure)
SIMPLEC	Basınç Enterpolasyonu İçin Yarı Kapalı Metod Varyantı (Simple-Consistent)
UDF	Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar (User Defined Functions)
VOF	Akışkan Hacmi İki Fazlı Modeli (Volume of Fluid)
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 4.1	Dikey borularda akış rejimleri (Collier ve Thome 1996) 15
Şekil 4.2	Dikey ısıtılmış kanallarda akış rejimleri (Collier ve Thome 1996) 16
Şekil 4.3	Yatay borularda akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)..... 17
Şekil 4.4	Halka akış rejiminde akış profili (Adechy ve Issa 1999)..... 18
Şekil 4.5	Halka ve kabarcıklı akış rejimleri (\\http.microgravity.grc.nasa.gov 2003) ... 19
Şekil 4.6	Yatay boru içinde kaynamada akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)..... 19
Şekil 4.7	Yatay boru içinde yüksek kütleli akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)..... 20
Şekil 4.8	Yatay boru içinde düşük kütleli akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)..... 20
Şekil 4.9	Yatay boru içinde akış Baker 1954 (Collier ve Thome 1996)..... 21
Şekil 4.10	Dikey boru içinde akış Hewitt ve Roberts 1969 (Collier ve Thome 1996) 22
Şekil 4.11	Soğutucu akışkan R134a ve doyma sıcaklığı 40°C için Cavallini modelinin 8mm çapındaki yatay boruda uygulanması(Cavallini,2003) 23
Şekil 5.1	Sayısal ağ üretiminde kullanılan eleman tipleri (Marshall ve Bekker 2003)... 39
Şekil 5.2	Yapısal sayısal ağ geometrisi (2D ve 3D) (Marshall ve Bekker 2003) 40
Şekil 5.3	Hibrid sayısal ağ geometrisi (Çengel – Cimbala 2006)..... 41
Şekil 5.4	Ayrık çözüm algoritması (Fluent User Guide 2005) 42
Şekil 5.5	Bütünleşik çözüm algoritması (Fluent User Guide 2005) 43
Şekil 5.6	Kontrol hacmi (Fluent User Guide 2005)..... 45
Şekil 5.7	Ø skaler büyüklüğünün x ile değişimi (Fluent User Guide 2005)..... 46
Şekil 5.8	Bir Boyutlu Kontrol Hacmi (Fluent User Guide 2005)..... 48
Şekil 5.9	İki boyutlu sayısal çözüm ağı (Marshall ve Bekker 2003) 49
Şekil 5.10	Cidar yakınında türbülanslı akış (Fluent User Guide 2005) 62
Şekil 5.11	Cidar yakınında duvar fonksiyonu ve modelleme yaklaşımı (Fluent User Guide 2005) 63
Şekil 5.12	α_p Akışkanın sayısal ağ içindeki konumu..... 70
Şekil 5.13	Arayüzey hesaplamaları (Fluent User Guide 2005)..... 73
Şekil 5.14	Gerçek ve yeniden yapılandırılmış arayüzey geometrisinin karşılaştırılması .. 73
Şekil 5.15	Arayüzey hücresi (Welch ve Wilson 2000) 74
Şekil 5.16	Gerçek arayüzey geometrisi ile alıcı – verici şemasının karşılaştırılması 75
Şekil 6.1	50 mm uzunluğundaki model için sayısal çözüm ağı 78
Şekil 6.2	2D Eksenel simetrik model ve sınır koşulları (R _{sıvı} :0,5mm R _{gaz} :3,5mm) 78
Şekil 6.3	80 mm uzunluğundaki model için sayısal çözüm ağı 79
Şekil 6.4	80 mm uzunluğundaki model için sınır tabakada sayısal ağ..... 79
Şekil 6.5	Yerçekimi etkisinde göre sıvı filmi dağılımı (Hurlburt ve Newell, 1997) 81
Şekil 6.6	Δt zamanında akışkanın hareketi 82
Şekil 7.1	Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-1 t=0,14s (50mm)..... 84
Şekil 7.2	Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-2 t=0,14s (50mm)..... 85
Şekil 7.3	Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-1 t=0,23s (80mm) 85
Şekil 7.4	Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-2 t=0,23s (80mm) 86
Şekil 7.5	Giriş bölgesi sıvı ve gaz hacimsel oranları t=0,25s (80mm) 86
Şekil 7.6	Çıkış bölgesi sıvı ve gaz hacimsel oranları t=0,25s (80mm)..... 87
Şekil 7.7	Dalga tepesinin kopması t=0.23sn (80mm) 88
Şekil 7.8	Çeşitli x koordinatlarında radyal hız dağılımı. (50mm)..... 89
Şekil 7.9	x =20 mm koordinatında radyal hız dağılımı (50mm)..... 90
Şekil 7.10	Çeşitli x koordinatlarında radyal hız dağılımı (80mm)..... 90
Şekil 7.11	x =20 mm koordinatında radyal hız dağılımı (80mm)..... 91

	Sayfa
Şekil 7.12	Halka akışta hız profili..... 91
Şekil 7.13	Hız profili $t=0.25$ (80mm) 92
Şekil 7.14	Her 10mm'deki basınç farkı (50mm) 92
Şekil 7.15	Boru boyunca toplam basıncın dağılımı (50mm) 93
Şekil 7.16	Boru boyunca toplam basıncın dağılımı (80mm) 94
Şekil 8.1	Dalga tepelerinin kopması 95

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1	Martinelli sabiti (Collier ve Thome 1996)..... 11
Çizelge 3.2	B Değişkeninin hesaplanması..... 14
Çizelge 5.1	Gaz sıvı akış rejimleri için modeller..... 68
Çizelge 5.2	İki fazlı akış modellerinde çözülen denklemler..... 68
Çizelge 6.1	40 °C için R134a fiziksel özellikleri..... 81

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin tamamlanması sürecinde yaşadığım bazı olumsuzluklara rağmen değerli bilgi, görüş ve düşünceleriyle bana devamlı yol gösteren ve cesaretlendiren tez danışmanın Sn. Prof. Dr. İsmail Teke'ye tüm tez süreci boyunca desteğini hiç esirgemeyen ve bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük katkısı olan Sn. Yük. Mak. Müh. Özden Ağra'ya sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Yine bu çalışmanın ortaya çıkmasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek bana yardımcı olan Mak. Müh. Ilgaz Yıldız ve Mak. Müh. Yıldırım Adıgüzel'e, bugünlere gelmemi sağlayan aileme ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mak. Müh. İbrahim Utku Başyazıcı

ÖZET

Endüstride sıklıkla rastlanan gaz – sıvı akış rejimleri üzerinde uzun yıllardır çalışılmaktadır. İki fazlı akışlarda sayısal yöntemler deneysel yöntemlere bir alternatif olarak araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Ancak bu teknoloji iki fazlı akışların analizi konusunda henüz olgunluğa erişmemiştir.

Bu çalışmada da sonlu hacim metodu tabanlı Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği teknolojisinin iki fazlı akışlara uygulanabilirliği incelenerek iki fazlı basınç düşüşleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ele alınan akışkan R134a'dır ve bu akışkanın yatay borudaki iki fazlı akış karakteri incelenmiştir. İki fazlı basınç düşüşlerinin sayısal yöntemlerle hesaplanabilmesi özellikle iklimlendirme ekipmanlarının dizaynında ve yeni soğutucu akışkanlarla yapılacak çalışmalarda araştırmacılara büyük fayda sağlayabilir. İkincil olarak ta halka akışta güncel araştırmalara konu olan fazlararası arayüzey dinamiği incelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği teknolojisinin iki fazlı akışlar için uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve sonuçların optimizasyonu için öneriler yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: HAD, İki fazlı akış, Halka akış, Basınç Düşüşü,R134a.

ABSTRACT

Two-phase flow regimes of gases and liquids is frequently encountered in industry and has been studied intensively for many years. Numerical methods become more interesting for researchers as an alternative to empirical methods in two phase flows. However, this technology couldn't become mature about two phase flow analysis yet.

In this study, two phase pressure drops have been calculated and compared with the experimental results by researching the Fluent CFD software, which is based on finite volume method and the feasibility of CFD technology for two phase flows. The fluid taken into consideration is R134a and the two phase flow characteristics of this fluid in horizontal pipe has been investigated. Being able to calculate two phase pressure drops through numerical methods would be very beneficial for especially designing of HVAC equipments and for the researchers to make studies on new refrigerants. Also in this study interface dynamics, which is the subject of current researches on annular flow is examined.

As a result of this study the feasibility of CFD technology for two phase flow has been evaluated and suggestions for optimisation of results have been submitted.

Keywords: CFD, Two phase flow, Annular flow, Pressure drop, R134a.

1 GİRİŞ

İki fazlı akışlar yağmur damlalarının hava içindeki hareketi, buz oluşumu gibi doğal olayların ve birçok endüstriyel prosesin parçasıdır. Kimya, petrol, ilaç, gıda, elektronik ve güç endüstrisinde pek çok farklı iki fazlı akış örneğine rastlanır. Ekonomik dizayn, optimizasyon gereksinimi ve güvenli işletme koşullarının sağlanabilmesi için iki fazlı akışların hidrodinamik ve ısı karakteristیکlerinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi önemlidir. İki fazlı akışların kompleks yapısı ve her işletme koşulunu deneysel yöntemlerle incelemenin zorluğu bu tür akış tiplerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi sonucunu doğurmuştur. Ancak iki fazlı akışların fiziksel modellenmesi kadar sayısal modellenmesi de birçok güçlüğü içinde barındırır. Pek çok akış tipi (Gaz-sıvı, gaz-katı, sıvı-sıvı) ve akış rejimini (Halka, katmanlı akış) içeren yapısı, hareket halindeki fazlar arası arayüzeyler akışın matematiksel formülasyonunu oldukça zor bir hale getirir. Fazlar arası momentum, enerji ve kütle transferinin olduğu yoğunlaşma ve kaynama gibi problemler ise sayısal yöntemlerle ifade edilmesi daha zor olan iki fazlı akış örnekleridir. Genel olarak bakıldığında akışın fiziksel özelliklerindeki zamana bağlı dalgalanmalar ve akıştaki süreksizlikler sayısal yöntemler açısından diğer zorlayıcı faktörlerdir.

Bu çalışmada “Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği” ya da kısa adıyla HAD teknolojisi adı verilen sayısal yöntemin iki fazlı akışlara nasıl uygulanacağı üzerinde durulacaktır. Günümüzde HAD teknolojisi tek fazlı akışlar konusunda olgunluğa erişmiştir ancak validasyonu yapılmış pek çok HAD çözümü mevcut olsa da iki fazlı akışlar ve özellikle faz değişimini içeren problemlerin çözümünü konusunda hala cevap bekleyen birçok soru vardır.

Çalışmanın genelinde HAD teknolojisi ile ilgili terminoloji Türkçeleştirilmeye çalışılmıştır. Ancak konu ile ilgili İngilizce terminolojiye alışık okuyucu için kolaylık olması ve karışıklığı önlemek için gerekli noktalarda Türkçeleştirilen terimlerin İngilizceleri de verilmiştir. Bazı iki fazlı akış modelleri ve çözüm algoritmaları literatürde genellikle kısaltmalar şeklinde anılmaktadır. Bu kısaltmalarda kısaltma listesinde verilmiştir.

2 İKİ FAZLI AKIŞLARA GENEL BAKIŞ

Doğada ve endüstriyel uygulamalarda pek çok akış örneği iki veya daha fazla fazın karışımı şeklinde bulunur. Çok fazlı akış olgusu uzay araştırmalarından, evimizdeki buzdolaplarına kadar çok geniş bir uygulama alanını ifade eder. Özellikle güvenliğin diğer endüstriyel uygulama alanlarına göre daha önemli olduğu nükleer teknoloji ile ilgili çalışmalarda çok fazlı akış ile ilgili araştırmalar ön plandadır.

Tüm iki fazlı akış örneklerinde fazlar arası arayüzey; sıvı - katı, sıvı - sıvı, gaz – sıvı gibi farklı fazlar arasında bir sınır oluşturur. Fazların sürekli enerji, momentum ve kütle transferi yoluyla birbiri ile etkileşimi sonucu fazlar arası arayüzey sürekli olarak değişir ki bu iki fazlı akış problemlerinin tanımlanması en güç yönünü oluşturur. Çeşitli parametrelere bağlı oluşan her bir akış tipi (Halka akış, jet akışı, katmanlı akış vb) farklı çözüm yaklaşımlarını gerektirir. İki fazlı akışlar söz konusu olduğunda pek çok farklı çözüm yöntemi ve yaklaşım mevcuttur. Ancak bu yöntemlerin çoğu pek çok kısıtlamayı ve kabulü içinde barındıran, belli şartlar içinde çözüm sunabilen yaklaşımlardır. Özellikle halka akımdaki dalga oluşumu ve kabarcık teşekkülü gibi fazlar arası arayüzey dinamiği ile ilgili konularda hala kesinlik kazanmamış noktalar vardır. İki fazlı akışlar için genel korunum denklemleri de oldukça kompleks ve zamana bağlı davranışlar gösterir.

Konvektif yoğuşma ve kaynama gibi ısı transferinin olduğu iki fazlı akış örnekleri ise; adyabatik akış tiplerinden farklı olarak ısı transferinden kaynaklı karmaşık özellikler barındırır. Alev – duman borulu ya da su boru kazanlar, iklimlendirme donanımları, ısı değiştiriciler ve nükleer reaktörlerde sistem güvenliği ve performans konvektif ısı transfer sürecinin ne kadar iyi çözümlendiği ile ilgilidir. İzotermal iki fazlı akıştaki parametrelere ek olarak sistemden ısı çekilmesi veya sisteme ısı verilmesi akış rejimini dolayısıyla fazlar arası arayüzeyi ve dahası herhangi bir noktada akışın termal özelliklerini etkileyerek iki fazlı akışın zamana bağlı yapısını daha karmaşık hale getirir. Buna rağmen sağlıklı tasarım için akışın özelliklerindeki değişimin doğru bir şekilde tahmini gereklidir. Proses içinde her nokta için güvenilir bilgi sağlayacak deneysel bilginin eksikliği araştırmacıları sayısal yöntemlerle çözüm aramaya yöneltmiştir.

Her ne kadar iki fazlı akışların sayısal olarak modellenmesi konusunda yaygın çalışmalar olsa da yukarıda belirtilen nedenlerle her türlü akış tipi için uygulanabilir genel amaçlı bir Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği kodu mevcut değildir. Buna rağmen pek çok ticari yazılım paketi iki fazlı akış modelleri sunmakta ve sadece iki fazlı akışlar üzerine uzmanlaşmış HAD

kodlarının geliştirilmesi üzerinde çalışılmaktadır. Bu çalışmada bir gaz –sıvı iki fazlı akış rejimi örneği olan halka akış ele alınacaktır. Kullanılacak hesaplama aracı ise Fluent 6.2.16 yazılımıdır.

3 İKİ FAZLI AKIŞLAR İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

İki fazlı akış farklı özelliklerde iki komponentin karşılıklı etkileşimli hareketi olarak tanımlanabilir.(Kleinstreuer 2003)Bu etkileşimler fazlar arası enerji, momentum ve kütle geçişi şeklinde olabilir ve fazların özellikleri ile ortam şartlarına göre farklı karakterler gösterebilirler. Buna bağlı olarak akışı tanımlama biçimi ve çözüm yaklaşımları da farklılık gösterir. Bu noktada özel çözüm yaklaşımlarının tanımlanmasından önce iki fazlı akışlar ile ilgili genel kavramların irdelenmesinde yarar vardır. İki fazlı akış kavramı çok genel bir çalışma alanını ifade etmektedir, bu sebeple bu çalışmanın kapsamı gaz – sıvı akış rejimleri ile sınırlandırılmış özel olarak ta halka akış ele alınmıştır.

3.1 İki Fazlı Akışın Temel Değişkenleri

Faz bir maddenin bulunduğu halin termodinamik tanımıdır ve fazlar tek bir kimyasal bileşenden oluşabileceği gibi farklı bileşenleri de içerebilir. (Wörner, 2003) Bu çalışmada sıvı fazı genel olarak “s” altındisi ile gaz fazı ise “g” altındisi ile belirtilecektir. “sg” ise fazlar arası geçiş özelliklerini belirtmek için kullanılacaktır. Bu aşamada verilecek olan temel iki fazlı akış değişkenleri fazların birbirlerine göre ve akış içindeki durumları hakkında bilgi verirken genel iki fazlı akış denklemlerinin türetilmesinde yardımcı olur.

Özellikle yatay ve dikey borularda gaz-sıvı akış rejimleri için en temel kavramlardan birisi boşluk oranıdır ve bir kanal içinde gaz veya buhar tarafından doldurulan alanın toplam kesit alanına oranını belirtir. Boşluk oranı alan ağırlıklı ortalama gaz fraksiyonu olarak ta tanımlanabilir ve α simgesi ile gösterilir. (Collier ve Thome, 1996)

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_s} \quad (1 - \alpha) = \frac{A_s}{A_g + A_s} \quad (3.1)$$

Kuruluk oranı iki fazlı akış formülasyonları açısından diğer önemli bir kavramdır. Toplam kütleli debi \dot{m} , sıvı ve gaz fazların kütleli debileri ise sırasıyla \dot{m}_s ve \dot{m}_g olarak gösterilmek üzere dinamik kütle kuruluk oranı, x şöyle tanımlanır;

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_s} \quad (1-x) = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g + \dot{m}_s} \quad (3.2)$$

Statik kütle kuruluk oranı akışın herhangi bir anda durdurulduğu kabulü yapılarak ilgili kesitteki fazlardan birinin o kesitteki toplam kütleyle oranlanması ile bulunur ve bu çalışmada q ile belirtilmiştir. Fazlardan birinin diğerine göre bir bağıl hızı ya da kayma olmaması halinde dinamik kütle kuruluk oranı statik kütle kuruluk oranına eşittir. Statik kütle kuruluk oranı ve kayma “ s ”, ortalama hız u olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q = \frac{m_g}{m_s + m_g} \quad (1-q) = \frac{m_s}{m_g + m_s} \quad (3.3)$$

$$s = \frac{u_g}{u_s} \quad (3.4)$$

Genel kuruluk oranı ifadeleri içinde verilmesi gereken bir diğer kavramda hacimsel kuruluk oranıdır. Hacimsel kuruluk oranı “ β ” herhangi bir anda akış kesitinden geçen gaz veya buhar hacminin aynı kesitten geçen iki fazlı karışımın toplam hacmine ya da hacimsel debisine oranıdır. Eğer kayma yoksa hacimsel kuruluk oranı boşluk oranına eşittir ve şöyle ifade edilir.

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_s} \quad (1-\beta) = \frac{Q_s}{Q_g + Q_s} \quad (3.5)$$

Kütleli debinin akış kesit alanına bölünmesi kütleli akıyı verir. Kütleli akının formülasyonu ve kuruluk oranı ile ilişkisi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho u = \frac{u}{v} \quad (3.6)$$

$$G_g = G A x \quad G_s = G A (1-x) \quad (3.7)$$

$$u_g = \frac{G_g}{\rho_g A_g} \quad u_s = \frac{G_s}{\rho_s A_s} \quad (3.8)$$

$$u_g = \frac{Q_g}{A_g} \quad u_f = \frac{Q_s}{A_s} \quad (3.9)$$

$$u_g = \frac{Gx}{\rho_g x} \quad u_s = \frac{G(1-x)}{\rho_s (1-x)} \quad (3.8)$$

Boşluk oranı ve kuruluk oranına bağlı olarak kayma şu şekilde ifade edilir;

$$s = \frac{u_g}{u_s} = \frac{\dot{m}_g \rho_s A_s}{\dot{m}_s \rho_g A_g} = \frac{1-x}{1-x} \frac{\rho_s}{\rho_g} = \frac{\beta}{1-\beta} \frac{1-x}{x} \quad (3.9)$$

Fazlardan yalnız birinin kanaldan akması durumundaki faz hızı superficial hız olarak tanımlanır. Superficial hız u_{sf} ;

$$u_{sfg} = \frac{Q_g}{A} \quad u_{sfs} = \frac{Q_s}{A} \quad (3.10)$$

Buna bağlı bir diğer kavramda superficial kütleli akıdır ve superficial hız kuruluk oranına göre şöyle tanımlanır;

$$G_{sfg} = xG \quad G_{sfs} = (1-x)G \quad (3.11)$$

3.2 İki Fazlı Akış Mekanizmasında Etkili Kuvvetler

Herhangi bir akışkan hareketi o akışkana etkiyen kuvvetlerden kaynaklanır.(Wörner, 2003) Akışkan hareketinde temel kuvvetler hacimsel, yüzeysel ve çizgisel kuvvetler olarak sınıflandırılabilir ve bu kuvvetler akış tiplerine göre farklı etkiler gösterirler. Örneğin katmanlı gaz – sıvı akışları daha çok yerçekimi etkisinde akışlar iken, halka akış arayüzey kayma gerilmelerinin yerçekimine göre daha baskın olduğu bir akış tipidir. Bu temel

kuvvetler basınç kuvveti ve viskoz kuvvetler (yüzeysel kuvvetler), gravite, eylemsizlik ve kaldırma kuvveti (hacimsel kuvvetler) ile yüzey gerilimi (çizgisel kuvvetler) olarak sıralanabilir. Akış mekanizmasının direkt olarak bu kuvvetlerle ilgili olduğunu söylemek yanlış olmaz örneğin yine halka akışta açık literatürde pek çok araştırmaya konu olan dalga oluşumu ile ilgili temel kuvvetlerden birinin yüzey gerilmesi olduğu belirtilmektedir. Yukarıda belirtilen kuvvetlerin kombine etkisi altındaki iki fazlı akış hareketine, akış üzerine etkiyen kuvvetlerin çözümlenmesi açısından bakıldığında karmaşık bir tablo ortaya çıkmaktadır. Hassas sayısal çözümlerin elde edilebilmesi bu karmaşık tabloyu modelleyebilecek uygun yaklaşımının seçilmesi ile ilgilidir. Bu konu ile ilgili detaylar Bölüm 5.5.1’de verilmiştir.

3.3 İki Fazlı Akışlar İçin Çözümleme Yaklaşımları

İki fazlı akışlar pek çok endüstrinin ilgi alanıdır dolayısıyla iki fazlı akışların çözümlenmesi ile ilgili yaklaşımlara pek çok farklı disiplinden katkı olmaktadır (Kleinstreuer,2003).Önerilen çözümler doğal olarak uygulama alanına göre farklılık gösterebilmektedir. Genel olarak bakıldığında bu yaklaşımların çoğu nükleer veya yanma mühendisliği gibi farklı uygulama alanları için geliştirilmiş deneysel sonuçlara dayanan korelasyonları, yarı ampirik denklemleri ve pek çok basitleştirmeyi içerir. Genel kabul gören yaklaşımlar temel olarak tek fazlı akış formülasyonlarından türetilmiştir ve kütle, momentum ile enerji denklemlerinin iki fazlı akışlar için belli basitleştirmeler ve kabuller yardımıyla çözülmesi esasına dayanır. Bu yaklaşımlar şöyle sıralanabilir.(Collier ve Thome,1996)

3.3.1 Homojen Akış Modeli

Homojen akış modeli iki fazlı akış analizinde kullanılan en temel modeldir. Temel denklemlerin çözümünde karışım ortalama özellikleri kullanılarak tek fazlı akış benzeşimi kullanılır. Bu model sürtünme faktörü ya da sis akışı modeli olarak ta bilinir. Özellikle gaz sıvı akışları ile ilgili proseslerin irdelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Homojen akış modelinde gaz ve sıvı hızlarının eşit olduğu, fazların termodinamik dengede bulunduğu varsayımı yapılır.(Collier ve Thome,1996) Basınç kayıplarının hesaplanmasında iki fazlı akışa uygun şekilde tanımlanmış tek fazlı sürtünme faktörü yaklaşımı kullanılır. Yapılan basitleştirmelere ve akış modellerinin spesifik özelliklerinin göz ardı edilmesine rağmen homojen akış modeli birçok iki fazlı akış probleminin analizinde kullanılmaktadır.

3.3.2 Ayrık Akış Modeli

Bu akış modelinde fazların ayrı olarak hareket ettiği yaklaşımı yapılarak temel denklemler her bir faz için çözülür. Temel denklemlerin çözülebilmesi için her fazın kanal içinde kapladığı alan ya da fazların hızları, kanal cidarı ile olan etkileşimler ve fazlar arası etkileşimler bilinmelidir. Bu akış modeli boşluk oranı ve kayma gerilmelerinin temel denklemler ile ilişkilendirilmesi sayesinde halka akış gibi homojen olmayan iki fazlı akış tiplerinin analizi için daha uygun hale gelir.

3.3.3 Akış Haritası Modelleri

Homojen ve ayrık akış modelleri, akış tipinin spesifik özelliklerinden kaynaklı etkileri ihmal ettikleri için güvenilirlikleri sınırlıdır. Fazlar arası arayüzey geometrisine dayanan akış haritası modelleri iki fazlı akışlar için en kompleks çözüm yaklaşımlarını sunar. Fazların kanal içinde basitleştirilmiş belli geometriler içinde bulunduğu kabulü yapılarak çözümler bu çerçevede içinde aranır. Çözüm için tanımlanan geometriler mevcut akış tiplerinin idealize halidir. Günümüzde akış rejimleri ve faz değişiminin akış rejimlerine etkisi araştırılmakta ve iki fazlı akışlar için daha genel modelleme yaklaşımları aranmaktadır. Bu konuda özellikle Thome(2001) ve Cavallini'nin (2002) çalışmaları dikkate değerdir. Sayısal çözüm yaklaşımları uygulanırken de akış haritaları dikkate alınarak doğru modelleme yapılmalıdır. Bu konu ile ilgili detaylar Bölüm 5.5'te verilmiştir.

3.4 İki Fazlı Akışta Basınç Düşüşünün Hesaplanması

İki fazlı akışta basınç düşüşünün hesaplanması oldukça zor bir problemdir ve bu alanda pek çok korelasyon geliştirilmiştir ancak her türlü akış koşulunda geçerli bir model yoktur. Bu çalışmanın amaçlarından birisi de iki fazlı halka akışta basınç düşüşünün sayısal olarak hesaplanmasıdır. Sayısal modellemede R134a soğutucu akışkanın fiziksel özellikleri kullanılmıştır bu sebeple soğutucu akışkanlar ile yapılmış basınç düşüşü deneyleri ile ilgili güncel literatürde taranmıştır. R134a ile ilgili deneysel veriler oldukça fazla olduğu için akışkan olarak tercih edilmiştir. Eğer oluşturulan sayısal model optimize edilebilirse R600a gibi üzerinde çalışılan soğutucu akışkanlar için basınç kayıplarının tahmininde kullanılabilir. Bu konu ile ilgili değerlendirmeler sonuç bölümünde yapılmıştır.

İki fazlı akışta basınç düşüşleri ile ilgili literatür bu çalışmanın konusuna paralel olarak dar

kapsamlı olarak taranmıştır. İncelenen çalışmalar kurduğumuz HAD modeli ile karşılaştırma yapabilmemiz için gerekli soğutucu akışkanlar ile ilgili deneysel çalışmaları içermektedir. Bu deneysel çalışmalar çoğunlukla kaynama ve yoğuşmadaki basınç düşüşlerini kapsamaktadır. Ancak bu çalışmada ısı transferi ve faz değişimi modellenmemiştir. Ticari HAD kodları genellikle standart olarak faz değişimi algoritmaları içermemekte ancak bu noktada kullanıcıya çözücü parametrelerine müdahale ederek faz değişimini tanımlama şansı vermektedir. Bölüm 5.5.3.4'te bu konu tekrar ele alınacaktır

Çalışmanın kapsamı içinde faz değişimi modellenmesine rağmen mevcut sonuçlar daha kapsamlı bir HAD modelinin oluşturulması için basamak olarak kullanılabilir. Sonuç olarak eğer sayısal model yoğuşma veya kaynama deneyleri şartlarına göre kurulacak ve enerji denklemi çözülmeyecekse, sayısal modelden çıkan basınç düşüşleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılabilmesi için deneysel sonuçlardan faz değişiminden kaynaklı momentum terimlerinin çıkarılması gereklidir. Sayısal modelden çıkan sonuçlar bu yaklaşıma göre değerlendirilmiştir. İki fazlı gaz-sıvı akış rejimlerinin sayısal analizi ile ilgili güncel literatür ise Bölüm 5.1'de verilmiştir.

Hinde, Dobson, Chato ve arkadaşları (1992) R12 ve R134a için yoğuşmada lokal ısı taşınım katsayıları ve basınç düşüşlerini bularak bu iki akışkanın performanslarını karşılaştırmışlardır. Sonuçta R134a için ısı transfer katsayılarının %10–20 kadar fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Hurlburt ve Newell (1996) R134a'nın yoğuşma ve buharlaşmadaki performansını incelemişler ve ısı transferi, basınç düşüşleri ile boşluk oranının hesaplanması için bir model geliştirerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yine Hurlburt ve Newell (1997) R11, R12 ve R134a için halka akışta film kalınlığı, basınç düşüşü ve ısı transfer karakteristiklerini inceleyerek geliştirdikleri model ile karşılaştırmışlardır.

Choi, Kedzierski ve Domanski (1999) geliştirdikleri korelasyonla buharlaşma ve yoğuşmada R125, R134a, R32, R410A (R32/R125 50/50 % kütlece), R22, R407C (R32/R125/R134a,23/25/52 % kütlece) ve R32/R134a (25/75 % kütlece) için deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu korelasyon ile mikro kanallı borularda %10.8, düz borularda %15 yaklaşık sonuç elde edilmiştir.

Cavallini ve arkadaşları (2000) çeşitli soğutucu akışkanların ısı transferi ve basınç düşüşleri hesaplamak için kullanılan mevcut bazı korelasyonlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Didi, Kattan ve Thome (2001) 10.92 ve 12 mm çaplarındaki iki yatay boruda R-134a, R-123, R-402A, R-404A ve R-502 soğutucu akışkanlarının 100 - 500 kg/m²s aralığında yoğuşma ve kaynamadaki basınç düşüşlerini tespit etmişler ve buldukları bu deneysel sonuçları mevcut bazı korelasyonlar ile karşılaştırmışlardır.

Cavallini ve arkadaşları (2000) 100 – 750 kg/m²s kütleli akı ve 30 °C-50 °C doyma sıcaklığı aralığında R134a, R125, R236ea, R32 ve R410a akışkanlarının yoğuşmadaki ısı taşınım katsayıları ve basınç düşüşlerini tespit etmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Jabardo(2004) ve arkadaşları R134a için 70–1100 kg/m²s kütleli akı aralığında farklı çaplarda mikro kanatlı ve düz yatay borular için konvektif kaynamada basınç düşüşlerini deneysel olarak bulmuşlardır. Düz borular için Jung ve Radermacher korelasyonlarını kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır.

Nualboonrueng ve Wongwises (2004) 9.52mm iç çapındaki düz ve mikro kanallı borularda yüksek kütleli akılarda (400 – 800 kg/m²s) yaptıkları deneysel çalışmada R134a için iki fazlı basınç düşüşlerini deneysel olarak bulmuşlar ve elde ettikleri sonuçlara göre yeni bir korelasyon önermişlerdir.

Quiben (2005) R134a,R22 ve R410A akışkanları için 8 ve 13.8mm çapındaki borularda çeşitli kütleli akılarda buharlaşmada ve adyabatik şartlarda iki fazlı basınç düşüşlerini elde etmiştir. Mevcut iki fazlı akış korelasyonlarını deneysel sonuçlarla kıyaslamış ve akış rejimine dayanan yeni bir iki fazlı basınç düşüşü ifadesi ortaya koymuştur.

3.4.1 İki Fazlı Akışta Basınç Düşüşü İfadesi

İki fazlı akış için toplam basınç düşüşü denklem 3.12’de ifade edilmiştir.

$$\Delta p_{toplam} = \Delta p_{statik} + \Delta p_{momentum} + \Delta p_{sürtünme} \quad (3.12)$$

Burada Δp_{statik} yerçekiminin yarattığı basınç kaybı terimidir. θ yatayla yapılan açıyı, h ise yüksekliği belirtmektedir. Bu çalışmada yatay bir borudaki halka akış rejimi incelendiği ve yerçekiminin yatay bileşeni sıfır olduğu için $\Delta p_{statik} = 0$ ’dır.

$$\Delta p_{statik} = \rho_h g h \sin \theta \quad (3.13)$$

Momentum terimi faz değişimi nedeniyle kinetik enerjideki değişimi belirtir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta p_{momentum} = G^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_s(1-\alpha)} \right]_{\text{çıkış}} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_s(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right]_{\text{Giriş}} \right\} \quad (3.14)$$

Boşluk oranının hesaplanması için denklem 3.1 dışında pek çok ifade önerilmiştir. Bunlardan biride Steiner tarafından 1993 yılında önerilen Rouhani ve Axelsson tarafından 1970'te ortaya konulan modelin türevidir. (Thome 2001) .

$$\alpha = \frac{x}{\rho_g} \left[(1 + 0.12(1-x)) \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_s} \right) + \frac{1.18(1-x)(g\sigma(\rho_s - \rho_g))^{0.25}}{G^2 \rho_s^{0.5}} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

Sürtünmeden kaynaklı basınç düşüşleri için öncülüğünü Lockhart ve Martinelli'nin yaptığı (Thome 2001) korelasyonlar kullanılmaktadır. Deneysel sonuçların yokluğunda HAD sonuçlarını kontrol (geçerli oldukları şartlar dâhilinde) amacıyla kullanılabilecek bu ampirik ifadelerden geniş görmüş olanları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

3.4.2 Lockhart Martinelli Korelasyonu

Bu metod Lockhart ve Martinelli tarafından 1949 yılında ortaya konulmuştur ve günümüzde hala kullanılmaktadır (Thome 2001, Collier ve Thome 1996, Quiben 2005). Lockhart ve Martinelli modeli buhar ve sıvı fazları için bir iki fazlı akış çarpanının kullanılmasına dayanır. Sıvı veya gaz için basınç düşüşü ifadeleri sırasıyla:

$$\Delta p_{sürtünme} = \Phi_{St} \Delta p_s \quad (3.16)$$

$$\Delta p_{sürtünme} = \Phi_{St} \Delta p_g \quad (3.17)$$

Şeklinde verilir ve burada Δp_s ve Δp_g aşağıdaki ifadelerden bulunur. Bu ifadeler tüm kanal kesitinden sadece gaz veya sadece sıvı geçtiği varsayılarak oluşturulmuştur.

$$\Delta p_g = 4f_g \left(\frac{L}{d_i} \right) G^2 x^2 \left(\frac{1}{2\rho_g} \right) \quad (3.18)$$

$$\Delta p_s = 4f_s \left(\frac{L}{d_i} \right) G^2 (1-x)^2 \left(\frac{1}{2\rho_s} \right) \quad (3.19)$$

Denklem 3.18 ve 3.19'de görülen sürtünme faktörleri ise aşağıdaki ifadelerden hesaplanır.

$$f_s = \frac{0,079}{Re_s^{0,25}} \quad \text{Burada } Re = \frac{G(1-x) \cdot d_i}{\mu_s} \quad \text{olarak verilir} \quad (3.20)$$

$$f_g = \frac{0,079}{Re_s^{0,25}} \quad \text{Burada } Re = \frac{Gx d_i}{\mu_s} \quad \text{olarak verilir} \quad (3.21)$$

Denklem 3.16 ve 3.17 için iki fazlı akış çarpanları ise:

$$\Phi_{stu} = 1 + \frac{C}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2} \quad Re_s > 4000 \quad (3.22)$$

$$\Phi_{gtt} = 1 + CX_{tt} + X_{tt}^2 \quad Re_s < 4000 \quad (3.23)$$

Olarak verilir. Her iki faz içinde akışın türbülanslı olduğu durum için Martinelli parametresi aşağıdaki gibi tanımlanır. Denklem 3.22 ve denklem 3.23'te verilen C katsayıları ise Çizelge 3.1'de akış karakterine göre verilmiştir.

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_s}{\mu_g} \right)^{0,1} \quad (3.25)$$

Çizelge 3.1 Martinelli Sabiti (Collier ve Thome 1996)

Sıvı	Gaz	C
Türbülanslı	Türbülanslı	26
Viskoz	Türbülanslı(vt)	12
Türbülanslı	Viskoz(tv)	10
Viskoz	Viskoz(vv)	5

Bu metod kullanılarak sürtünmeden kaynaklı basınç düşüşünü hesaplamak için yapılması gereken tek şey fazların akış kesitinden tek başlarına aktıkları zamanki basınç düşüşünü bulup bunu 3.22 ve 3.23'te verilen iki fazlı akış çarpanları ile çarpmaktır. Bu korelasyon buhar kuruluk derecesi $0 < x \leq 1$ için kullanılabilir (Collier ve Thome 1996, Thome 2001 Quiben 2005)

3.4.3 Friedel Korelasyonu

Friedel 1979'da yine bir iki fazlı çarpanı yaklaşımı olan yeni bir basınç düşüşü korelasyonu önermiştir. Bu yeni yaklaşımda iki fazlı akış çarpanının yeni formülasyonu çok geniş bir deneysel çalışmaya dayanılarak ortaya çıkarılmıştır ve en doğru sonuç veren korelasyonlardan biridir. Bu korelasyon $0 \leq x < 1$ için kullanılabilir. (Collier ve Thome 1996, Thome 2001 Quiben 2005). Denklem 3.18 ve 3.19'da verilen basınç sıvı ve gaz için basınç düşüşü denklemleri Friedel korelasyonunda da geçerlidir. Bu metodun farklılığı iki fazlı çarpanın formülasyonundan kaynaklanır. Friedel korelasyonu aşağıdaki şekilde formüle edilir

$$\Phi_{So} = E + \frac{3.24FH}{Fr_h^{0.045} We_s^{0.035}} \quad (3.26)$$

E, F, H ve Fr_h sırasıyla:

$$Fr_h = \frac{G^2}{g d_i \rho_h^2} \quad (3.27)$$

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_s f_g}{\rho_g f_s} \quad (3.28)$$

$$F = x^{0.78} + (1-x)^{0.224} \quad (3.29)$$

$$H = \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_s} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_s} \right)^{0.7} \quad (3.30)$$

$$We = \frac{G^2 d_i}{\sigma \rho_h} \quad (3.31)$$

Homojen yoğunluğun hesaplanması için denklem 3.32 kullanılır.

$$\rho_h = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_s} \right) \quad (3.32)$$

Friedel korelasyonu $\mu_s / \mu_g < 1000$ olduğu zaman önerilir. (Collier ve Thome 1996, Thome 2001)

3.4.4 Grönnerud Korelasyonu

Bu metod özel olarak soğutucu akışkanlar için geliştirilmiştir 1972’de geliştirilmiştir (Thome 2001 Quiben 2005). Bu korelasyona göre iki fazlı çarpanı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Phi_{gd} = 1 + \left(\frac{dp}{dz} \right)_{Fr} \left[\frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)}{\left(\frac{\mu_s}{\mu_g} \right)^{0.25}} - 1 \right] \quad (3.33)$$

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{Fr} = f_{Fr} \left[x + 4(x^{1.8} - x^{10} f_{Fr}^{0.5}) \right] \quad (3.34)$$

Eğer sıvı Froude sayısı bire eşit veya birden büyük ise sürtünme faktörü $f_{Fr}=1$ ’dir, eğer $f_{Fr}<1$ ise f_{Fr} aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$f_{Fr} = Fr_s^{0.3} + 0,0055 \left(\ln \frac{1}{Fr_s} \right)^2 \quad (3.35)$$

Bu korelasyon kurulum derecesi $0 \leq x < 1$ aralığında önerilir (Thome 2001 Quiben 2005)

3.4.5 Chisholm Korelasyonu

Çok geniş bir operasyon alanını kapsayan bir iki fazlı çarpanı yaklaşımı geliştirmiştir. (Thome 2001). Chisholm korelasyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir ve kurulum derecesi $0 \leq x \leq 1$ aralığında geçerlidir.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{sürtünme} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_{so} \Phi_{so}^2 \quad (3.36)$$

Denklem 3.36’da verilen $\left(\frac{dp}{dz} \right)$ tek faz için basınç düşüşü ifadesi sıvı ve gaz fazları için denklem 3.37 ve 3.38’deki gibi ifade edilir.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{so} = f_s \frac{2G^2}{d_i \rho_s} \quad (3.37)$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{go} = f_g \frac{2G^2}{d_i \rho_g} \quad (3.38)$$

Buradaki f_g ve f_s denklem 3.21 ve 3.22'den bulunur ancak $Re < 2000$ için f :

$$f = \frac{16}{Re} \quad (3.39)$$

Şeklinde ifade edilir ve bu hem sıvı hem de gaz fazları için geçerlidir.

$$\Phi_{so}^2 = 1 + (Y^2 - 1) \left[Bx^{(2-n)/2} (1-x)^{(2-n)/2} + x^{2-n} \right] \quad (3.40)$$

Burada Y faktörü tek fazlı basınç düşüşü ifadelerinin oranıdır.

$$Y^2 = \frac{(dp/dz)_{go}}{(dp/dz)_{so}} \quad (3.41)$$

$n=0.25$ 'tir ve Blasius denkleminde gelen bir terimdir. B değişkeninin hesaplanması Y parametresine ve toplam kütle akıya göre değişen formülasyonlar ile yapılır. Bu formülasyonlar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 B Değişkeninin Hesaplanması

0<Y<9.5 aralığında B'nin tespiti.	$B = \frac{55}{G^{1/2}}$ $G \geq 1900 \text{ kg/m}^2\text{s}$
	$B = \frac{2400}{G}$ $500 < G < 1900 \text{ kg/m}^2\text{s}$
	$B = 4,8$ $G \leq 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$
0<Y<28 aralığında B'nin tespiti	$B = \frac{520}{Y \cdot G^{1/2}}$ $G \leq 600 \text{ kg/m}^2\text{s}$
	$B = \frac{21}{Y}$ $G > 600 \text{ kg/m}^2\text{s}$
Y>28 olduğunda B'nin tespiti	$B = \frac{15000}{Y^2 \cdot G^{1/2}}$

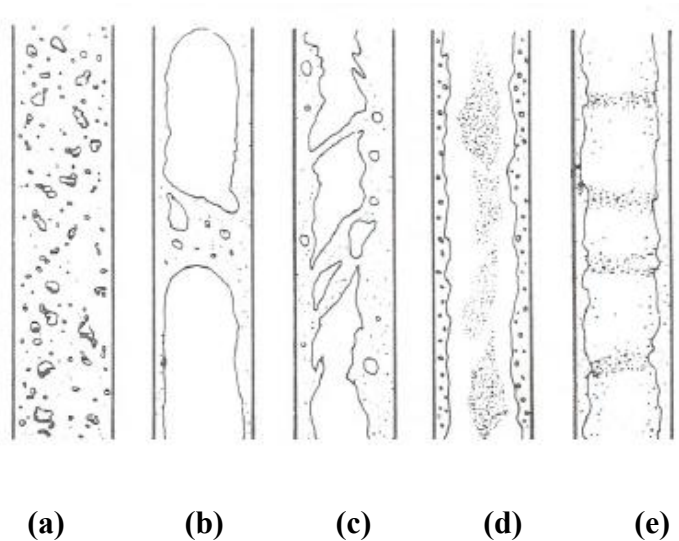
4 İKİ FAZLI AKIŞLARDA AKIŞ REJİMLERİ ve AKIŞ HARİTALARI

Gaz-sıvı akış rejimleri çok farklı topolojik ve morfolojik konfigürasyonlar gösterebilirler.(Wörner,2003) Fazlar arası arayüzey geometrisi iki fazlı akış rejimlerinin analizindeki en önemli parametredir çünkü fazlar arası arayüzeydeki momentum, kütle ve enerji geçişleri akış geometrisi ya da fazlar arası arayüzey geometrisi ile doğrudan ilgilidir. Buna bağlı olarak fazlar arası taşınım denklemlerinin çözülebilmesi için uygun modellerin seçilebilmesi akış rejiminin doğru olarak belirlenebilmesi ile ilgilidir. Çernobil kazasında olduğu gibi ısı değiştiricilerde yaşanabilecek problemlerin tahmini yine akış haritalarının iyi irdelenmesi ya da akış haritalarına dayalı analiz yaklaşımlarının ortaya çıkarılmasına bağlıdır.

Literatürde akış modeli (Flow pattern) ve akış rejimi (Flow regime) sözcükleri akış haritaları tanımlanırken birbirinin yerine kullanılabilir ancak akış rejimi sözcüğü akışın türbülanslı veya laminar olduğunu belirten bir anlam çağrışımına sebep olmaktadır. Pattern sözcüğünün direkt Türkçeye çevrilmesi ile ortaya çıkan “model” sözcüğü ise konunun Türkçe terminolojisi açısından başka bir karışıklığa yol açmaktadır. Bu sebeple akış haritaları tanımlanırken akış rejimi sözcüğü tercih edilmiştir.

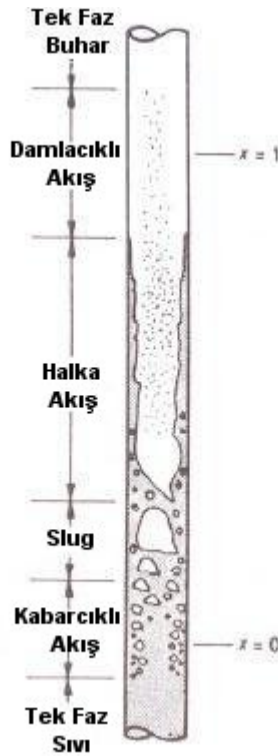
4.1 Dikey Borularda Akış Rejimleri

Dikey borularda oluşan akış rejimleri Şekil-1’de şematize edilmiştir.



Şekil 4.1 Dikey borularda akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)

Yukarıda şematize edilen akış rejimleri akışkan tipi ve kombinasyonu, kütleli akı, boşluk oranı, boru geometrisi gibi parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır. Bu akış rejimleri fazlar arası arayüz geometrisine bağlı olarak sırasıyla (a) Kabarcıklı akış, (b) Slug, (c) Churn, (d) Sisli-Halka Akış, (e) Halka Akış olarak isimlendirilir. Kabarcıklı akış düşük gaz kütleli akıların oluştuğu ve kabarcıklar sıvı fazı içinde rijit partiküller şeklinde sürüklenirler. Daha büyük çaplı kabarcıkların birbiri içinde çökmesi ile çapı yaklaşık olarak boru çapına eşit kabarcıklar oluşur ve bu akış tipi slug tip akış olarak adlandırılır. Daha yüksek gaz kütleli akıların oluştuğu slug akışta gözlenen büyük kabarcıkların kopması ile churn akış tipi gözlenir. Gaz kabarcıkları düzensiz bir hal alır ve sıvı hareketi de zamana bağlı kararsızlıklar gösterir. Çok yüksek gaz hızlarında ise halka akış oluşur. Halka akışta boru cidarı boyunca sıvı filmi hareketi gözlenirken ortada gaz hareketi görülür. Halka akışta sıvı filmi üzerindeki dalga hareketleri, arayüz kayma gerilmelerini ve sıvı filminden gaz fazına damlacıkların transferini etkiler. Dalga hareketlerinin analizi konusunda yapılmış pek çok sayısal çözüm vardır, bunlar arasında Jayanti ve Hewitt, Fukano ve Ousaka ile Han'nın çalışmaları dikkate değerdir. (Bknz Bölüm 5.1)



Şekil 4.2 Dikey ısıtılmış kanallarda akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)

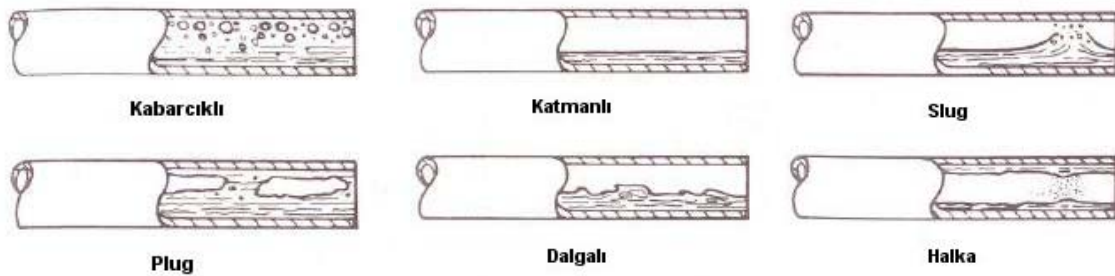
Şekil-2'de ısıtılmış dikey kanalda buharlaşmanın etkisiyle oluşan akış rejimleri görülmektedir. Cidarda kabarcıkların oluşması ile başlayan buharlaşmanın devamında

kabarcıklar birleşerek slug tipi akış oluşmasında neden olur. Slug tipi akış uzun kanallarda çok kısa bir süre için gözlenebilirken, kısa kanallarda hiç gözlenemeyebilir. Buharlaşmanın artmasıyla halka akış ve daha sonra damlacıklı akış oluşur.

Isı transferinin etkisinde oluşan iki fazlı akışlar özellikle faz değişiminden kaynaklı kompleks özellikler barındırır. Sayısal çözüm açısından faz değişiminin etkisiyle sürekli olarak değişen fazlar arası arayüzey geometrisinin modellenmesi oldukça güçtür. Buharlaşma ve yoğuşma için eski analiz yaklaşımları akış rejiminden kaynaklanan etkileri ihmal etmektedir. (Thome, 2001) Dolayısıyla ısı transferinin analizinde çok büyük hatalar ortaya çıkabilmektedir. Özellikle buharlaşmada sıvı filminin tamamen buharlaşarak kopması ve bunun analizi güvenliğin ön planda olduğu proseslerde önemli bir dizayn parametresidir. Daha global çözüm yaklaşımları ancak akış rejiminden kaynaklı etkilerin irdelenmesi ve bunların mevcut modellerin iyileştirilmesi için kullanılması ile mümkün olabilir. Isı transferinin etkisindeki iki fazlı akış problemlerinde, akış rejiminden kaynaklı etkileri dikkate alarak global çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi konusunda Thome'un (2001,2005) buharlaşma ve yoğuşma konusundaki bireysel çalışmaları, soğutucu akışkanların yoğuşması konusunda Meyer(2006) ve arkadaşlarının ve yine yatay borular içinde soğutucu akışkanların yoğuşması konusunda Cavalini ve arkadaşlarının, yatay borularda yoğuşmada (2000,2002) El Hajal, Cavellini ve Thome'un (2003) birlikte yaptığı çalışmaları önemlidir.

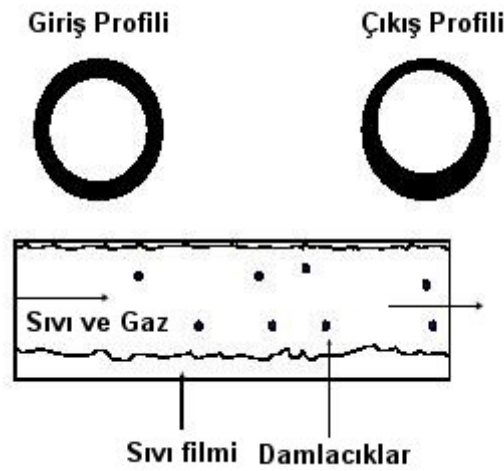
4.2 Yatay Borularda Akış Rejimleri

Yatay borularda gravite etkisi dikey borulara nazaran daha önemlidir çünkü gravitenin etkisinde akış asimetrik bir yapı gösterir bu durumda analizi daha kompleks hale getirir. Aşağıda gravite etkisinde yatay borularda oluşan akış rejimleri şematize edilmiştir.

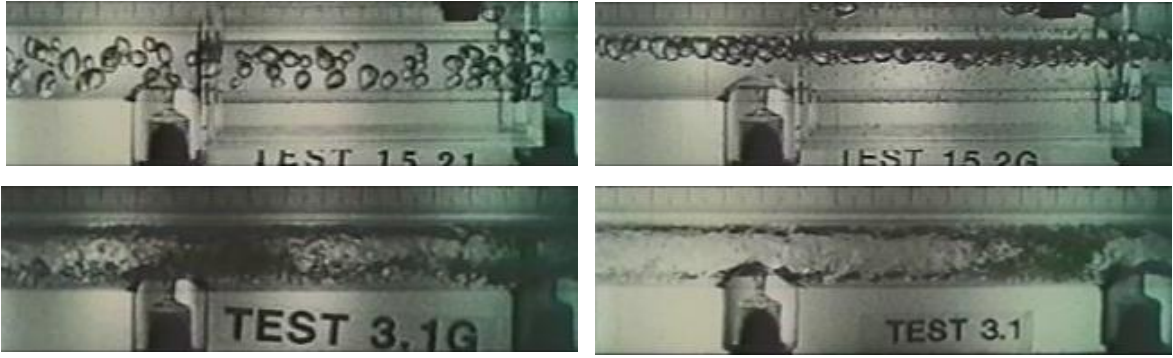


Şekil 4.3 Yatay borularda akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)

Dikey ve yatay borularda kabarcıklı akışlar benzer karakterler gösterirler. Ancak yatay borularda kabarcıklar borunun üst kısımlarında toplanma eğilimindedir. Kabarcıklı akışa göre daha düşük sıvı boşluk oranlarında dikey borulardaki slug akışına benzer bir akış tipi olan plug tipi akış gözlenir. Kabarcıklı akışta olduğu gibi gaz fazı borunun üst kısmında toplanma eğilimindedir. Katmanlı akışta yerçekimi fazlar arası arayüzey kayma gerilmelerine nazaran daha etkilidir. Borunun alt kısmında kalın bir sıvı filmi hareket eder. Bu akış tipi düşük gaz ve sıvı hızlarında oluşur. Eğer gaz hızı artarsa fazlar arası arayüzeyde dalgalar oluşur ve bu akış tipi da dalgalı akış olarak adlandırılır. Artan gaz hızlarında yerçekimi önemini yitirerek arayüzey kayma gerilmeleri akış rejiminin şekillendiren baskın kuvvet olarak ortaya çıkar. Yüksek gaz hızlarında dalgalı akış rejimi önce slug daha sonra halka akış rejimine dönüşür. Halka akışta dikey borularda olduğu gibi merkezde yüksek hızda gaz boru çevresinde ise düşük hızda sıvı filmi hareketi görülür. Ancak sıvı filmi kalınlığı boru çevresi boyunca eşit değildir. Borunun alt kısmında yerçekimi etkisiyle sıvı filmi kalınlığı artar. Şekil - 4.4'te yatay boruda halka akışta sıvı ve gaz hareketi şematize edilmiştir. Şekil - 4.5'te ise NASA Glenn Research Center'da normal ve mikro gravite koşullarında yürütülen iki fazlı akış deneylerine ait örnekler görülmektedir.



Şekil 4.4 Halka akış rejiminde akış profili (Adechy ve Issa 1999)

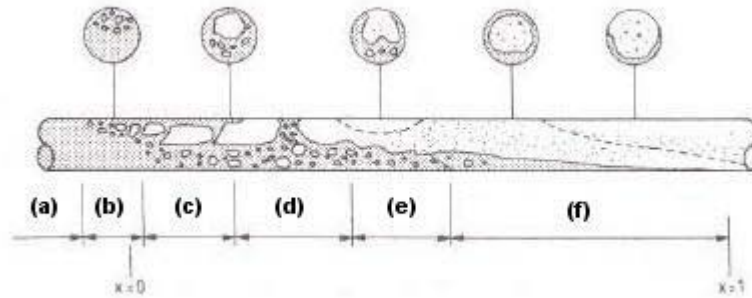


Mikro Yerçekimi

Normal Yerçekimi

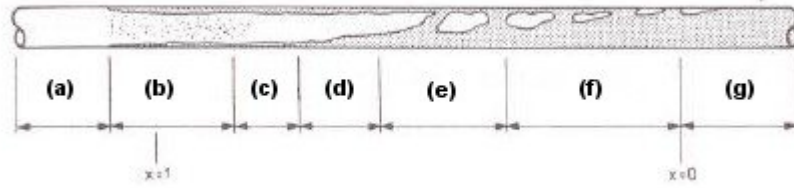
Şekil 4.5 Halka ve kabarcıklı akış rejimleri (\\http.microgravity.grc.nasa.gov 2003)

Yatay borularda iki fazlı akışta ısı transferinin analizi yerçekiminin neden olduğu faz dağılımındaki farklılıklar dışında dikey borulardan farklı değildir. Şekil-6, 7 ve 8’de yatay bir boru içinde kaynama ve yoğuşma mekanizması şematize edilmiştir.



- (a) Tek Faz Sıvı
- (b) Kabarcıklı Akış
- (c) Plug Akışı
- (d) Slug Akışı
- (e) Dalgalı Akış
- (f) Halka Akış

Şekil 4.6 Yatay boru içinde kaynamada akış rejimleri (Collier ve Thome 1996)



(a) Kızgın buhar – Kuru boru cidarı

(b) Kızgın buhar – Yaş boru cidarı – Damlacıklı halka akış

(c) Halka akış

(d) Yarı halka akış

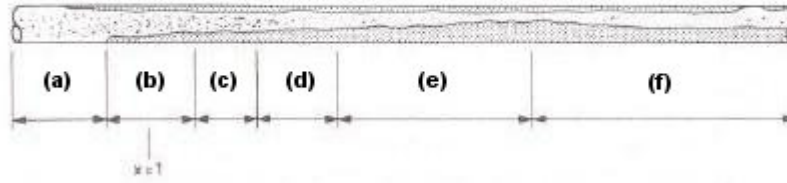
(e) Slug akışı

(d) Plug akışı

(f) Doymuş sıvı

Şekil 4.7 Yatay boru içinde yüksek kütleli akılı yoğuşmada akış rejimleri

(Collier ve Thome 1996)



(a) Kızgın buhar – Kuru boru cidarı

(b) Kızgın buhar – Yaş boru cidarı – Damlacıklı halka akış

(c) Halka akış

(d) Yarı halka akış

(e) Dalgalı akış

(f) Katmanlı akış

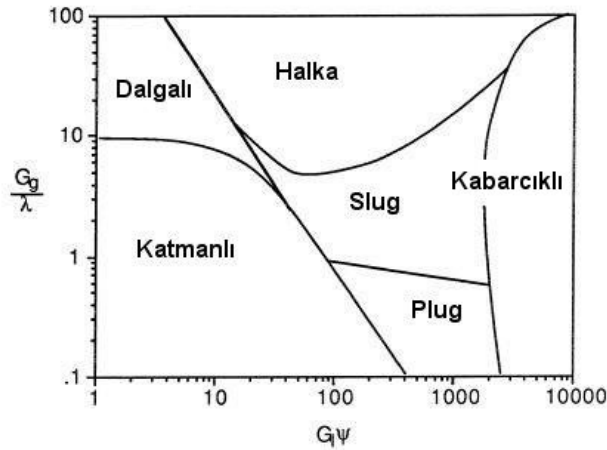
Şekil 4.8 Yatay boru içinde düşük kütleli akılı yoğuşmada akış rejimleri

(Collier ve Thome 1996)

Şekil - 4.6'da tüm cidar boyunca eş sıcaklık sağlanacak şekilde ısıtılan bir boruda doyma sıcaklığının hemen altında bir sıcaklıkta boruya giren sıvının iki fazlı akış karakteri görülmektedir. Yatay borularda faz değişimi etkisiyle, iki fazlı akış mekanizmasının kontrolü yerçekimi ve arayüzey kayma gerilmeleri arasında değişir. Yukarıdaki kaynama örneğinde akış yerçekimi kontrolünde iken yüksek gaz hızlarında akış daha simetrik bir karakter kazanarak yerçekimi önemini yitirir. Yoğuşmada ise yoğuşan gaz miktarının artması ya da daha doğru bir anlatımla yoğuşmanın etkisiyle gaz hızının düşmesiyle akış arayüzey kayma gerilmelerinin kontrolünden çıkarak yerçekimi etkisine girer. Yine kütleli akışa bağlı olarak akış farklı karakterler gösterebilir.

4.3 Akış Haritaları

Daha öncede belirtildiği gibi iki fazlı akışın ısıl ve hidrodinamik karakterini etkileyen en önemli parametre akış rejimidir. Hangi akış rejiminin ne şartlar altında ve hangi parametrelere bağlı olarak oluştuğunu bilmek iki fazlı akış araştırmalarının en temel problemlerinden birisidir. Akış rejimleri ile ilgili öncü çalışmalardan ilki Baker tarafından yapılmıştır. Baker deneylerinde su ve hava kullanarak yatay borular için Şekil-9'da görülen akış haritasını ortaya çıkarmıştır.



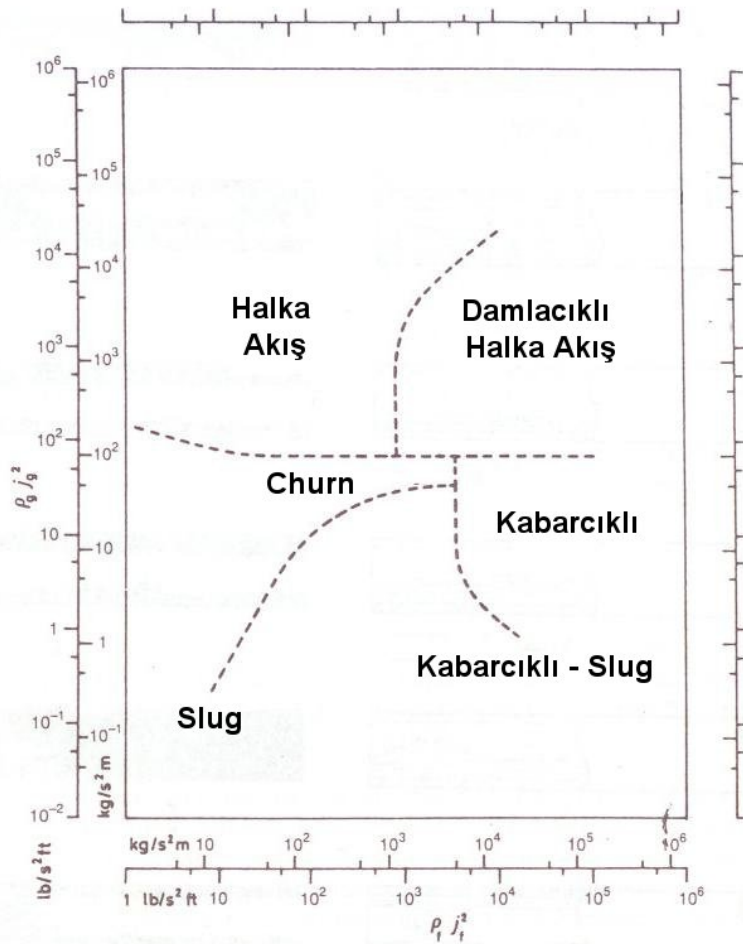
$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{0.075} \right) \left(\frac{\rho_l}{62.3} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\psi = \frac{73}{\sigma} \left[\mu_1 \left(\frac{62.3}{\rho_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}$$

Şekil 4.9 Yatay boru içinde akış Baker 1954 (Collier ve Thome 1996)

Burada G_g ve G_l sırasıyla süperfacial kütleli akıları λ ve ψ ise Baker'ın akışı tanımlamak için kullandığı parametreleri belirtmektedir. Baker'ın çalışması daha sonraki pek çok iki fazlı akış araştırması için temel teşkil ettiği için önemlidir.

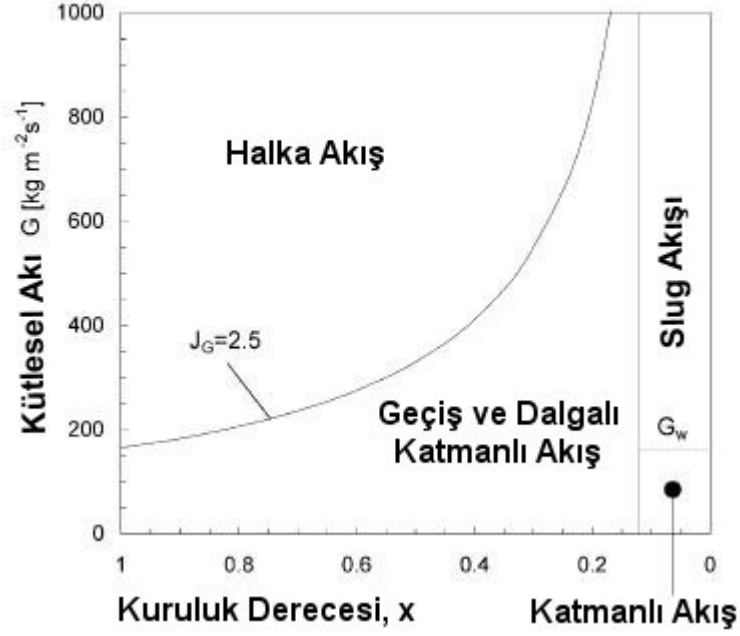
Bu konudaki öncü çalışmalarda bir diğeri de Hewitt ve Roberts tarafından 1 – 3 cm çapındaki dikey borular için düşük basınçta su-hava ve yüksek basınçta su-buhar kullanılarak yapılmıştır. Eksenler süperfacial sıvı ve gaz momentum akılarını belirtmektedir.



Şekil 4.10 Dikey boru içinde akış Hewitt ve Roberts 1969 (Collier ve Thome 1996)

Superficial genellikle hızlar akışın geometrik karakterini karakterize etmek için çoğunlukla yeterli değildir. (Wörner, 2003) İki fazlı akış geometrisi pek çok ikincil parametrelerin etkisi altındadır. Dolayısıyla mevcut iki fazlı akış haritaları genellikle belli kütleli akı ve boru çapları arasında geçerlidir. Literatürde ise pek çok farklı akışkan ve çalışma koşulu için farklı akış haritaları bulmak mümkündür. Örneğin Şekil – 4.11'de Cavallini'nin yoğunlaşma için

önerdiği modele göre oluşturduğu akış haritası görülmektedir. J_G boyutsuz buhar hızını belirtmektedir.



Şekil 4.11 Soğutucu akışkan R134a ve doyma sıcaklığı 40°C için Cavallini modelinin 8mm çapındaki yatay boruda uygulanması(Cavallini,2003)

Daha öncede belirtildiği gibi akış rejiminin ısı transferi üzerindeki etkisini dikkate alarak daha global çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesine çalışılmaktadır. Günümüzde bu konudaki araştırmacıların temel yaklaşımı mevcut modellerin birleştirilerek iki fazlı akışlar için daha genel formülasyonların oluşturulması yönündedir. Bu noktada iki fazlı akışların sayısal analizi önem kazanmaktadır. Sayısal analiz yöntemleri deneysel verilerin eksik olduğu noktalarda araştırmacılara farklı imkânlar sunmaktadır.

5 İKİ FAZLI AKIŞLARIN SAYISAL ANALİZİ

Sayısal yöntemlerin ya da bizim için daha dar kapsamıyla Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniğinin ilk başarılı uygulama örnekleri İkinci Dünya Savaşının ünlü Manhattan Projesine kadar gider. Ancak 1970’li yıllardan sonra bu teknoloji hızlı bir gelişme göstermiş günümüzde ise geleneksel uygulama alanları olan havacılık ve otomotiv sektörü dışında da geniş uygulama alanı bulmuştur. Kişisel bilgisayarların bile karmaşık problemlerin çözümünde kullanılabilir olacak kapasitelere ulaşması özellikle 1990’lı yıllardan sonra bu teknolojinin yaygın bir mühendislik aracı olmasına yardımcı olmuştur. Ancak iki fazlı akışlar söz konusu olduğunda durum biraz farklıdır. Elbette bu teknoloji iki fazlı akışların analizinde de başarı ile kullanılmaktadır ancak yine de pek çok iki fazlı akış problemi pratik uygulama alanının dışında kalabilmektedir. Bu bölümde ilk olarak konu ile güncel literatür verilecek daha sonra sırasıyla HAD teorisi, türbülans modelleri ve iki fazlı akışlar için modelleme yaklaşımları üzerinde durulacaktır.

5.1 Literatür Taraması

İki fazlı akışın sayısal formülasyonu açısından en önemli problem akışın matematiksel formülasyonun ve kullanılan yöntemlerin çok farklılık gösterebilmesidir. Bu nedenle tüm iki fazlı akış problemleri için kullanılabilir genel bir sayısal yöntem mevcut değildir. Direkt simülasyon yöntemleri ise çoğu zaman bilgisayar teknolojisi ile ilgili kısıtlamalar nedeniyle uygulanabilir değildir. Bu çalışmada da özel olarak yatay dairesel boru içinde halka akış için HAD yöntemi ile çözüm aranmıştır. Bu bağlamda konu ile ilgili güncel literatür aşağıda sıralanmıştır.

Çözümler genel olarak Hirt ve Nichols’un 1981’de ortaya koyduğu VOF (Volume of Fluid) metodu aranmıştır (Fluent 6.2.16 Manuel 2005, Welch ve Wilson 2000). Bu sayısal metodun ayrıntılarına ileride değinilecektir. VOF metodu serbest yüzey akışlarının ve birbirileri ile karışmayan sıvıların modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Halka akış için ise fazlar arası arayüz geometrisinin akış boyunca değişimini bu yöntemle izlemek mümkün olabilmektedir.

Halka akışla ilgili en güncel sayısal çalışmalarda biri Jayanti ve Hewitt (1997) tarafından yapılmıştır. Jayanti ve Hewitt sonlu farklar esaslı CFDS-FLOW3D kodu ile 2 boyutlu aksiyel

simetrik model kullanarak dikey doğrultuda dalgalı halka akışın hidrodinamik ve ısı karakteristliklerini incelemiştir.

Li ve Renardy (1998) su ve yağ gibi yüksek viskozite oranlarına sahip akışkanlar için dikey halka akışın direkt nümerik çözümünü yaparak dalga hareketlerinin incelemiştir.

Adechy ve Issa (1999) yatay dairesel borularda izotermal halka akış için sayısal bir model geliştirmiştir. Geliştirdikleri modelde sıvı film dinamiğini modellemek için bir sınır tabaka yaklaşımı kullanmışlar, gaz fazı ve gaz fazı içindeki damlacıklar ise Eulerian-Lagrangian bir yaklaşımla modellenmiştir. Fazlar arası etkileşim (kütle ve momentum transferi) lokal akış koşullarında dengelenerek bu iki modelin birbiri ile ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. Adechy ve Issa kurdukları model için Butterworth ve Pulling'in 32mm çapındaki boruda hava ve su ile yaptıkları deneysel çalışmanın verilerini kullanmışlardır. Sonuçta film kalınlığı ve hız dağılımı açısından tatmin edici sonuçlar bulsalar da basınç düşünü % 14 kadar fazla hesaplamışlardır.

Newton ve Behnia (2000) düşük reynolds sayılı akışlar için k- ϵ türbülans modeli kullanarak 50mm'den daha büyük çaplı kanallarda katmanlı akışta basınç düşüşlerini hazırladıkları HAD modeli ile hesaplayarak Issa'nın 1988'de yapmış olduğu çalışmalarını genişletmişlerdir.

Welch ve Wilson (2000) VOF temelli bir metodu faz değişiminden kaynaklı kütle transferi ve yüzey gerilimi etkilerinin de dikkate alarak film kaynamasının simulasyonunda kullanmışlardır.

C. H. Newton ve M. Behnia (2001) yine düşük reynolds sayılı akışlar için k- ϵ türbülans modeli kullanarak katmalı dalgalı akış için kendi sayısal modellerini geliştirmişlerdir.

Mouza, Paras ve Karabelas (2001) CFX, HAD kodu ile dalgalı katmalı akışı modelleyerek elde ettikleri basınç düşüşü ve film kalınlığı değerlerini deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Smith, Shao, Riffat (2001) Fluent HAD kodu ile buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminde kondenser ve evaporatör serpantinlerindeki basınç düşüşlerini geleneksel akışkanlar R22 ve R12 için bularak bu sonuçları R134a gibi yeni akışkanların basınç kaybı değerleri ve teorik değerlerle karşılaştırmışlardır. Ancak Smith, Shao ve Riffat kullandıkları türbülans modeli ve ayrıklaştırma şeması dışında HAD modeli ile ilgili fazla ayrıntı vermemiştir. Bu durum çalışmanın sağlıklı yorumlanmasını güçleştirmektedir.

Meier, Yadigaroglu ve Smith (2001) VOF yaklaşımında yüzey geriliminin etkisini modellemek için kullanılan CSF (Continuum Surface Force) metodu yerine alternatif bir metod önermişler ve önerdikleri metodun CSF'ye göre 3 – 7 kat daha doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Ancak önerdikleri formülasyon iki boyutlu uygulamalar ile sınırlandırılmıştır.

Gao, Gu ve Guo (2002) su ve yağ için yatay boruda katmanlı akışı VOF iki fazlı akış ve RNG k- ϵ türbülans modeli kullanarak incelemişler ve basınç kayıpları, kayma oranları, aksiyel hız dağılımı ile lokal faz fraksiyonunu hesaplayarak literatürdeki verilerle karşılaştırmışlardır. Gao, Gu ve Guo VOF iki fazlı akış modelinin kullanımı için güçlü bilgisayar kaynaklarına ve geniş sürelere ihtiyaç olduğunu belirtmektedir. Ancak modelledikleri boruda 55.75mm çapa ve 8m boya sahip olduğundan bu sonuç çok – çok normaldir.

Lioumbas, Mouza ve Paras (2002) CFX HAD kodu ile plakalar arası mesafesi 8mm olarak dikey bir dikdörtgen kanalda yaptıkları deneyleri HAD sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Türbülans modeli olarak k- ϵ modelini seçmişlerdir. HAD ile buldukları hız profilleri deneysel sonuçlara uyumludur.

Fukano ve Inatomi (2003) halka akışta dalga hareketlerinin sıvı film mekanizması üzerindeki etkisini direkt nümerik çözüm yöntemiyle üç boyutlu silindirik koordinat sisteminde modellemişlerdir. Fazlar arası arayüzeyin modellenmesi için VOF benzeri bir yöntem olan seviye ayarlama (Level set)metodunu kullanmışlardır. Fukano ve Inatomi halka akışta dalga hareketleri ve halkasal sıvı filmi oluşumunun açıklanması konusunda kendi çalışmalarını da geliştirmişlerdir.

Adechy ve Issa (2003) geliştirdikleri HAD modeli ile daha önceki çalışmalarında kullandıkları modelleme yaklaşımı yardımıyla yatay akışta “ T ” boru elemanında faz ayrılmasını modellemişlerdir. Analiz sonuçları Adechy ve Issa'nın daha önceki çalışmalarına paralel olarak deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Benzer şekilde “ T ” boru elemanı için yaptıkları simülasyon sonucunda buldukları faz ayrılma oranları deneysel sonuçlar uyum göstermektedir. Ancak film kalınlığının en yüksek olduğunu noktalarda deneysel sonuçlardan sapmalar gözlemişlerdir.

Andersson (2003) VOF metodunu kullanarak Lund Teknoloji enstitüsü ve Alfa Laval Lund işbirliği ile gerçekleştirilen ısı değiştirici performanslarının artırılması ve iki fazlı akışın akış hacmi içinde heterojen dağılımının önlenmesine yönelik geliştirdikleri dağıtıcıyı Fluent 6.0 yazılımı yardımıyla modelleyerek Alfa Laval Lund tarafından gerçekleştirilen deneyler ile karşılaştırmıştır. Bazı simülasyon sonuçları deneysel sonuçlardan %71.8 kadar sapma

göstermiştir. Yazar halka akış, slug/halka akış gibi akış rejimlerini elde etmiştir ancak simülasyon sonuçlarının tam olarak bu akış rejimlerinin yansıttığı söylenemez. Yazar VOF modelinin homojen akış prensibiyle modelleme yaptığını belirtmesine rağmen oluşturduğu modelde halka akış rejimi için buna uygun düzenlemeler yapmamıştır.

Van Wachem, Almstedt (2003) çok fazlı akışlar için mevcut eulerian-eulerian, lagrangian ve arayüzey izleme (VOF, Level set vs) yaklaşımlarını inceleyerek bu modellerin avantaj ve dezavantajlarını araştırmıştır.

Kishore ve Jayanti (2004) bir kanal içinde türbülanslı halka akışı 2 boyutlu olarak modellemek için sonlu hacim metodu esaslı bir HAD yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada sıvı filminin gaz fazı üzerindeki etkisi kayma gerilmeleri, sıvı filmi debisi ve film kalınlığı arasındaki üçgensel ilişki dikkate alınarak yeniden düzenlenmiş duvar fonksiyonları olarak modellenmiştir. Gaz fazı içindeki damlacıkların kütleli fraksiyonu için ek bir korunum denklemi çözülerek hesaplanmıştır. Gaz ile sıvı fazları arasında damlacıkların transferi ise kütleli fraksiyon için oluşturulan korunum denkleminde bir sınır koşulu ve kaynak terim olarak tanımlanmıştır. Sıvı film kalınlığını yüzey pürüzlülüğü cinsinden ifade etmek için ise ampirik bir korelasyon geliştirilmiştir. Kishore ve Jayanti'nin geliştirdikleri model tam gelişmiş halka akış ve basınç düşüşleri ile gaz yoğunluğundaki değişimler dikkate alındığında gelişmekte olan halka akış için deneysel verilerle uyumludur. Kishore ve Jayanti oluşturdukları modelin kolayca üç boyutlu silindirik koordinat sistemine ve simetrik olmayan akış koşullarına genişletilebileceğini belirtmektedir.

Li, Frankel, Braun ve Groll (2005) klasik bir buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminde genişleme valfi ile evaporatör arasındaki soğutucu akışkan dağıtan kanalları çeşitli iki fazlı akış modelleri ve Fluent 5.4, Phoenix 3.3 HAD yazılımları ile modellemiştir. Fluent 5.4 kodu ASM (algebraic slip mixture) ve VOF(volume of fluid) iki fazlı akış modelleri ile yapılan simülasyonlarda, Phoenix 3.3 ise IPSA (Inter-phase slip algorithm) iki fazlı akış modeli ile yapılan simülasyonlarda kullanılmıştır. Li, Frankel, Braun ve Groll simülasyon sonuçlarını literatürde hava ve su için mevcut olan deneysel datalarla karşılaştırmışlardır. Ancak hava ve su ile yapılan deneylerde iki fazlı akış giriş momentumu oldukça düşüktür. ASM ve VOF modelleri ise düşük hızlarda etkili olan fazlar arası kaldırma kuvvetleri doğru bir şekilde modelleyememiştir. Buna rağmen soğutucu akışkan dağıtıcılarında giriş momentumu mevcut olduğundan yukarıda belirtilen problem önemli değildir. Araştırmacılar sonuç olarak IPSA ya da alternatif olarak ASM modellerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu belirtmektedir. Ancak VOF modeli kullanılırken yine iki fazlı akış karışımı için uniform giriş hızının sınır

koşulu olarak verildiği belirtilmektedir. Bu durumda VOF modeli homojen akış varsayımıyla çözüm yaptığından deneysel sonuçlardan sapma olması doğaldır.

Muehlbauer ve arkadaşları (2005) Avrupa komisyonu, 5.EURATOM çerçeve programı (5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME) dâhilinde CFX ve StarCD gibi ticari HAD kodları ile Neptune gibi araştırma kodlarını ve bu kodların çok fazlı akışlar için çözüm yaklaşımlarını incelemiş ve nükleer endüstrisinin HAD yazılımları ile ilgili ihtiyaçlarını tanımlamıştır.

Scheuerer, Andreani, Bestion, Egorov, Heitsch, Menter, Muhlbauer, Pigny, Schwäger ve Willemsen (2005) Avrupa komisyonu, 5.EURATOM çerçeve programı (5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME) dâhilde HAD kodlarının nükleer endüstrisinde güvenlikle ilgili uygulamalarda kullanılabilirliği, tek boyutlu kodlarla modellenemeyen reaktör fiziği ile ilgili akış parametrelerinin HAD kodlarıyla test edilmesi ve HAD modelleme sürecindeki yanışları azaltacak uygulama rehberlerinin oluşturulması amacını güden bir çalışma yapmışlardır. Nükleer reaktörler ile ilgili çeşitli örnek vakalar modellenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar kapsamlı yorumlarıyla birlikte sunulmuş ve aynı sonuçlar CFX.5 ve Neptune HAD yazılımlarının geliştirilmesinde de kullanılmıştır. Bu çalışma hem iki fazlı akış olgusu hem de kompleks akışlar ve türbülansın modellenmesi gibi konularda HAD yazılımlarının eksikliklerini ortaya koyması açısından önemlidir.

Ghorai ve Nigam (2005) Fluent 6.0 yazılımı ile k-ε türbülans modeli ve VOF metodunu kullanarak gaz – sıvı katmanlı akış rejimini modellemişlerdir. Farklı sıvı ve gaz hızları için yapılan analizler deneysel literatür ile karşılaştırılmış ve kayma gerilmelerinin dağılımı ile akış profilinin karakteri deneysel sonuçlardan ± 10 sapma göstermiştir. Ghorai ve Nigam boru içindeki teğetsel hız dağılımı deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve oldukça tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir. Sürtünme faktörlerinin (arayüzey / duvar) oranını hesaplamak için bir korelasyon geliştirmişlerdir.

Taha ve Cui (2005) Fluent 5.4.8 yazılımı ile dikey bir boruda bir Taylor kabarcığının hareketini iki boyutlu eksenel simetrik olarak ve RNG k-ε türbülans modelini kullanarak modellemişlerdir. Kabarcık şekli ve hızı, hız ile lokal gerilme dağılımını hesaplayarak mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Ayrıca kabarcık şeklinin bağlı olduğu parametreleri de oluşturdukları nümerik model yardımıyla irdelemişlerdir.

Frank (2005) CFX 5.7 ve CFX5 yazılımlarıyla dikey boruda yaygın kabarcıklı akış ve yatay boruda slug akış gibi çeşitli iki fazlı akış rejimlerini en yeni sayısal çözüm algoritmaları ile

modellemiştir. Frank çalışmasında homojen olmayan MUSIG (Multiple Size Group) ve homojen olmayan VOF(Volume of Fluid) gibi sayısal çözüm yöntemleri kullanarak bulduğu sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve ele alınan örnek vakalarda başarılı simülasyon sonuçları elde etmiştir.

Frank, Zwart ve arkadaşları (2005) MUSIG modelini “Rossendorf Araştırma Merkezi” (FZR) TOPFLOW deney düzeneğinde elde edilen TOPFLOW -074’ nolu deneyin sonuçları ile test etmişlerdir. MUSIG yaklaşımında gaz fazı kabarcıklı akış için N adet homojen olmayan hız grubuna ve bu gruplarda M adet kabarcık sınıfına bölünür, kabarcıkların birleşerek yeni bir kabarcığın teşekkülü ve ayrılması mekanizması da uygun modeller yardımıyla dikkate alınır. Frank, Zwart ve arkadaşları CFX.10 HAD yazılımı ve MUSIG yaklaşımını 195 mm dikey bir boruda test etmiş HAD analizi ile elde edilen radyal kabarcık çapları, hız profilleri ve hacimsel fraksiyonları deneysel datalarla karşılaştırdıklarında uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Frank (2005) yatay boruda slug akışını CFX HAD yazılımı ile homojen olmayan iki fazlı akış veya mixture modeli ve serbest yüzey algoritmaları kullanarak üç boyutlu ve zamana bağlı olarak modellemiştir. Farklı senaryolar periyodik ve giriş/çıkış sınır koşulları borunun farklı segmentleri ve tamamı için uygulanmıştır. Frank slug frekansı, uzunluğu ve yayılması gibi akışla ilgili parametreleri mevcut deneysel verilerle karşılaştırmış ve hem deneysel verilerde hem de sayısal çözümde bazı belirsizlikleri belirtmesine rağmen tatmin edici sonuçlar elde etmiştir.

Han (2005) halka akışta sürekli gaz fazı içerisinde sıvı teşekkülünü Fluent 6.18 HAD yazılımı yardımıyla incelemiştir. Kurduğu sayısal modelde temel olarak dikey halka akışı ele almıştır. Türbülans modeli olarak RNG k-ε fazlar arası arayüzeyin modellenebilmesi için ise VOF metodu kullanmıştır. Han bu çalışmada sıvı filmde oluşan dalgalar ile gaz fazı içinde sıvı teşekkülü arasındaki ilişkiyi nümerik olarak açıklamayı başarmıştır.

Amornkul, Steward, Lister (2005) CANDU reaktörünün besleme hattındaki bir dirsek için 55 °C’de su ve hava ile yaptıkları deneyi Fluent 6.1 HAD yazılımı ile modellemiştir. Fluent ile yapılan tek fazlı akış simülasyonlarında deneysel verilerle uyumlu bir basınç dağılımı elde edilmiştir. Ancak yazarlar yaptıkları iki fazlı akış simülasyonları ile elde ettikleri toplam basınç düşüşün deneysel sonuçlardan daha az olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar simülasyon sonuçları ile ilgili bazı problemleri belirtmelerine rağmen hangi iki fazlı akış modeli ya da hangi türbülans modelini kullandıklarına dair bir bilgi vermemişlerdir.

5.2 Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniğine Giriş

Mühendislik problemleri deneysel ya da sayısal yöntemlerle çözümlenebilir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği akışkan hareketinin tanımlayan temel kütle, momentum ve enerji denklemlerinin tanımlanan sınır şartları içerisinde bilgisayar teknolojisi yardımıyla çözülmesi esasına dayanan sayısal bir yöntemdir. Bu çalışmada iki halka akış rejiminin modellenmesi için HAD teknolojisi kullanılmıştır. Kullanılan hesaplama aracı Fluent 6.2.16 yazılımıdır ve bu bölümde Fluent 6.2.16 yazılımının akışkan hareketi ile ilgili problemleri ele alış şekli üzerinde durulacaktır.

5.2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Metodolojisi

Bu çalışmada ticari bir HAD yazılımı olan Fluent HAD kodu kullanılmıştır. Mevcut tüm ticari HAD yazılımları temel olarak üç temel araç içerir. (Versteeg, Malalasekera, 1995)

- Ön işlem aracı (Pre processor)
- Çözücü (Solver)
- Son işlem aracı (Post processor)

Ön işlem aracı problemin tanımlandığı ve probleme ait parametreler ile akış alanı geometrisinin oluşturulduğu bölümdür. Bu bölümde yapılan işlemler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Akış alanının tanımlanması ve sayısal çözüm ağının oluşturulması.
- Modellenek problemnin tanımlanması.
- Akışkan özelliklerinin tanımlanması.
- Uygun sınır koşullarının tanımlanması.

Yukarıda tanımlanan sürecin başlangıç noktasını oluşturan sayısal çözüm ağının oluşturulması HAD yönteminin en zahmetli ve aynı ölçüde önemli kısmını oluşturur. Sayısal yöntemin doğası gereği akış alanının tarifi ve ne kadar iyi modellendiği direkt olarak elde edilecek sonuçların doğruluğunu etkiler. Fluent HAD yazılımı pek çok diğer HAD kodu gibi sonlu hacim metodunu kullanmaktadır. Sonlu hacim metodu tanımlanan geometrinin kontrol hacimlerine bölünerek (mesh) bu kontrol hacimleri içinde akışı tanımlayan denklemlerinin çözülmesi esasına dayanır. Akış alanının tanımlanması veya sayısal çözüm ağı şeklinde tarif ettiğimiz kontrol hacimlerinin oluşturulması mevcut HAD koduna entegre bir şekilde yapılabileceği gibi CAD programından alınan verinin bir ön işlemci yazılım yardımıyla

modellenecek sayısal çözüm ağının oluşturulması şeklinde de olabilir. Fluent HAD yazılımı sayısal çözüm ağının oluşturulması için Gambit yazılımını kullanmaktadır.

Fluent HAD yazılımı yukarıda da belirtildiği üzere pek çok HAD kodu gibi sonlu hacim metodunu kullanır. Sonlu hacim metodu esasına göre çalışan diğer bazı ticari HAD kodları FLOW3D, PHOENICS, CFX ve STAR-CD şeklinde sıralanabilir. Sonlu hacim metodu temel olarak aşağıdaki çözüm adımlarını izler:

- Tüm sayısal çözüm ağı içerisinde akışı tanımlayan denklemlerinin entegrasyonu.
- İntegral denklemlerin ayrıklaştırılması ve cebirsel denklemlere dönüştürülmesi.
- Cebirsel denklemlerin iteratif yöntemlerle çözülmesi.(Versteeg, Malalasekera, 1995)

İntegral denklemlerin ayrıklaştırılması ile ilgili yöntemlere ileri de değinilecektir. HAD kodları pek çok farklı ayrıklaştırma yöntemi içerirler.

HAD analiz sonuçlarının yorumlanması analizin son aşamasını oluşturur. Bu aşama çözümlenmiş akış alanı hakkında görsel ve sayısal bilginin toplanması için HAD kodu tarafından sağlanan araçların kullanılması ile ilgilidir. Genel olarak HAD kodları akış alanı hakkındaki bilgileri görsel çıktılar olarak verebilirler. İstenen parametrenin vektörel veya kontur olarak akış alanı içindeki değişimi izlenebilir. Sonuçlar animasyon haline getirilerek akış alanı hakkında daha detaylı görsel bilgi sağlanabilir. Akış içindeki partiküllerin hareketi yine benzer yöntemle izlenebilir. HAD kodları analiz sonuçlarına dayalı grafiksel çıktılarla akış alanı içindeki hareketin yapısı hakkında detaylı vererek mühendislere ve araştırmacılara çok farklı imkânlar sunarlar.

Çok genel hatlarıyla bir HAD analiz süreci yukarıda özetlenmiştir. Bu bölümde tanımlanan HAD metodolojisi sonlu hacim metodunu temel almakla beraber verilen modelleme adımları ayrıntılarda farklılıklar olmasına rağmen diğer yöntemler içinde genelleştirilebilir. Bölüm 5.2.3'te sonlu hacim metodu ve diğer bazı sayısal yöntemler hakkında kısa bilgiler verilerek yöntemlerin avantajları değerlendirilmiştir. Sonlu hacim metodu ve FLUENT yazılımının dayandığı teorik temeller ile ilgili ayrıntılar ise takibenden bölümlerde verilmiştir.

5.2.2 Akışkan Hareketinin Temel Denklemleri

Aşağıda verilen korunum denklemleri tüm HAD kodlarının temelini oluşturur bu sebeple akışkanlar mekaniğinin temel teorisinin kısa tekrarında yarar vardır. İki fazlı akış durumunda ise bu temel korunum denklemleri fazlar için ayrı-ayrı sağlanmalıdır. Sayısal olarak bunun

nasıl sağlandığı ise seçilen iki fazlı modeline göre değişmektedir (Bknz Bölüm 5.5.3) Aşağıda verilecek denklemler hakkında okuyucunun genel bilgi sahibi olması muhtemel olduğu için korunum denklemleri en temel formunda verilmiş bu konuda pek çok referans kaynak olması sebebiyle bu denklemlerin çıkarılmasına girilmemiştir.

Akışkanlar mekaniğinin temel denklemleri kütle, enerji ve momentumun korunum kanunlarını esas alır. Kütlenin korunumu süreklilik denklemi olarak isimlendirilir. Momentum denklemi ise Newton'un 2.Hareket Kanunu'nun akışkanlar mekaniğine uyarlanmasıdır. Benzer şekilde enerjinin denklemi de Termodinamiğin 1.Yasasına dayanır.

Kontrol hacmi yaklaşımı akışkanlar mekaniği denklemlerinin çıkartılmasında izlenen genel bir yöntemdir. Kontrol hacmi akışkanın hareketli olduğu kontrol yüzeyleri ile sınırlanmış bir çözüm alanını ifade eder ve bu hacim içerisinde kütle ve enerji korunur. Momentumun x, y ve z bileşenlerinin zamana bağlı olarak değişimi hacimsel kuvvetler ile cisme etkiyen yüzey kuvvetlerinin toplamına eşittir. Süreklilik denklemi tek bir denklemle ifade edilirken momentum denklemi x, y ve z bileşenleri içi ayrı-ayrı ifade edilen vektörel formda bir denklemdir. Enerji denklemi ise skaler formda ifade edilir. Sonuç olarak akışkanlar mekaniğinin temel denklemleri kütle, x-y-z momentum, enerji ve hal denklemlerinden oluşur. Eğer akış kimyasal olarak reaktif ise veya çok fazlı akış örneğinde olduğu gibi kompleks özellikler içeriyorsa yukarıda bahsedilen temel denklemlere ek olarak akış alanını tanımlayacak ilave bazı denklemlerin çözülmesi gerekebilir. Problemin doğasına göre yukarıda belirtilen tüm denklemlerin çözülmesi gerekmeyebilir, örneğin bizim incelediğimiz iki fazlı akış probleminde model iki boyutlu aksel simetrik olarak oluşturulmuştur dolayısıyla momentumun z bileşenini tanımlayan denklem ve ayrıca model adyabatik akış koşullarını ele aldığı için enerji denklemi de çözülmeyecektir. Kısaca açıkladığımız temel akışkanlar mekaniği denklemleri aşağıda sırasıyla incelenmiştir.

5.2.2.1 Süreklilik Denklemi

Akış alanı içerisinde seçilmiş sonsuz küçük bir kontrol hacmi V, kontrol hacminin sınırları S olmak üzere kütle korunumu kontrol hacminin sınırlarından giren ve çıkan net kütle akısının kütle değişim hızına eşit olduğunu belirtmektedir. Buna göre kütle korunumu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho dV = - \iint_S \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dS \quad (5.1)$$

Burada \vec{V} akış hız alanını ρ yoğunluğu \vec{n} kontrol sınırına dik birim vektörü belirtmektedir. Yukarıdaki ifadenin hacim İntegrali alınırsa aşağıdaki diferansiyel formadaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5.2)$$

Yukarıdaki ifade Eulerian bir yaklaşımla elde edilmiştir bu yaklaşımda kontrol hacmi sabit iken akışkan kontrol hacmine girip çıktığı kabul edilir. Alternatif Lagranian kontrol hacmi akışkanla birlikte hareket eder. Yukarıdaki denklem kartezyen koordinat sisteminde ifade edilir yoğunluk ve hız terimleri de ayrı-ayrı toplanırsa sırasıyla aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (5.4)$$

Denklem 5.4 aşağıdaki forma indirgenebilir.

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{D\rho}{Dt} \right) + \text{Div } \vec{V} = 0 \quad (5.5)$$

Yoğunluk sabit ve sıkıştırılmaz akış söz konusu ise 5.5 denklemi aşağıdaki şekli alır

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (5.6)$$

5.2.2.2 Momentum Denklemi

Newton'un ikinci hareket kanunu sonsuz küçük sabit kontrol hacmine uygulandığında lineer momentumun zaman bağlı olarak değişiminin kontrol hacmine etki eden dış kuvvetlerin toplamına eşit olduğunu söyleyebiliriz. Bu koşul aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{V} dV = \sum \vec{F} \quad (5.7)$$

Kontrol hacmine etki eden dış kuvvetler hacimsel kuvvetler ve yüzey kuvvetleri olarak ikiye ayrılabilir. Normal gerilme ya da kayma gerilmeleri yüzey kuvvetlerini temsil ederken

yerçekimi hacimsel kuvvetleri temsil eder. Viskoz etkilerin baskın olduğu akış koşulları için momentum denkleminde yüzeye dik basınç alanı yerine gerilme tensörü σ kullanılır. Gerilme tensörü;

$$\sigma = -p\vec{I} + \tau \quad (5.8)$$

olmak üzere ortalama normal gerilmenin basıncın negatif değerine eşitlenmiş hali ve viskoz gerilme terimi olmak üzere iki kısımdan oluşur. Momentum denklemi genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{f} - \nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (5.9)$$

Kartezyen koordinat sisteminde bu denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (5.10)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (5.11)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (5.12)$$

Viskoz gerilmeler hız gradyeni cinsinden ifade edilirse.

$$\tau_{xx} = -\frac{2}{3}\mu Div + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5.13)$$

$$\tau_{yy} = -\frac{2}{3}\mu Div + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.14)$$

$$\tau_{zz} = -\frac{2}{3}\mu Div + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (5.15)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5.16)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (5.17)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (5.18)$$

Yukarıdaki viskoz gerilme ifadeleri momentum denkleminin içine yerleştirilirse Navier – Stokes denklemlerini elde ederiz Navier – Stokes denklemleri kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki şekilde ifade edilir. .

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\mu.Div)}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\mu.Div)}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho f_w - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\mu.Div)}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.21)$$

5.2.2.3 Enerji Denklemi

Termodinamiğin 1.yasasına uygun olarak kontrol hacmi için bir enerji denklemi yazılmak istenirse bu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\iiint_V \rho \frac{D}{Dt} (e + 0.5 q^2) dV = \iiint_V \rho \vec{f} \cdot \vec{V} dV + \iint_S \vec{n} \cdot \left(\vec{V} \sigma - \dot{Q} \right) dS \quad (5.22)$$

Yukarıdaki denklemde \dot{Q} kontrol yüzeyinden kontrol hacmine giren çıkan ısı geçiş hızı, e özgül iç enerjidir. Denklemin sağ tarafındaki ilk İntegral hacimsel işi, ikinci İntegral ise kontrol yüzeylerinde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan işi belirtmektedir. 5.22 denklemine gauss teoremi uygulanırsa,

$$v \frac{D}{Dt} (e + 0.5q^2) - \rho \vec{f} \cdot \vec{V} - \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \sigma) + \nabla \cdot \dot{Q} = 0 \quad (5.23)$$

5.23 denklemi mekanik enerji denklemini de içermektedir. Mekanik enerji denklemi 5.24'te verilmiştir.

$$v \frac{D}{Dt} (0.5q^2) - \rho \vec{f} \cdot \vec{V} - \vec{V} \cdot \text{div} \sigma = 0 \quad (5.24)$$

5.24'te ifade edilen mekanik enerji denklemi temel enerji denkleminden çıkartılırsa ısı enerji denklemi elde edilir.

$$v \frac{De}{Dt} - p \nabla \cdot \vec{V} = \phi - \nabla \cdot \dot{Q} \quad (5.25)$$

$$h \equiv e + \frac{p}{\rho} \quad \text{Özgül Entalpi} \quad (5.26)$$

Isı geçiş hızı yerel sıcaklık gradyanıyla Fourier ısı transfer yasası ile ilişkilendirilir.

$$\dot{Q} = -k \nabla T \quad (5.27)$$

Kartezyen koordinat sisteminde entalpi denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = \phi - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5.28)$$

Bu denklemdeki viskoz kayıp terimi ise aşağıda verilmiştir.

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] + 0.5 \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (5.29)$$

5.2.3 Sonlu Hacim Metoduna Giriş ve Sürekli Ortam Mekaniğinde Sayısal Yöntemler

Akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılan temel sayısal yöntemler sonlu farklar, sonlu ve sınır elemanlar ile sonlu hacimler yöntemi olarak sıralanabilir. Aşağıda bu yöntemlere dayandığı temel prensipler sıralanmış ve sonlu hacim metoduna bir giriş yapılmıştır.

5.2.3.1 Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar yöntemi diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan ilk sayısal yöntemlerden biridir. İlk olarak Euler tarafından 1768'de kullanılmıştır. (Blazek, 2001). Bu yöntem temel korunum denklemlerinin diferansiyel formları üzerine direkt olarak uygulanabilir. Diferansiyel denklemlerin türevlerinin ve diğer terimlerinin birbirinden sonlu farklı uzaklıklara ayrılmış sonlu noktalarda ayrıklaştırılması sonucu elde edilen cebirsel denklem sistemlerinin çözümü sonlu farklar yönteminin temelini teşkil eder. Çözüm alanı sonlu noktalara ayrılarak çözüm aranır dolayısıyla hassasiyet çözüm alanının ayrıklaştırılmasıyla direkt olarak ilgilidir.

Sonlu fark formülasyonlarının güçlü yanı basitliği ve hassasiyettir. Ancak sonlu farklar metodu yapısal (structured) bir çözüm ağına (grid) ihtiyaç duyar. Dolayısıyla bu yöntemin uygulanabilirliğini sınırlayan en önemli dezavantajını oluşturur. Basit geometriler için bazı direkt nümerik çözüm yaklaşımları olsa da endüstriyel uygulamaları sınırlıdır.

5.2.3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi temelde yapısal analizler için geliştirilmiş ve geliştirildikten yaklaşık (1956) on sene sonra sürekli ortam mekaniğine uygulanmıştır. Ancak bu yöntemin Euler ve Navier Stokes Denklemlerinin çözümünde kullanımının yaygınlaşması 90'lı yıllarında başında olmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemini uygulanabilmesi için çözüm alanının probleme göre 2D veya 3D elemanlara (sonlu eleman) bölünmesi gereklidir (grid yaratılması). Bu yöntemde yapısal olmayan (unstructred mesh)elemanlar kullanılabilir. Elemanların şekli çözüm alanının boyutuna şekline, sınır koşullarının özelliğine ve ayrıca problemi tanımlayan ana

denklemlerin karakteristikleri dikkate alınarak seçilir. Fiziksel olayın her bir sonlu eleman üzerinde etkisi diferansiyel denklemler tanımlanır ve her elemanın davranışı diğer elemanlarla denge koşullarını ve sürekliliği sağlayacak şekilde tüm çözüm alanı üzerinde elemanın davranışı modellenir. Elemanın fiziksel davranışına uygun olarak tanımlanan başlangıç değerleri ve sınır koşulları altında sürekli ortamdaki diferansiyel formlar lineer cebirsel denklemlere dönüştürülür.

Sonlu eleman metodu yapısal olmayan ağ yapısına izin verdiği için kompleks geometriler ile ilgili akış problemlerinin çözümünde ve Newtonien olmayan akışların çözümünde tercih edilir. Sonlu elemanlar metodunun matematiksel altyapısı yapısal ağ üretimine izin veren diğer bir metod olan sonlu hacim metoduna göre daha karmaşıktır. Dolayısıyla bu metodun uygulanması daha çok çaba ve donanım ihtiyacı duyar. Her ne kadar sonlu hacim metodu daha tercih edilir olsa da bazı karmaşık problemlerin çözümünde her iki metod kombine olarak kullanılabilir. (Kaykaoğlu,1994 – Blazek, 2001)

5.2.3.3 Sınır Elemanlar Yöntemi

Bu yöntemde akışı karakterize eden diferansiyel formdaki denklemler çözüm alanı sınırlarında İntegral denklemlere dönüştürülerek bu sınırlarda tanımlanmış elemanlar üzerinde çözümlenerek lineer cebirsel denklemler elde edilir. Bu yöntem kompleks geometrilerde uygulanmaktadır. (Kaykaoğlu,1994)

5.2.3.4 Sonlu Hacim Yöntemi

Navier stokes denklemlerini sayısal olarak çözmek için yukarıda da sıraladığımız pek çok yöntem geliştirilmiştir. Sonlu hacim metodu akış hacmi ayrıklaştırılırken yapısal elemanlara (structured mesh) ihtiyaç duymaması diğer metotlara karşı bir üstünlük ve esneklik sağlar ve aynı zamanda yapısal elemanlarda çözüm için kullanılabilir. Her ne kadar bu özellik sonlu elemanlar yönteminde de mevcut olsa da sonlu hacim metodu kötü ayrıklaştırılmış ve üniform olmayan sayısal çözüm ağı geometrilerinde bile diğer metotlara nazaran daha iyi sonuç vermektedir. Ayrıca hibrid (melez) çözüm ağı yaklaşımları (yapısal ve yapısal olmayan elemanların birlikte kullanımı) sonlu hacim metoduna fazladan bir esneklik sağlamaktadır.

Tüm bu yöntemler temelde akış denklemlerinin tanımlanan sınır şartları için çözülmesini amaçlar. Ancak sonlu hacim metodu temel korunum denklemlerinin direkt olarak

ayrıklaştırılması prensibine dayandığı için yukarıda belirtildiği gibi modellemenin kötü yapıldığı durumlarda dahi daha iyi sonuç verir.

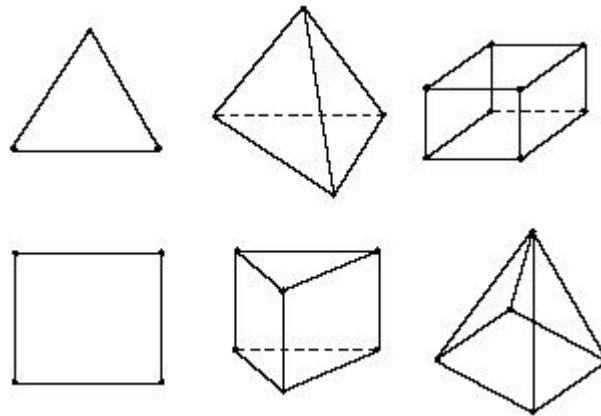
Bu bölümde bölüm 5.2.1’de tariflenen HAD metodolojisine paralel olarak sonlu hacim metodunun avantajları kısaca tanımlanmış ve bu yöntemin ayrıntıları incelenmeden önce diğer sayısal yöntemlerinde kısaca tanımlanarak karşılaştırmalar yapılması amaçlanmıştır. Günümüzde sonlu hacim metodu çok popüler sayısal yaklaşımlardan biridir pek çok HAD kodu daha öncede belirtildiği gibi bu yaklaşımı kullanmaktadır. Bölüm 5.3’te Fluent HAD yazılımının dayandığı temeller sonlu hacim metodu çerçevesi içinde açıklanmaya çalışılmıştır. (Kaykaoğlu,1994 – Blazek, 2001)

5.3 Sonlu Hacim Metodunun İncelenmesi

Bölüm 5.2.1’de HAD metodolojisi tariflenmiş, bölüm 5.2.2’de ise akışkan hareketinin temel denklemleri verilmiştir. Bu aşamada Fluent yazılımının temel denklemlerin çözümünde kullandığı nümerik şemalar ve çözüm alanının ayrıklaştırılması üzerinde durulacaktır.

5.3.1 Çözüm Alanının Ayrıklaştırılması

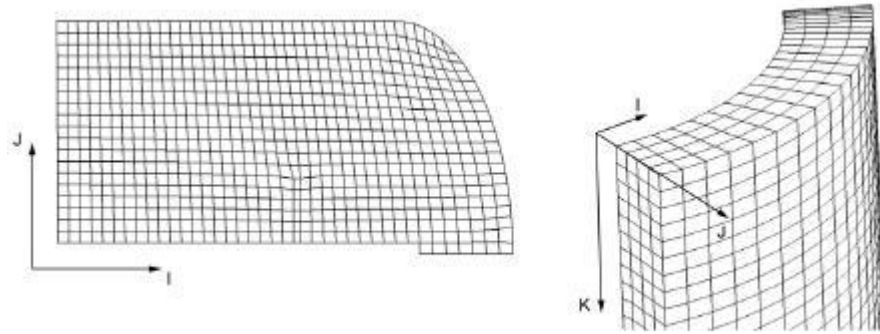
Çözüm alanının ayrıklaştırılmasının anlamı akış hacminin tanımlanan sınır şartları içerisinde akışı tanımlayan denklemlerinin çözüleceği parçalara bölünmesidir. İki veya üç boyutlu çözüm alanları için sayısal ağ üretiminde genel olarak kullanılan elemanlar aşağıda örneklenmiştir.



Şekil 5.1 Sayısal ağ üretiminde kullanılan eleman tipleri (Marshall ve Bekker 2003)

Sayısal çözüm ağının kalitesi çözümlerin kalitesine de etki eder. Pek çok uygulamada elde edilen sonuçlardaki sapmanın sebebi oluşturulan sayısal çözüm ağının yetersizliğidir. Fluent yazılımı birçok HAD kodu gibi kendi sayısal ağ üretme aracı olan Gambit yazılımını kullanır. Fluent yazılımı hem yapısal hem de yapısal ağ olmayan sayısal ağ geometrileri ile çalışabilir. Yapısal ve yapısal olmayan sayısal ağ geometrileri arasındaki fark aşağıda açıklanmıştır.

Yapısal ağ elemanları daima dörtgen (2D) ya da prizmatik (3D) elemanlardan (mesh) oluşur. Bu elemanlar I, J, K (Bknz Şekil 5.2) uzayında bir adres ile belirtilir ve I, J, K her bir sayısal çözüm ağı yönünde elemanları numaralamak için kullanılan indekslerdir. I, J, K doğrultularının koordinat sisteminin x, y, z doğrultuları ile çakışmalarına gerek yoktur. Yapısal olmayan sayısal ağ üretimi için bu adresleme kuralı geçerli değildir. (Marshall ve Bekker 2003)

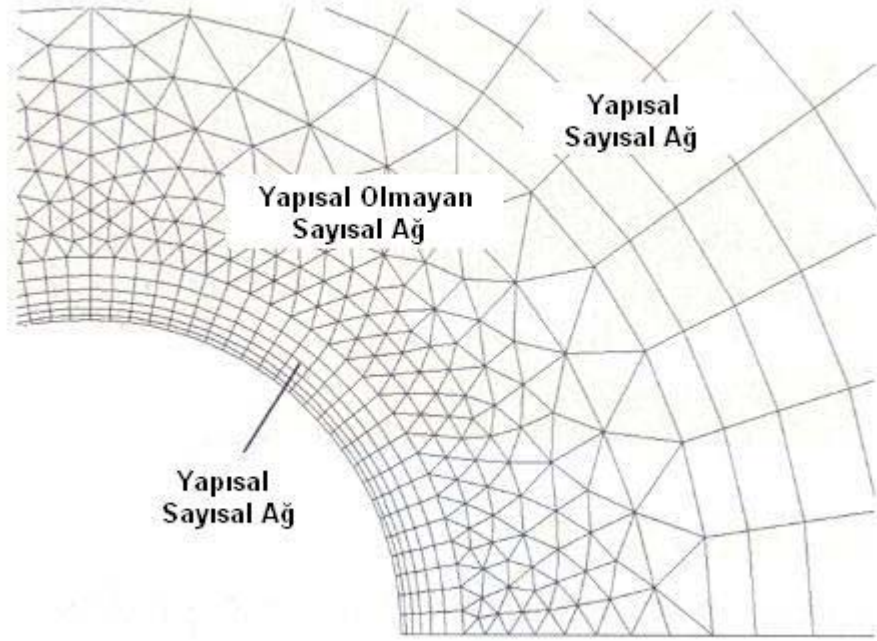


Şekil 5.2 Yapısal sayısal ağ geometrisi (2D ve 3D) (Marshall ve Bekker 2003)

Kompleks geometriler için yapısal olmayan ağ üretimi nispeten daha kolaydır. Nasıl bir sayısal ağ şeması seçileceği tamamen geometri ve problemin karakteri ile ilgilidir. Eski yapısal HAD kodları genelde daha hızlı yakınsamakta ve daha doğru çözüm vermektedir ancak bugün yapısal ve yapısal olmayan ağ kullanımı HAD kodları için çok büyük bir problem teşkil etmemektedir. Örneğin sınır tabakaların modellenmesinde duvara yakın bölgelerde akışa paralel yapısal ağ kullanımı yapısal olmayan ağ kullanımına nazaran daha iyi sonuç verir. Yapısal ve yapısal olmayan sayısal ağ üretim yaklaşımlarının her ikisinin birden avantajlarından yararlanmak için hibrid (melez) çözüm şemaları geliştirilmiştir. Yine sınır tabaka örneğini ele alırsak hibrid sayısal ağ üretim şeması ile sınır tabakada yapısal elemanlar kullanılırken sınır tabaka dışında yapısal olmayan elemanlar kullanılarak optimizasyon yapılmış olur.

Genel olarak sayısal ağın sıklığının çözümün hassasiyetini arttırdığı söylenebilir ancak buna paralel olarak çözüm süresi de uzayacaktır. Hibrid ve uniform olmayan sayısal ağ üretimi

özellikle çözüm alanı içerisindeki eleman sayısının optimize edilmesine yardımcı olur.



Şekil 5.3 Hibrid sayısal ağ geometrisi (Çengel – Cimbala 2006)

Modellenecek geometrinin karmaşıklığına göre cebirsel ağ üretimi, eliptik ve hiperbolik ağ üretimi vs... olarak sıralanabilecek pek çok ağ üretim ve optimizasyon tekniği mevcuttur burada amacımız bu yöntemlerin ayrıntılarına girmek değil sayısal ağ üretimi hakkında kısa bilgi vermektir.

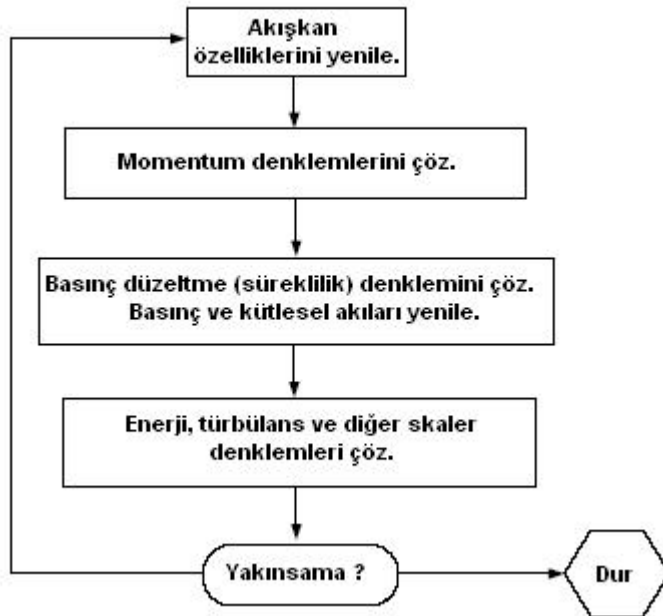
5.3.2 Akış Denklemlerinin Çözümünde Kullanılan Temel Yaklaşımlar

Fluent temel denklemlerin çözümünde bütünleşik (coupled) ve ayrık (segregated) çözüm algoritması olmak üzere iki ayrı çözüm algoritması ile çalışmamıza izin verir. Her iki yaklaşımda bölüm 5.2.1’de belirtilen metodolojiyi ya da başka bir ifadeyle sonlu hacim metodunu kullanarak çözüme ulaşılır ancak bu iki metod arasında bazı yöntem farklılıkları vardır. Bu çalışmada ele aldığımız iki fazlı halka akış rejimi Fluent VOF metodu ile modellenmiştir ve bu metod sadece ayrık çözüm algoritması birlikte kullanılabilir. Çalışmanın devamında ayrık çözüm algoritması ele alınacaktır bölüm 5.3.2.1 ve 5.3.2.2’de her iki metodun dayandığı temel prensipler açıklanmıştır. (Fluent User Guide, 2005)

5.3.2.1 Ayrık Çözüm Algoritması

Bu yaklaşım ile korunum denklemleri sıra ile çözülür. Korunum denklemleri lineer olmadığı için iterasyonlar yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir. İterasyon adımları şöyle sıralanabilir.

- İlk adımda akışkan özellikleri bir önceki iterasyonun sonuçlarına göre yenilenir. Eğer iterasyona daha yeni başlanılmışsa yenileme başlangıç değerlerine göre yapılır.
- Bir önceki iterasyona göre hesaplanmış hız alanını yenilemek için momentum denklemleri basınç ve kütle akılar için mevcut değerler kullanılarak çözülür.
- İkinci adımda elde edilen hız değerleri lokal olarak süreklilik denklemi ile uyumsuz olabilir, basıncın düzeltilmesi için süreklilik ve lineerleştirilmiş momentum denklemlerinden poisson tipi bir denklem türetilir. Bu basınç düzeltme denklemi basınç, hız alanı ve kütle akılarda gerekli düzeltmelerin yapılarak süreklilik denkleminin sağlanması için çözülür.
- Türbülans, enerji ve radyasyon gibi skaler büyüklükler için uygun denklemler diğer değişkenlerin önceden yenilenmiş değerleri kullanılarak çözülür.
- Yakınsama kontrolü yapılır eğer yakınsama sağlanmışsa iterasyon sonlandırılır.

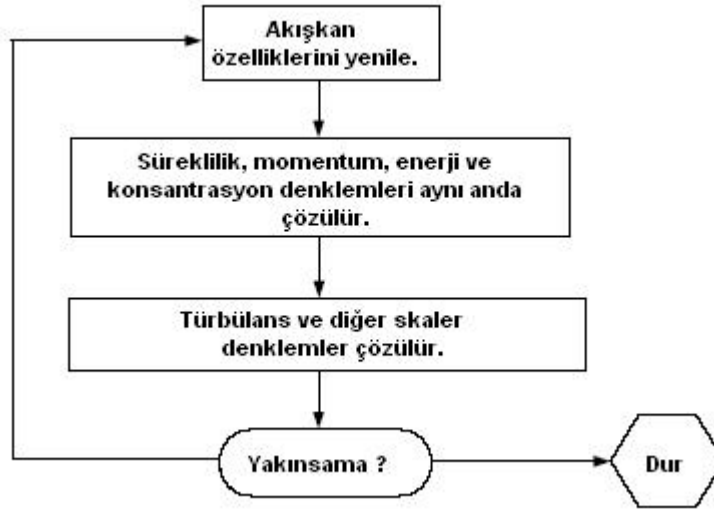


Şekil 5.4 Ayrık çözüm algoritması (Fluent User Guide 2005)

5.3.2.2 Bütünleşik Çözüm Algoritması

Bu yaklaşım ile süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aynı anda, türbülans ve radyasyon gibi skaler büyüklükler ise korunum denklemlerinden sonra çözülür. Yine ayrık çözüm algoritmasında olduğu gibi iterasyonlar aşağıdaki sırayla yakınsama sağlanıncaya kadar sürdürülür.

- İlk adımda akışkan özellikleri bir önceki iterasyonun sonuçlarına göre yenilenir. Eğer iterasyona daha yeni başlanılmışsa yenileme başlangıç değerlerine göre yapılır.
- Süreklilik, momentum, enerji ve konsantrasyon denklemleri aynı anda çözülür.
- Türbülans, enerji ve radyasyon gibi skaler büyüklükler için uygun denklemler diğer değişkenlerin önceden yenilenmiş değerleri kullanılarak çözülür.
- Yakınsama kontrolü yapılır eğer yakınsama sağlanmışsa iterasyon sonlandırılır.



Şekil 5.5 Bütünleşik çözüm algoritması (Fluent User Guide 2005)

5.3.3 Akış Denklemlerinin Ayrıklaştırılması

Fluent temel akış denklemlerini nümerik olarak çözülebilecek cebirsel denklemler haline getirebilmek için kontrol hacmi temelli sonlu hacim metodu yaklaşımını kullanır. Bu kontrol hacmi tekniği temel akışkan denklemlerinin her bir kontrol hacmi için entegre edilmesi ve her bir değişken için ayrıklaştırılmış korunum denklemlerinin kontrol hacmi temelinde sağlanmasını içerir.

Temel akışkan denklemlerinin ayrıklaştırılması bir skaler ϕ değişkeni için sürekli rejimde (steady state) korunum denklemi üzerinden açıklanabilir. Denklem 5.30'da keyfi bir kontrol hacmi V için korunum denklemi İntegral formda verilmiştir.

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (5.30)$$

ρ : Yoğunluk

\vec{v} : Hız vektörü ($= u \cdot i + v \cdot j$ İki boyutta gösterim)

\vec{A} : Yüzey alan vektörü

Γ_{ϕ} : ϕ için difüzyon katsayısı

∇_{ϕ} : ϕ gradyeni

S_{ϕ} : Her birim hacim ϕ kaynak terimi

5.30 denklemi sayısal çözüm ağı içerisindeki her bir kontrol hacmi ya da hücreye uygulanırsa 5.31 denklemi elde edilir. Şekil 5.6 'da bir kontrol hacmi örneklenmiştir.

$$\sum_f^{N \text{ yüzeyler}} \rho_f \vec{v}_f \cdot \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N \text{ yüzeyler}} \Gamma_{\phi} (\nabla_{\phi})_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (5.31)$$

$N_{\text{yüzeyler}}$: Hücreyi çevreleyen yüzeylerin sayısı

ϕ_f : f yüzeyinden taşınan ϕ miktarı

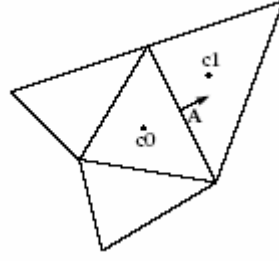
$\rho_f \cdot \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$: Yüzeyden geçen kütle akı

\vec{A}_f : f yüzeyinin alanı $|A| = |A_x \cdot i + A_y \cdot j|$ (İki boyutta gösterim)

$(\nabla_{\phi})_n$: f yüzeyine normal ∇_{ϕ} büyüklüğü

V : Hücrenin hacmi

Fluent tüm akış denklemlerini yukarıdaki genelleştirilmiş formda çözer ve bu yapı kolaylıkla üç boyutlu geometrilere de uygulanabilir.



Şekil 5.6 Kontrol hacmi (Fluent User Guide 2005)

Fluent başlangıçta ayrıklaştırılmış skaler ϕ değerini hücre merkezinde saklar (Şekil 5.6 C_0 ve C_1) Fakat yüzey değerleri ϕ_f (face value) taşınım denklemi (Denklem 5.31) için gereklidir ve hücre merkezindeki değerden enterpole edilmelidir. Bu akış yönü metodu (upwind şeması) şeması ile sağlanabilir.

Bu akış yönü metodu ϕ_f (face value)'in değerinin normal hız vektörünün yönüne göre hücrenin çıkış (upwind ya da upstream) değerinden türetilmesidir. Fluent bu metodun farklı versiyonlarını kullanmamıza izin verir. Bu metodlar aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır. Şekil 5.6'da verilen kontrol hacmi takip eden bölümlerde yapılan açıklamalarda kullanılmıştır.

5.3.3.1 Birinci Dereceden Akış Yönü Metodu

Birinci dereceden hassasiyetin yeterli ya da $Pe \gg 1$ koşulunun sağlandığı konveksiyon etkisindeki akışlarda kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda herhangi bir değişken için hücre merkezindeki değerlerin hücre ortalamasını temsil ettiği varsayılır ve hücre merkezindeki bu değer normal hız vektörü yönüne göre hücre sınırındaki değere eşit olduğu kabul edilir. Eğer bu ifade Şekil 5.6 üzerinden açıklanırsa; ϕ skaler büyüklüğünün c_0 'daki değeri A 'da ki değerine eşittir.

5.3.3.2 Üs Kanunu Yaklaşımı

Üs kanunu ayrıklaştırma şeması ϕ skaler büyüklüğünün yüzey değerini bir boyutlu konveksiyon-difüzyon denkleminin kesin çözümünü kullanarak bulur. (Denklem 5.32 – Γ ve $\rho u \frac{\partial \phi}{\partial x}$ boyunca sabittir)

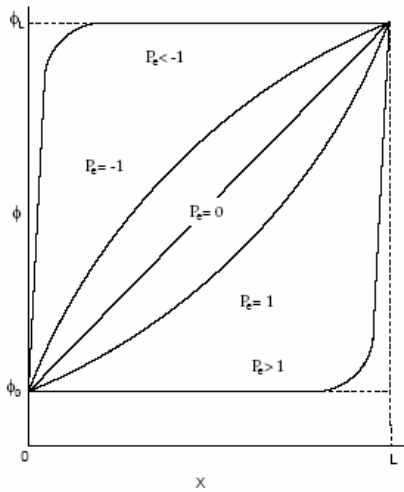
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5.32)$$

Denklem 5.32 \emptyset skaler büyüklüğünün x ile nasıl değiştiğini göstermek için entegre edilirse denklem 5.33 elde edilir.

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(Pe \frac{x}{L}\right)}{\exp(Pe) - 1} \quad (5.33)$$

$$\phi_0 = \phi|_{x=0} \quad \phi_L = \phi|_{x=L} \quad Pe = \frac{\rho u L}{\Gamma} \quad (5.34)$$

$\phi(x)$ 'in $x=0$ ve $x=L$ arasında değişimi Şekil 5.7'de ifade edilmiştir. Buna göre yüksek Pe sayıları için \emptyset büyüklüğünün değeri $x = L/2$ 'de yaklaşık olarak akış yönünde olan hücre sınırındaki değerine (upwind value) eşittir. Eğer akış konveksiyon etkisindeyse enterpolasyon basitçe \emptyset değişkenin ϕ_f (face value) değeri onun akış yönünde olan hücre sınırındaki değerine eşit olduğu kabulü ile yapılabilir. Bu zaten standart upwind yaklaşımıdır.



Şekil 5.7 \emptyset skaler büyüklüğünün x ile değişimi (Fluent User Guide 2005)

Eğer üs kanunu yaklaşımı seçilmişse Fluent denklem 5.33'ü kullanır. Bu enterpolasyon şeması $0 \leq Pe \leq 10$ değerleri arasında daha doğru sonuç verir. Eğer $Pe=0$ ise (akış yok ve zayıf difüzyon) Şekil 5.7'de görüleceği gibi \emptyset skaler büyüklüğü $x = 0$ ve $x = L$ arasındaki lineer ortalama kullanılarak enterpole edilebilir. Üs kanunu yaklaşımı yüksek konveksiyonun hâkim olduğu akışlarda birinci dereceden akış yönü metodu ile aynı sonucu verir ancak $0 \leq Pe \leq 10$ aralığında kullanılması daha doğru sonuç verdiği için tavsiye edilir.

5.3.3.3 İkinci Dereceden Akış Yönü Metodu

İkinci dereceden hassasiyetle çözüm arandığında bu yaklaşım tercih edilir. Bu yaklaşım birinci dereceden akış yönü metodunun geliştirilmiş halidir. Yüksek dereceden hassasiyet yüzey değeri (upwind value) gradyenlerini tanımlamak için Taylor serisi açılımının kullanılmasıyla sağlanır. Eğer ikinci dereceden upwind yaklaşımı kullanılıyorsa yüzey değeri ϕ_f (face value) aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanır.

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \Delta\vec{s} \quad (5.35)$$

Burada ϕ ve $\nabla\phi$ hücre merkezindeki değer ile onun akış yönündeki komşu hücresindeki gradyenidir. $\Delta\vec{s}$ ise akış yönündeki komşu hücrenin merkezinden diğer hücrenin akış yönündeki yüzeyinin merkezine doğru olan yerdeğiştirme vektörüdür. Görüldüğü gibi bu formülasyon $\nabla\phi$ gradyeninin her bir hücrede hesaplanmasını gerektirir. $\nabla\phi$ gradyeni diverjans teoremi yardımıyla hesaplanabilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

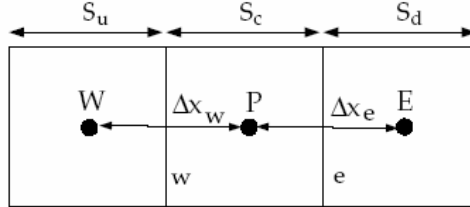
$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum^{N \text{ yüzeyler}} \tilde{\phi}_f \vec{A} \quad (5.36)$$

Burada $\tilde{\phi}_f$ yüzey değeri, ϕ değerinin yüzeye bitişik iki hücreden ortalamasının alınması ile bulunur. Sonuç olarak bu yaklaşım birinci dereceden akış yönü metoduna göre daha doğru sonuç vermesine karşın ikinci dereceden akış yönü metodu kullanılması hesaplama sürelerini uzatmaktadır. Akış yönü şemaları basitlikleri nedeniyle erken döneme HAD kodlarında da günümüzde olduğu gibi tercih edilmişlerdir. Akış yönü yönteminin bir dezavantajı akış sayısal çözüm ağı (mesh) ile paralel değil ise transport özellikleri gerçek değerlerinde sapma gösterir. Bu hatalı durum difüzyon bir karakter gösterir ve sayısal ağ boyunca yayılır. Konu ile ilgili literatürde bu hata nümerik difüzyon olarak isimlendirilir. HAD kodları sayısal yöntemin doğasından gelen bu tip hataları azaltmak için farklı yaklaşımlar sunmaktadır.

5.3.3.4 QUICK Yaklaşımı

QUICK ya da kuadratik akış yönü metodu yaklaşımı ikinci dereceden akış yönü (Second order upwind) metoduna benzer bir yöntemdir. İkinci dereceden akış yönü metodu dörtgen ve altıgen sayısal çözüm ağı (mesh) kullanıldığında kötü sonuç verir. Kuadratik akış yönü

metodu bu kısıtlamayı kaldıran bir ikinci dereceden akış yönü metodu modifikasyonudur. Bu yöntem ikinci dereceden akış yönü metodu yaklaşımının ağırlıklı ortalaması ve değişkenin merkeze dayalı enterpolasyonunu esas alır. Kuadratik akış yönü metodu yaklaşımı Şekil 5.8 üzerinden açıklanırsa e yüzeyi için akışın soldan sağa doğru olduğu kabulü ile ϕ taşınım değeri aşağıdaki gibi ifade edilir.



Şekil 5.8 Bir Boyutlu Kontrol Hacmi (Fluent User Guide 2005)

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (5.37)$$

Yukarıdaki denklemde $\theta=1$ için ikinci dereceden enterpolasyon elde edilirken $\theta=0$ için ikinci dereceden akış yönü değeri elde edilir. Kuadratik akış yönü yaklaşımı $\theta=1/8$ için sağlanır. Özetlenirse bu yaklaşım değişkenin akış yönündeki (upwind) hücredeki değerine ilaveten akış yönünde bir sonraki hücredeki değeri de kullanır ve değişkenin yüzey değerini hesaplayabilmek için değişken P boyunca üç noktada bir kuadratik fonksiyon ile ifade edilir. Bu şema dönele akışların çözümünde belirgin bir iyileştirme sağlar ve akışa paralel yapısal çözüm ağı geometrilerinde daha iyi sonuç verir.

5.3.3.5 Merkezi Ayırıklaştırma Şeması

Taşınımın olmadığı ve $Pe=0$ olan akışlar için ϕ değişkeni hücre merkezleri arasında lineer olarak değişir ve böylelikle yüzey değerleri lineer enterpolasyon ile bulunabilir. Eğer lineer enterpolasyon genel olarak taşınımın ve difüzyonun mevcut olduğu halde kullanılırsa bu ayırıklaştırma şeması merkezsel ayırıklaştırma şeması olarak isimlendirilir. Bu yaklaşım genel amaçlı bir ayırıklaştırma şeması olarak kullanılırsa ve sayısal çözüm ağı çok sık oluşturulmamış ise büyük hatalara yol açar bu durumun tek istisnası LES (Büyük Girdap Simülasyonu) türbülans modelinin kullanıldığı durumlardır.

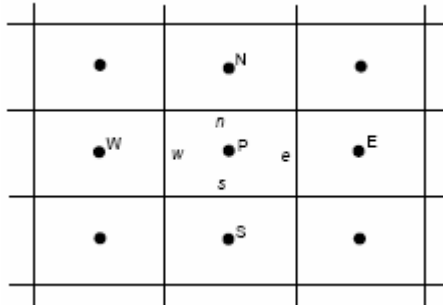
5.3.3.6 Ayrıklaştırma Şemasının Seçilmesi

Yukarıda temel bazı ayrıklaştırma şemaları açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıklaştırma şemasının seçimi ele alınan problemin yapısı ve modelleme ile ilgilidir. Yüksek dereceden ayrıklaştırma şemaları her zaman en doğru sonucu vermeyebilir ya da problemin çözümü gereğinden fazla zaman alabilir. Eğer sayısal çözüm ağı akışa paralel ise birinci dereceden akış yönü metodu ya da üs kanunu yaklaşımları kabul edilebilir doğrulukta çözümler sunarlar. Çok genel bir yaklaşım olarak birinci dereceden şemalar kısmi olarak yakınsamış çözümler sunarlar tam yakınsamış çözümler elde edilmesi ikinci dereceden şemalarla çözüme devam edilmesi ile sağlanabilir ancak bu birazda istenen hassasiyet ile de ilgilidir. Pek çok problemde birinci dereceden şemaların sunduğu hassasiyet yeterli olabilmektedir. Bu çalışmada donanım ve zaman kısıtlaması göz önüne alınarak ele aldığımız iki fazlı halka akış problemi birinci dereceden yaklaşımlar kullanılarak çözümlenmeye çalışılmıştır.

5.3.3.7 Ayrıklaştırılmış Denklem Sisteminin Elde Edilmesi

Yukarıda verilen ayrıklaştırma şemalarından biri yardımıyla yüzey değerlerinin hesaplanmasından sonra her bir hücre merkezindeki bilinmeyen bir terimle çarpılan değişkenler toplanır. Her bir terim büyük bir sabit katsayı ile çarpılır ve bu katsayılar fiziksel özellikler, lokal akış koşulları ve bir önceki iterasyon gelen sonuçları içerir. Ayrıklaştırılmış transport denklemi (5.31) bu katsayılar cinsinden Şekil 5.9'da verilen iki boyutlu sayısal ağ için ifade edilirse denklem (5.38) elde edilir.

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W = \sum_{i, \text{Komşo Hücreler}} a_i \phi_i \quad (5.38)$$



Şekil 5.9 İki boyutlu sayısal çözüm ağı (Marshall ve Bekker 2003)

Her bir hücre için komşu hücrelerin sayısı dolayısıyla Denklem 5.38'in karmaşıklığı sayısal çözüm ağı topolojisine bağlıdır fakat bu sayı bir hücreyi çevreleyen yüzeylerin sayısına eşittir. Kompleks veya basit bir akış simülasyonu için bile sayısal çözüm ağı içerisindeki her bir hücrede her değişken için bir denklem çözülecektir. Ayrıca bu denklemler bütünlüktür örneğin momentum denkleminin çözümü her bir skaler büyüklüğün transport denkleminin çözümüne etki eder. Fluent oluşan lineer denklem sistemini Gauss-Seidel yaklaşımı ve cebirsel çoklu çözüm ağı (multigrid) metodlarını kullanarak çözer. (Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgi için Fluent User Guide 6.2.16, Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications J.Blazek 2001, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer J.C.Tannehill, D.A.Anderson ve R.H. Pletcher Second Edition 1997) .

5.3.4 Çözüm Metodlarının İncelenmesi

Sayısal çözüm ağının ve akış denklemlerinin ayrıklaştırılması sonucu her bir hücrede aynı anda çözülmesi gereken cebirsel denklem sistemleri elde edilir. Ayrıklaştırılmış bu denklem sistemleri iteratif olarak çözülmelidir. Bölüm 5.3.2'de belirtildiği gibi Fluent temel olarak bütünlük ve ayrık olmak üzere iki çözüm algoritması sunar. Ayrık çözüm algoritması sıkıştırılmaz ve kompleks akış problemleri için daha çok tercih edilen bir çözüm yaklaşımıdır. İki fazlı akış problemleri de bu kapsamda değerlendirildiğinden bu çalışmada ayrık çözüm algoritması VOF iki fazlı akış modeli ile birlikte uygulanmıştır. Ayrık çözüm algoritması kapalı(implicit) olarak çözüm yapar.

Fluent'te ayrık çözüm algoritması kullanılarak bir denklem sisteminin çözümü Gauss-Seidel lineer denklem çözücüsü yardımıyla yapılır. Fluent'in kullandığı bir başka yaklaşımda özellikle çözüm sürelerini kısaltmada etkili olan AMG (Algebraic Multigrid) ve diğer çoklu çözüm ağı şemalarıdır. Bu çalışmada çoklu çözüm ağı (multigrid) şemalarının ayrıntıları ele alınmayacaktır çözüm metodlarının incelenmesi ile amaçlanan HAD metodolojisinin genel işleyişini tanıtmak ve iki fazlı akışlara nasıl uygulandığını göstermektir. Konunun matematiksel temelini kapsamlı olarak incelenmesi ayrı bir çalışma olabilir.

Kullanılan çözüm yaklaşımından bağımsız olarak bir HAD analizinin amacı akışı tanımlayan süreklilik, momentum, enerji ve türbülans denklemlerinin iteratif olarak çözülerek iterasyonlardan gelen toplam hata payının daha önceden belirlenen yakınsama kriterinin altına

düşürülmesi ve denge halini veren yakınsamış çözümlün elde edilmesidir. Çözüm süreci içinde tanımlanması gereken bazı önemli noktalar ve çözüml algoritmaları ile ilgili açıklamalar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

5.3.4.1 Basıncın Enterpolasyonu

Fluent basınç ve hız değerlerini hücre merkezinde saklar ancak momentum denkleminin ayrıklaştırılması sırasında C_0 ve C_1 (Şekil 5.6) arasında değerleri arasındaki yüzey değerine ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla C_1 değerinin eldesi için bir enterpolasyon şemasına ihtiyaç duyulur.

Fluent standart enterpolasyon şeması basınç değerlerini yüzeylerde enterpole eder ancak bu yaklaşım basınç değişimi hücre merkezleri arasında (C_0 ve C_1 -Şekil 5.6) lineer olarak değiştiği zaman güvenilirdir. Eğer ele alınan kontrol hacimleri arasında basınçta sıçramalar varsa ya da basınç profili yüksek gradyenlere sahipse bu şema kullanılamaz. Standart enterpolasyon şemasının sorun yarattığı diğer bir halde yüksek cisim kuvvetlerinin etkisindeki akışlardır. Fluent duvarda normal basınç gradyenini sıfır olarak kabul eder ancak bu sadece sınır tabaka için geçerlidir. Fluent standart basınç enterpolasyon şemasının sorun yarattığı durumlar için alternatif metodlar sunar. Bunlar lineer, ikinci dereceden enterpolasyon, cisim kuvveti ağırlıklı enterpolasyon (Body Force Weighted) ve PRESTO (**PRE**ssure **ST**aggering **O**ption) olarak sıralanabilir.

Bizim modelleme yaklaşımımızla uyumlu olan enterpolasyon şemaları PRESTO ya da cisim kuvveti ağırlıklı enterpolasyondur. Zaten ikinci dereceden enterpolasyon ve lineer enterpolasyon şemaları bizim kullandığımız iki fazlı akış modeli olan VOF modeli ile kullanılamamaktadır ve problemimizin doğasına uygun metodlar değillerdir. Eğer basınç gradyenlerinde bir süreksizlik ve yoğunlukta ani değişiklik varsa (doğal konveksiyon ve VOF modelinin kullanıldığı genel problemler) cisim kuvveti ağırlıklı enterpolasyon şeması önerilmektedir. Bu çalışmada da halka akışı modellemek için cisim kuvveti ağırlıklı enterpolasyon şeması tercih edilmiştir.

5.3.4.2 Basınç ve Hızın Eşleştirilmesi İçin Algoritmalar

Basınç ve hız değerleri sayısal çözüml ağının farklı noktalarında hesaplanır bu iki değerin eşleştirilmesi HAD teknolojisinin en büyük problemlerinden biridir. ϕ skaler değişkeninin

taşanımı lokal hız alanının yönü ve mertebesine bağlıdır. Analize başlarken lokal hız alanının bilindiği varsayılır. Bu varsayım genel olarak doğru değildir ve hız alanı diğer akış değişkenleri ile beraber çözümün bir parçası olarak ortaya çıkar. Burada amacımız akış alanının hesaplanması için kullanılan algoritmalar hakkında genel bir fikir vermek ve tüm akış alanının hesaplanması için kullanılan stratejileri tanıtmaktır.

ϕ değişkeni için genel transport denklemini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{ grad } \phi) + S_\phi \quad (5.39)$$

Burada ϕ değişkeni hız terimleri ile değiştirilirse (u, v, w olarak) kartezyen koordinat sisteminde her üç yöndeki momentum denklemlerini elde ederiz. Eğer konumuza açıklık getirmek için sürekli rejimde iki boyutlu laminar bir akışı ele alırsak, x, y momentum ve süreklilik denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_v \quad (5.41)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (5.42)$$

Momentum denklemlerinde S_u, S_v kaynak terimlerdir ve basınç gradyeni terimi ayrı olarak yazılmıştır. Yukarıda verilen denklem setinin çözümü iki önemli problem ortaya çıkarır. Momentum denkleminin konvektif terimleri örneğin denklem 5.40'ın ilk terimi gibi lineer olmayan büyüklükler içermektedir. Yukarıda verilen denklem setinde aynı hız terimleri hem momentum hem de süreklilik denklemini etkilediğinden bu denklemler birbirine bağlıdır. Buradaki problemler nokta basıncın etkisinin çözülmesidir Basınç gradyenleri momentum denkleminde gözükmemesine rağmen, basınç için bir transport ya da başka bir denklem söz konusu değildir.

Eğer basınç gradyeni biliniyorsa momentum denkleminde hız için ayrıklaştırılmış denklemlerin eldesi daha önceki bölümlerde herhangi bir skaler büyüklük için verilen ayrıklaştırma şemalarından farklı değildir. Pek çok akış simülasyonunda biz zaten çözümün bir parçası olarak basınç alanını da hesaplamak isteriz dolayısıyla basınç gradyeni çözüm

tamamlanmadan bilinemez. Eğer akış sıkıştırılabilirse süreklilik denklemi yoğunluk için enerji denklemi de sıcaklık için transport denklemi olarak kullanılabilir. Bu durumda basınç hal denklemi kullanılarak hesaplanabilir $p = p(\rho, T)$. Ancak akış sıkıştırılmaz ise yoğunluk sabittir ve hal denklemi kullanılamaz. Bu durumunda basınç ve hız eşleşmesi analiz açısından bir kısıtlama getirir. Eğer doğru basınç alanı momentum denkleminde kullanılmış ise sonuçta ortaya çıkan hız alanı süreklilik denklemini sağlamalıdır.

Yukarıda tanımlanan problemler iteratif bir çözüm yöntemi ile aşılmaya çalışılır. Basınç hız eşleşmesi için sunulan çözüm algoritmalarından en ünlüsü SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure) algoritmasıdır.

Bu algortmada bir hücre yüzeyinden giren ve çıkan birim kütle konvektif akış tahmini hız komponentleri ile hesaplanır. Tahmini bir basınç alanı momentum denklemini çözmek için kullanılır. Süreklilik denkleminde türetilen bölüm 5.3.2.1'de de ayrıç çözüm algoritması için bahsettiğimiz bir basınç düzeltme denklemi hız ve basınç alanlarını yenilemek için kullanılacak düzeltilmiş basınç alanının eldesi için çözüür. İterasyona başlamak için basınç ve hız alanı için ilk değer atanır ve bu tahmini değerler ilk iterasyon sonucuna göre yenilenir. SIMPLE algoritmasını amacı tahmini basınç alanını gerçek basınç alanına yaklaştırmaktır. İterasyon yakınsamış hız ve basınç alanı elde edilinceye kadar devam eder.

SIMPLEC (Simple-Consistent) ve PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algoritmaları Fluent'in sunduğu aynı amaçlar kullanılan diğer algoritmalarıdır. SIMPLEC SIMPLE algoritmasından türetilmiştir ve yakınsamayı iyileştirecek bazı modifikasyonlar içerir. PISO algoritması bizim çalışmamız açısından daha önemlidir çünkü zamana bağlı analizlerde daha doğru ve daha kısa sürede çözüm sağlamaktadır. PISO algoritması hız ve basınç alanlarının tahmininde SIMPLE algoritması ile benzer prosedürleri kullanır ancak basınç düzeltme denklemini iki kere çözer. Özellikle zamana bağlı analizlerde yüksek performans göstermesi nedeniyle VOF metodu ile halka akışın modellenmesinde PISO algoritması tercih edilmiştir.

5.3.4.3 Yakınsama Kriteri ve Rahatlatma Parametreleri

Sayısal hatalar, gerçek matematiksel işlemlerin ve büyüklüklerin yaklaştırmalarla ifade edilmelerinden doğar. (Chapra ve Canale, 2003) Bu hatalar kesme ve yuvarlatma hatalarıdır. Herhangi bir kontrol hacmi için ayrıklaştırılmış formda denklem 5.38 ile ifade edilen korunum denklemi çözüldüğünde iki iterasyon arasındaki fark sıfır olmalıdır. Ancak bu değer

hiçbir zaman sıfır olamaz ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$A_P \phi_P - \sum_{i, \text{Komşo Hcüreler}} A_i \phi_i = R_P \quad (5.43)$$

Bir sayısal çözüm ağı içerisindeki tüm hata terimleri toplanırsa bu toplam yaklaştırma hatası derecesi çözüm süreci için bir göstergedir. Toplam yaklaştırma hatası eğer önceden belirlenmiş bir değerin altına düşmüş ise bu o çözümün yakınsadığını gösterir. İşte bu önceden belirlenen değerde yakınsama kriteri olarak tanımlanır. Örneğin bizim problemimiz için yakınsamanın sağlanması için süreklilik denkleminin çözümünden gelen toplam yaklaştırma hatasının 1×10^{-4} olması gerekmektedir.

Fluent yakınsamayı kolaylaştırmak için rahatlama parametrelerini kullanır. Rahatlama klasik Gauss-Siedel yönteminde de kullanılan bir yaklaşımdır. Her iterasyon sonucunda elde edilen değer eski ve yeni iterasyon sonuçlarının ağırlıklı ortalaması ile düzeltilir Bu yöntem denklem 5.44'te ifade edilmiştir. Fluent rahatlama parametresi olarak genelde 0.1 ile 1 arasında değerler kullanır. Rahatlama parametreleri akışın yapısına ve çözülen denkleme göre değişkenlik gösterebilir. Rahatlama parametreleri ile çözüm daha stabil fakat yavaş olur. Fluent, problem tipine göre farklı rahatlama parametreleri önermektedir.

$$\phi_{Yeni} = \phi_{Eski} + \lambda \Delta\phi \quad (5.44)$$

5.3.4.4 Nümerik Difüzyon

Nümerik difüzyon bir HAD analizinde her zaman mevcut olan bir hata türüdür.(Marshall ve Bekker 2003) Bu hata korunum denklemlerinin ayrıklaştırılması sırasında oluşur ve yapay olarak difüzyon katsayısının olduğundan daha büyük olarak işlem görmesine neden olur. Sonuç olarak ikinci momentum denkleminin çözümünde akışkan olduğundan daha viskoz, enerji denkleminin çözümünde olduğundan daha iletken gözükülecektir. Bu hata en çok difüzyonun çok az olduğu problemlerde hissedilir.

Nümerik difüzyon yüksek dereceden ayrıklaştırma şemaları kullanılarak ya da hassasiyetin önemli olduğu yerlerde daha sayısal ağ geometrisi sık tutularak nümerik difüzyon azaltılabilir. Eğer akış sayısal ağ geometrisine paralel ise nümerik difüzyon azalacaktır ancak bu nadiren mümkün olur dolayısıyla bir miktar hata her zaman mevcuttur.

5.3.4.5 Zamana Bağlı Analizler

Sürekli rejim kabulü ile yapılmayan analizlerde tüm korunum denklemleri zamana bağlı olarak ta ayrıklaştırılmalıdır. Bunun anlamı korunum denklemlerinin her bir zaman adımında entegre edilmesidir. Bir ϕ değişkeninin zamana bağlı değişimi aşağıdaki gibi ifade edilirse bunun birinci ve ikinci dereceden ayrıklaştırılmış hali denklem 46 ve 47'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (5.45)$$

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (5.46)$$

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (5.47)$$

Burada ϕ^n , t anındaki çözümü ϕ^{n+1} , ise $t + \Delta t$ anındaki çözümü ifade etmektedir. Zamana bağlı integrasyon genel olarak kapalı(implist) metodlarla yapılır ki bu zaten çoğu akış problemi için tercih edilen bir yaklaşımdır. Sıkıştırılabilir akış için ise açık(eksplisit) metodlar kullanılır. Kapalı(implicit) ve açık metodlar arasındaki temel fark (denklem 5.46 üzerinden açıklanırsa) denklemin sağ tarafının mevcut zaman adımında mı $F(\phi) = F(\phi^n)$ yoksa bir sonraki zaman adımında mı $F(\phi) = F(\phi^{n+1})$ değerlendirileceğidir. İmplist yaklaşım ikinci metodu kullanır(Denklem 5.48). (Marshall ve Bekker 2003)

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (5.48)$$

5.4 Türbülans Modelleri

Türbülansı tam olarak tanımlamak oldukça güçtür ancak pek çok mühendislik problemi türbülanslı akış koşullarını içerir. Türbülanslı akışta tüm hız komponentleri zamana bağlı değişkenlik gösterir. Akış çalkantılı ve kararsız bir karakter sahiptir. Akıştaki bu kaotik, lineer değişim göstermeyen yapı sayısal modelleme açısından pek çok güçlüğü içinde barındırır. Bugün için türbülanslı akış problemlerinin birçoğunu direkt olarak çözmek mümkün değildir. Direkt çözümünün yokluğunda türbülanslı akışı karakterize edebilmek için türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada halka akışı modellemek için RNG k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

5.4.1 Türbülans Modelinin Seçimi

Türbülans konusuna genel olarak bakıldığında her türlü probleme uygulanabilir genel bir türbülans modelinin olmadığı görülür. Türbülans modelinin seçimi pek çok parametreye bağlıdır. İncelenecek akış probleminin yapısı, istenilen hassasiyet, kullanılacak hesaplama platformunun kapasitesi, analiz süresi ile ilgili kısıtlamalar türbülans modelinin seçimine etki eder. Türbülans modelleri bu doğrultuda incelendiğinde en iyi kavramından bahsedilemez. İhtiyaçlara göre seçilen bir yaklaşımdan bahsedilebilir.

Türbülans modelleri genel olarak klasik modeller, büyük girdap simülasyonu (LES) ve direkt nümerik çözümler (DNS) olarak sıralanabilir. Klasik modeller Navier-Stokes denklemlerinden türetilen Reynolds denklemlerini kullanırlar. Bu modeller zamana göre ortalaması alınmış türbülanslı akım alanı için çözülmektedir. Zamana göre ortalama büyüklükler ortalama hızlar, türbülans kinetik enerjisi ve Reynolds gerilme terimleridir. Büyük girdap simülasyonu'nunda zamana bağlı denklemler ortalama akış değişkenleri ve büyük çalkantı bileşenleri için çözülürken küçük çalkantılar modellenir. Bunun nedeni büyük çalkantı bileşenlerinin akışın genel karakterini belirlemesidir. LES modeli, DNS ile birlikte yüksek kapasitelerde hesaplama platformlarına ihtiyaç duyar. Endüstriyel problemler için çeşitli LES uygulamaları olmakla birlikte bu modelin kullanımı ihtiyaç duyduğu yüksek kapasitelerde hesaplama platformları nedeniyle sınırlıdır. DNS ise genellikle pratik uygulama alanının dışında kalmaktadır.

Fluent HAD yazılımı LES türbülans modelinin ele aldığımız iki fazlı halka akış probleminin çözümünde kullanacağımız VOF modeli ile birlikte kullanımına izin vermemektedir. DNS ise kullandığımız hesaplama platformlarının yetersizliği nedeniyle bizim için uygulanabilir değildir. Klasik modellere bakıldığında ise hesaplama süresi ve hesaplama platformu açısından bakıldığında RSM (Reynolds Stress Modeli) modelinin k-ε ve k-w modellerine kıyasla %50-60 kadar daha fazla hesaplama zamanına, %15-20 kadarda daha fazla hesaplama platformu kapasitesine ihtiyaç duymaktadır. Analizlerin zamana bağlı ve VOF modeli ile yapılacağı göz önüne alındığında RSM modeli getirdiği hesaplama zamanı yükü ve yüksek hafıza gereksinimi engeli nedeniyle tercih edilmemiştir. Ayrıca bu model tüm stres komponentlerini çözdüğü için yakınsaması biraz daha zordur. RSM modelinin karıştırmalı kap ve siklon tasarımı ile ilgili bir iki fazlı uygulaması için D.Cokljat, M.Slack, S.A.Vasquez ve arkadaşlarının (2004) çalışması incelenebilir.

k-w modeli k-ε modeline kıyasla yeni bir türbülans modelidir ve endüstriyel uygulamaları

daha azdır. T. Frank (2005) çeşitli iki fazlı akış modellerini CFX yazılımı ve k-w türbülans modelini kullanarak modellemiştir ancak halka akışı için bir uygulama yapmamıştır. k-w türbülans modelinin cidar kenarındaki etkileri daha iyi modellediği bilinmesine rağmen yukarıda da belirtildiği gibi daha az uygulaması vardır. Buna karşılık düşük reynolds k-ε türbülans modeli S.Jayanti, G.F.Hewitt (1997), standart k-ε türbülans modeli D.Adechy, R.I. Issa (1999) tarafından halka akışı modellemek için kullanılmıştır. D.Cokljat ve arkadaşları (2000) yapısal olmayan sayısal ağ geometrileri için k-ε türbülans modelinin çeşitli versiyonlarını partikül yüklü iki fazlı akış örneği üzerinde uygulamışlardır. C:H Newton ve Behnia(2001) düşük reynolds k-ε türbülans modelini katmanlı akışa uygulamıştır. B.N.Kishore ve S.Jayanti (2004) halka akışı modellemek için standart k-ε türbülans modeli kullanmışlardır. S.Ghorai ve K.D.P Nigam (2005) katmanlı akışı T.Tahat ve Z.F.Cui(2005) Slug akış rejimini modellemek için RNG k-ε türbülans modelini kullanmışlardır. k-ε modelinin iki fazlı akışlara uygulanması ile ilgili referanslar çoğaltılabilir ancak burada sadece yatay ve dikey borularda gaz-sıvı akış rejimleri ile ilgili örnekler verilmiştir.

Fluent standart k-ε, RNG k-ε ve k-ε Realizable olmak üzere üç farklı k-ε versiyonu sunar. Bunlar içinde k-ε Realizable modeli Fluent yazılımına özgü bir türbülans modelidir. k-ε türbülans modeli endüstride ve akademik çalışmalarda oldukça yaygın olarak kullanılan bir türbülans modelidir. Çok iyi incelenmiş ve pek çok problemde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Bölüm 5.4.2’de k-ε türbülans modeli ile ilgili daha geniş bilgi verilmiş ve RNG k-ε modelinin seçilme nedeni açıklanmaya çalışılmıştır.

5.4.2 k-ε Türbülans Modeli

Türbülanslı akış hız ve basınç alanındaki çalkantılarla karakterize edilir ve bu çalkantıları direkt olarak çözmek pek çok problem için pratik uygulanabilirlik sınırlarının dışındadır. Bunun yerine anlık Navier – Stokes denklemi ile türbülans kinetik enerjisi k ve viskoz kayıp terimi ε için ek olarak iki denklem bu çalkantıları modellemek için kullanılır. k-ε türbülans modeli Navier – Stokes denkleminin ilaveten çözülen ekstra iki taşınım denklemi nedeniyle iki denklemlilik bir türbülans modeli olarak anılır. Bu yaklaşım türbülans modellemek için gerekli işlem zamanının oldukça azaltır. k ve ε için çözülen en genel denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_1 + \frac{\varepsilon}{k} G_k + C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.50)$$

Denklem 5.49 ve 5.50 aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{değişim miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{konveksiyonla} \\ \text{taşınımı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{difüzyonla} \\ \text{taşınımı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{üretim} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} k \text{ veya } \varepsilon \text{'un} \\ \text{kayıp} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} \quad (5.51)$$

Denklem 5.49 ve 5.50'de görülen $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ deneysel verilere dayalı ampirik sabitlerdir.

Her iki denklemde görülen G_k ise türbülans üretim terimidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$G_k = u_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5.52)$$

Denklem 5.52 görülen μ_t terimi (türbülans viskozitesi) k ve ε 'dan türetilir. μ_t 'nin açılımı denklem 5.53'te verilmiştir.

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.53)$$

Denklem 5.49, 5.50, 5.52 ve 5.53'te verilen ampirik sabitler kapsamlı deneysel çalışmalar sonucunda bulunmuştur ve sırasıyla değerleri şöyledir.

$$C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad C_1 = 1,44 \quad C_2 = 1,92 \quad (5.54)$$

Yukarıda verilen denklemler ışığında çözüm süreci türbülans kinetik enerjisi k ve viskoz kayıp terimi ε için taşınım denklemlerinin çözülmesi ile başlar. k ve ε 'nin çözümü türbülans viskozitesinin türetilmesinde kullanılır. Türbülans viskozitesi ve k reynolds stress terimlerinin hesaplanmasında kullanılır ve bu terimler momentum denkleminde yerine konularak, yeni hız komponentleri elde edilir. Bu yeni hız komponentleri ise G_k 'nin elde edilmesi için kullanılır. Bu süreç yakınsamış çözüm elde edilene kadar tekrarlanır.

Buraya kadar tanımlanan denklemler standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile ilgilidir. Başlangıçta $k-\varepsilon$ türbülans modelinin iki varyantından bahsetmiştik. Launder ve Spalding tarafından

(Marshall ve Bekker 2003) önerilen standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli aslında yüksek reynolds sayılarında geçerli bir türbülans modelidir. Eğer bir boru içindeki yüksek hızlı bir akış ele alınırsa bu türbülans modeli borunun merkezinde doğru sonuç verirken cidara yaklaştıkça geçerliliği azalır. Bu sebeple $k-\varepsilon$ modelinin genel performansını artırmak için bazı iyileştirmeler yapılarak RNG $k-\varepsilon$ ve $k-\varepsilon$ Realizable modelleri ortaya çıkarılmıştır.

Realizable $k-\varepsilon$ modeli en son geliştirilmiş $k-\varepsilon$ versiyonudur ve Shih (Fluent User Guide 2005) tarafından önerilmiştir. Standart $k-\varepsilon$ modelinden ayrılan temel iki özelliğinde ilki türbülans viskozitesinin hesaplanması için yeni bir formülasyon içermesi. Aslında Realizable $k-\varepsilon$ modeli türbülans viskozitesinin hesaplanması için aynı formülasyonu kullanır ancak denklem 5.53'te tanımlanan C_μ değerini sabit değil değişken olarak alır. Bunun nedeni bazı durumlarda gerçekdışı (unrealizable) bir şekilde $k-\varepsilon$ formülasyonundaki Reynolds stress terimlerinin negatif olmasıdır. Bu durum C_μ , akışkanın lokal şekil değiştirme ve rotasyonun bir fonksiyonu olacak şekilde modellenerek aşılır böylece gerçekdışı reynolds stress terimlerinin oluşması önlenir. Realizable $k-\varepsilon$ modelinin ikinci özelliği ε 'nin taşınımı için standart ve RNG $k-\varepsilon$ modellerinden tamamıyla farklı bir formülasyon içermesidir. Bu ikinci özellik bazı problemlerde (jet akışı gibi) üstünlük sağlasa da genel anlamda daha az denenmiş bir türbülans modelidir. RNG- $k-\varepsilon$ türbülans modeli Yakhot (Marshall ve Bekker 2003) tarafından standart $k-\varepsilon$ modelinin ampirik yanlarına karşılık önerilmiştir. Bu modelin geliştirilmesi sırasında "Renormalizasyon Grup Metodu" adı verilen kapsamlı bir istatistiksel teknik kullanılmıştır. Genel olarak bakıldığında yine standart $k-\varepsilon$ modeline benzer formülasyon içeren bir türbülans modelidir ancak ε denkleminin çözümünde bazı modifikasyonlar yapılmıştır. Bu modifikasyonlar örneğin bir dirsek etrafında akış gibi akışta ani şekil değişimlerinin olduğu durumlarda ε denkleminin doğruluğunu artırır. İkinci bir modifikasyonda dönel akışın türbülans üzerindeki etkisinin modellenmesi için yapılır ve bu modifikasyonda dönel akışlarda yine çözümün doğruluğunu artırır. RNG $k-\varepsilon$ modeli yüksek reynolds sayılı akışlarda yine doğru sonuç veren bir türbülans modelidir ancak türbülans viskozitesi ile moleküler viskozitenin toplamı olan efektif viskozitenin bulunması için analitik olarak türetilmiş bir diferansiyel denklem kullanır ve bu yaklaşım sayesinde düşük Reynolds sayılarında da geçerlidir.

RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli düşük reynolds sayılarında da geçerli olduğu için cidara yakın bölgelerde daha iyi sonuç verir. Bu çalışmada halka akış üzerinde çalışıldığı için cidara yakın bölgelerde akışın doğru bir şekilde modellenmesi önemlidir ve halka akışın modellenmesinin

yanında halka akıştaki iki fazlı basınç düşüşlerini sayısal olarak modellemek amaçlanmıştır. Bu nedenle cidara yakın bölgelerde düşük reynolds sayılarında sürtünme, sürüklenme ve basınç gradyenlerinin hesaplanmasında daha iyi sonuç veren iyileştirilmiş cidar fonksiyonları (Enhanced Wall Functions) RNG k- ε türbülans modeli ile birlikte kullanılmıştır. Cidar fonksiyonları ile ilgili detaylar bölüm 5.4.3' te açıklanacaktır.

Fluent'in k ve ε 'nun hesaplanması için kullandığı denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.55)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (5.56)$$

Her iki denklemde de G_k ortalama hız gradyeninin oluşturduğu türbülans kinetik enerjisidir. G_b sıcaklık gradyeni ile oluşan kinetik enerji terimidir ve bu çalışmada adyabatik şartlarda çalışıldığı için değeri sıfırdır. Y_M sıkıştırılabilir akışta genişlemenin genel viskoz kayıp terimine katkısını ifade eder. Sıkıştırılmaz akışlar için bu terim ihmal edilir R_ε ise RNG ile Standart k- ε modeli arasındaki ana farklardan birisi olan ek bir terimdir denklem 5.58'de verilmiştir. S_k ve S_ε Fluent'in kullanıcıya k ve ε için ekstra kaynak terimleri sağlamak için sunduğu bir opsiyondur. Bu çalışmada böyle bir durum olmadığı için bu terimler standart olarak sıfırdır. a_k ve a_ε ters efektif prandtl sayılarını belirtmektedir ve Fluent bu iki sayıyı RNG teorisi yardımıyla analitik olarak türetilen bir formülasyon yardımıyla hesaplar.

RNG k- ε türbülans modeli yüksek reynolds sayılarında türbülans viskozitesinin hesaplanması için denklem 5.53'i kullanır ancak RNG teorisi yardımıyla türetilen $C_\mu = 0,0845$ 'e eşittir. Bu değer ile standart k- ε türbülans modelinin kullandığı ampirik değer olan 0,09 arasında sadece %7 fark vardır. Fluent RNG teorisine paralel olarak türbülans viskozitesinin düşük reynolds sayılarında da hesaplanabilmesi için bir diferansiyel eşitlik sunar.

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \mu} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v} - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (5.57)$$

Bu denklemde $C_v \approx 100$ $\hat{v} = \mu_{eff} / \mu$ şeklinde ifade edilir. Denklem 5.57 efektif türbülans

taşınımın reynolds sayısına bağlı olarak nasıl değiştiğini ifade ederek cidara yakın bölgelerde daha doğru sonuç almamıza yardımcı olur.

RNG k- ε türbülans modelinin ε denklemindeki R_ε teriminin standart k- ε modelinden farklı olarak önem teşkil ettiği daha önce belirtilmişti. R_ε terimi denklem 5.62’te verilen ε denklemindeki C_2^* terimini η terimine bağlı olarak ayarlayarak başarılı bir türbülanslı akış simülasyonun gereği olan cidar yakınındaki bölgenin daha doğru bir şekilde modellenmesine yardımcı olur.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \cdot \eta^3} \quad (5.58)$$

$$\eta = S \cdot k / \varepsilon \quad (5.59)$$

$$\eta_0 = 4.38, \beta = 0,012 \quad (5.60)$$

$$S = (2 \cdot \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ji})^{1/2} \quad (5.61)$$

Burada \bar{S}_{ij} ortalama şekil değiştirme tensörünün ifade etmektedir. Eğer R_ε denklemi ε denkleminde (Denklem 5.56 RNG k- ε türbülans modeli için ε denklemi) yerine konulursa ε denklemi aşağıdaki formu alır.

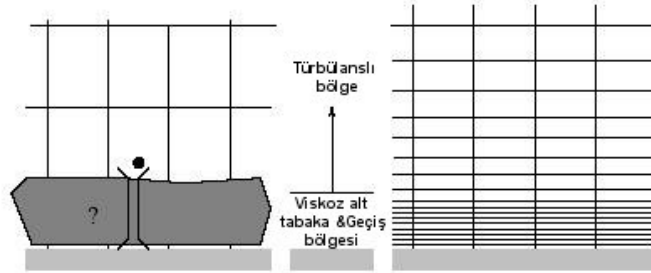
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.62)$$

5.4.3 Cidar Kenarında Akışın Modellenmesi

Bir akışın cidarlarla sınırlanmış olması hiç şüphesiz türbülans parametrelerini etkiler. Cidara yakın bölgede viskoz etki nedeniyle teğetsel hız azalırken kinematik blokaj nedeniyle normal yönde dalgalanmalar azalır. Buna karşılık cidardan uzaklaştıkça türbülans artar. Cidardaki mekanizmanın doğru olarak modellenmesi türbülansın dolayısıyla akışın doğru olarak modellenmesi anlamına gelir.

Genel olarak mevcut türbülans modelleri incelendiğinde k- ε , RSM ve LES modellerinin cidardan uzak bölgeler için geçerli oldukları görülür. Bu nedenle eğer bu türbülans modellerinden birisi seçilmiş ise cidar bölgesinin nasıl modelleneceği üzerinde

iki yaklaşım arasındaki fark daha iyi anlaşılabilir. “?” ile belirtilen bölge cidar fonksiyonlarının kullanıldığı bölgedir



Şekil 5.11 Cidar yakınında duvar fonksiyonu ve modelleme yaklaşımı
(Fluent User Guide 2005)

Prandtl (1930'da ortalama hız u 'nun kayma tabakası kalınlığından bağımsız olduğu sonucunu çıkarmıştır ve bunu denklem 5.63 ve 5.64'deki şekliyle ifade etmiştir. Burada u^* sürtünme hızı τ_w cidar kayma gerilmesi olmak üzere denklem 5.64 cidar yasası olarak adlandırılır. (White, 2004)

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (5.63)$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{0,5} \quad (5.64)$$

Karman (1933) ise dış tabakadaki u 'nun moleküler viskoziteden bağımsız olduğu, akım hızı U 'dan sapmasının tabaka kalınlığı δ değerine ve diğer özelliklere bağlı olması gerektiği sonucunu çıkardı. Bu ifade denklem 5.65'de verilmiştir ve bu denklem hız azalma yasası olarak bilinir. (White, 2004)

$$\frac{U - u}{u^*} = G \left(\frac{y}{g} \right) \quad (5.65)$$

Millkan (1937), (White, 2004) geçiş bölgesini hız azalma yasası ile cidar yasası ile örtüşecek bir şekilde logaritmik örtüşme yasası olarak anılan denklem 5.66 ile ifade etti

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y u^*}{\nu} + B \quad (5.66)$$

Şekil 5.10 yukarıda ifade ettiğimiz cidar yasalarını anlamamıza yardımcı olur. Bu grafik hızın $(\ln y)$ ile değişiminden başka bir şey değildir. Bu kanunlar ile hemen-hemen her türbülanslı

akış probleminde hız dağılımı yüksek bir yaklaşıklıkla ifade edilebilir. Her bir bölge için hız profili boyutsuz hız u^+ ve cidardan olan boyutsuz mesafe y^+ 'a göre aşağıdaki şekilde ifade edilir.

Viskoz alt tabaka $y^+ < 5$ için $u^+ = y^+$

Geçiş bölgesi $5 < y^+ < 30$ için $u^+ = 5 \cdot \ln y^+ - 3.05$

Türbülanslı bölge $30 < y^+ < 1000$ için $u^+ = 2.5 \cdot \ln y^+ + 5.5$

Bölüm 5.4.2'de belirtildiği gibi bu çalışmada cidara yakın bölgelerdeki etkileri modellememize yardımcı olan iyileştirilmiş cidar fonksiyonları kullanılarak modelleme yapılmıştır. Fluent'in sağladığı bu opsiyon cidara yakın bölgelerde daha kaba sayısal çözüm ağı geometrisi (meshler) kullanmamıza izin verirken basınç düşüşünü ve sürüklenme etkilerini daha doğru bir şekilde tahmin etmemize imkan tanır. Ayrıca bu yaklaşım çözüm zamanının azaltırken kullanılan kaba sayısal çözüm ağı geometrisi (meshler) nedeniyle çözümün doğruluğunu azaltacak yönde olan etkisi de oldukça azdır. Hem mevcut hesaplama platformu kapasitelerinin yetersizliği hem de analiz için geniş sürelerin olmaması nedeniyle duvar fonksiyonu yaklaşımının RNG k- ϵ türbülans modeli ile birlikte kullanımı tercih edilmiştir. RSM veya viskoz alt tabakadan türbülanslı çekirdek bölgesine kadar olan tüm çözüm alanında geçerli olan k- ω modelinin kullanımı veya bu türbülans modellerinin karşılaştırılması başka bir çalışmanın konusu olabilir. Burada optimum sürede güvenilir bir türbülans modeli ile HAD metodunun iki fazlı akışlara uygulanması amaçlanmıştır RNG k- ϵ türbülans metodu cidara yakın bölgelerde akışı modellememize yardımcı olacak modifikasyonları da içerdiğinden uygun bir türbülans modelidir.

5.5 İki Fazlı Akışların Sayısal Çözümü İçin Modeller

İki fazlı akışların sayısal analizi HAD teknolojisinin güncel araştırma konularından birisidir. İki fazlı akışların sayısal çözümü için universal model yoktur çünkü her iki fazlı akış problemi genel bir yaklaşımla modellenemeyecek farklılıklar barındırır. Fluent dâhil olmak üzere ticari HAD kodları iki fazlı akışların analizi için çeşitli yaklaşımlar sunmaktadır. Bu çalışmada ele alınan iki fazlı akış problemi bir gaz – sıvı akış rejimi örneği olan “Halka Akış”tır. Bu çalışmada bulunan sonuçlar ve modelleme yaklaşımı diğer bazı gaz sıvı akış rejimleri içinde genelleştirilebilir ancak tüm gaz – sıvı akış rejimleri üzerinde çalışılmamıştır. Halka akış VOF

metodu ile modellenerek, halka akıştaki iki fazlı basınç düşüşleri sayısal olarak bulunmuş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Takibeden bölümlerde genel olarak iki fazlı akışların sayısal analizinde kullanılan metodlar tanıtılacak ve VOF modelinin halka akışın analizinde kullanılma nedeni bu modelin ayrıntılı incelemesi ile birlikte sunulacaktır.

5.5.1 İki Fazlı Akış Modellerinin Sınıflandırılması

Ticari HAD kodlarının 1980'li yılların başından itibaren yaygınlaşmasından günümüze kadar olan sürece bakıldığında iki fazlı akış modelleri de oldukça gelişme göstermiştir. Genel olarak iki fazlı akış problemleri Eulerian, Lagrangian formülasyonlar ya da arayüzey izleme metodları ile çözülmektedir. VOF modelini de kapsayan arayüzey izleme metodları Eulerian ya da Lagrangian formülasyonları içerebilir. Bu çalışmada kullanılan hesaplama aracı Fluent'tir ve Fluent'in VOF modeli Eulerian bir formülasyon kullanmaktadır. Bu nedenle VOF modeli bu çalışmada Eulerian formülasyonlar içinde değerlendirilmiştir. Aşağıda bu yaklaşımların dayandığı temel prensipler kısaca açıklanmıştır.

5.5.1.1 Euler - Lagrange Yaklaşımı

Bu yaklaşımın günümüzün bilgisayarlarının iki fazlı akışın karmaşık yapısına cevap verebilecek düzeye gelmeleri ile bu yaklaşım daha popüler hale gelmiştir. Özellikle partikül yüklü akışların davranışını incelemek için çok yararlı bir iki fazlı akış yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda sürekli ya da taşıyıcı faz Eulerian bir yaklaşımla modellenirken sürekli faz içindeki partiküller Lagrangian bir yaklaşımla modellenir. Sürekli faz için zaman ortalamalı Navier stokes denklemi çözülürken sürekli faz içinde hareket eden partikül veya kabarcıklar hesaplanmış akış alanı içerisinde izlenir ve bu partikül veya kabarcıkla sürekli faz ile momentum,, kütle veya enerji transferinde bulunabilir. Örneğin halka akışta gaz fazı içerisinde hareket eden damlacıklar Lagrange yaklaşımı ile modellenebilir. Issa (2003) lagrange yaklaşımını halka akış için kullanmıştır ancak bu çalışmada gaz fazı içindeki damlacıklar ihmal edilmiştir. Fluent lagrange yaklaşımı olarak Lagrange Ayrık Faz modelini (Lagrangian Discrete Phase Model –DPM) içermektedir

Euler –Lagrange yaklaşımındaki temel varsayım taşınan ikincil fazın toplam kütlesi taşıyıcı akışkandan fazla olsa bile taşınan fazın hacimsel fraksiyonunun taşıyıcı fazdan düşük olduğudur. Partikül veya damlacık yörüngeleri akış alanına göre teker – teker hesaplanır. BU yaklaşım pnömatik transport, sıvı yakıtlı yanma reaksiyonları, partikül yüklü akışlar ve sprey

kurutucular için uygun bir iki fazlı akış modelidir. Ancak ikincil fazın hacimsel fraksiyonun ihmal edilemeyeceği durumlarda bu metod kullanılamaz.

5.5.1.2 Euler – Euler Yaklaşımı

Fluent HAD kodu yaygın olarak kullanılan üç euler yaklaşımı sunmaktadır. Bu yaklaşımlar sırasıyla VOF, Mixture ve Eulerian iki fazlı akış modelleridir. Eulerian yaklaşımda fazlar matematiksel olarak sürekli etkileşim içinde değerlendirilir. Fazların hacimsel fraksiyonlarının yer ve zamanın sürekli bir fonksiyonu ve toplamlarının bire eşit olduğu kabulü yapılır. Yapısal olarak birbirine benzeyen korunum denklemleri her bir faz için ayrı-ayrı yazılır. Denklemlerin birbiri ile ilişkilendirilmesi amprik bilgi ile veya granüllü akışlar için kinetik teori yardımıyla yapılır. Euler yaklaşımının zorluğu fazlar için ayrı – ayrı ifade edilen korunum denklemlerinin ilişkilendirilmesi ve denklem sistemi için kapatma ifadesinin yazılabilesidir. Bu kapama denklemleri amprik korelasyonlar veya granüllü akışlar için kinetik teori yardımıyla türetilir.

5.5.1.2.1 VOF Modeli

Birbiri ile karışmaya iki veya daha fazla akışkan arasındaki fazlar arası arayüzeyin pozisyonu Şekli ve oluşumu incelenmek istendiğinde sabit bir Eulerian çözüm ağına uygulanan VOF modeli tercih edilir. Bu metodun temel prensipleri diğer Eulerian yaklaşımlara benzer olmakla beraber nümerik olarak uygulanışı farklılık gösterir. Bu yaklaşımda tüm akışkanlar için sadece bir denklem seti çözülürken, fazlar arası arayüzey için ayrı bir denklem çözülür ve tüm sayısal çözüm ağı içerisinde fazların hacimsel fraksiyonları ayrı-ayrı izlenir. Bir gaz – sıvı arayüzeyinin zamana bağlı olarak incelenmesini içeren katmanlı akış, serbest yüzey akışları, kapalı bir tankta sıvı hareketi, bir sıvı içerisinde kabarcıkların hareketi gibi farklı endüstriyel alanlardan problemler VOF modeli ile çözülebilir. VOF modelinin kullanılabilirliği, detayları ve bu çalışmada kullanılma sebebi ile ilgili ayrıntılar bölüm 5.5.3'e verilmiştir.

5.5.1.2.2 Karışım Modeli

Karışım (Mixture) model enerji, momentum ve süreklilik denklemlerini karışımın ortalama özelliklerine hacimsel fraksiyon denklemini de ikincil faz için çözer ancak VOF modelinden farklı olarak fazların birbiri içerisinde karışmasına izin verir. Eğer fazların hızları aynı ise karışım (mixture modeli “basitçe homojen akış modeline indirgenir. Partikül yüklü akışlar (düşük yükte) kabarcıklı akışlar, sedimentasyon ve siklon akışları bu model ile çözülebilir.

5.5.1.2.3 Eulerian Model

Eulerian model Fluent'in içerdiği en kompleks iki fazlı akış modelidir ve iki veya daha fazla birbiri ile karışan akışkan için dizayn edilmiştir. İncelenen akışkanlar sıvı, katı veya gaz formlarının karışımı şeklinde bulunabilir. Lagrangian yaklaşım ikincil fazın hacimsel fraksiyonu $<10\%$ iken iyi sonuç vermesine karşılık Eulerian modelde bununla ilgili bir sınır yoktur. Her bir akışkan için enerji, momentum ve süreklilik denklemleri ayrı-ayrı çözülür. Fazlar arası momentum transferi momentum denklemine eklenen fazlararası momentum transfer terimleri ile bulunur ve eğer fazlar arasında ısı ya da kütle transferi varsa aynı şey enerji ve süreklilik denklemleri içinde yapılabilir. Fazların hacimsel fraksiyonu yine diğer modellere benzer şekilde tüm çözüm ağı içerisinde izlenir ve fazların hacimsel fraksiyonlarının toplamının 1'e eşit olduğu kabulü yapılır. Her bir faz için ayrı türbülans denklemleri kullanılabilir ancak fazların momentum, enerji ve süreklilik denklemleri bağlamında ilişkilendirilmesi başarıyla yapılabilirken aynı şey türbülans denklemleri için söylenemez. Fazlar arasındaki bu türbülans mekanizmasının açıklanması hala araştırmaya açıktır. Eğer birincil faz sıvı veya ikincil faz katı partiküller içeriyorsa taşıyıcı faz içinde katı partiküllerin davranışını incelemek için kinetik teori kullanılır.

Fluent Eulerian modelinde çözüm algoritması olarak tek fazlı akışlarda kullanılan SIMPLE algoritmasının genişletilmiş şekli olan "Faz Bütünleşik SIMPLE" algoritmasını kullanır . S.A.Vasquez,V.Ivanov (2000) bu metodu tanıtan kapsamlı bir çalışma yapmışlar ve bir kolon içinde yükselen kabarcıklı akış ile partikül yüklü bir jet akışı için modelin uygulamasını gerçekleştirmişlerdir.

5.5.2 İki Fazlı Akış Modelinin Seçimi

Bu çalışmada yatay borular içinde gaz – sıvı akış rejimleri özel olarak ta halka akış rejimi ele alınmıştır. İki fazlı akışın analizine geçmeden önce yapılacak şey iki fazlı akış rejiminin ve bu akış rejimi için uygun iki fazlı akış modelinin seçimidir. Gaz sıvı akış rejimleri için önerilen genel iki fazlı akış modelleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.2'de ise her modelde fazlar ve karışım için çözülen denklemler tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 5.1 Gaz sıvı akış rejimleri için modeller

Akış Rejimi	Karışım	Eulerian	VOF	DPM
Kabarcıklı Akış	x	x		x
Halka Akış			x	
Slug			x	
Katmanlı Akış		x	x	

Çizelge 5.2 İki fazlı akış modellerinde çözülen denklemler

İki Fazlı Akış Modeli	Kütle(Hacimsel Fraksiyon) Denklemi	Momentum Denklemi	Enerji Denklemi	Türbülans Denklemi	Skaler Denklemler
Eulerian	Faz için	Faz için	Faz için	Karışım Birincil Faz İkincil Faz	Faz için
Mixture	Faz için	Karışım	Karışım	Karışım	Karışım
VOF	Faz için	Karışım	Karışım	Karışım	Karışım

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 genel olarak Fluent'in dokümanlarına dayanılarak oluşturulmuştur. Eğer kabarcıklı, damlacıklı ve partikül yüklü akışlarda hacimsel fraksiyon %10'dan az ise DPM modeli (lagrange ayrık faz modeli) fazla ise karışım modeli veya Eulerian model önerilmektedir. Fazlar arası arayüzey geometrisini önemli olduğu slug akışı, katmanlı akış ve halka akış gibi gaz sıvı akış rejimlerinde ise VOF modeli önerilmektedir. Pnömatik transport için Mixture modeli kullanılabilir. Eğer akış katı partiküller (granüllü akışlar) içeriyor ise, akışkan yatak modellenmek isteniyorsa Eulerian model tercih edilmelidir.

Katmanlı akış, slug akışı ve halka akış için literatüre paralel olarak bakıldığında VOF modelinin seçimi genel olarak doğrudur. Karışım (mixture) modeli ya da Eulerian modelin birlikte kullanılabildiği uygulamalarda partikül yükü ve stokes sayısı gibi parametrelere de bakılarak seçim yapılır. Önemli olan seçilen iki fazlı akış modelinin akış mekanizmasını en iyi şekilde temsil etmesidir. Bu çalışmada da VOF modeli literatüre (Bknz Bölüm 5.1) paralel olarak halka akışı modellemek için tercih edilmiştir. Bölüm 5.5.3'te VOF modeli tanıtılmış

Bölüm 8’de modelleme aşamaları ve VOF modelinin uygulanmasında izlenen strateji aktarılmıştır.

5.5.3 VOF Modelinin İncelenmesi

VOF (Volume of fluid) modeli literatürde arayüzey modelleme metodları başlığı altında ayrı olarak da incelenebilmektedir ancak bu çalışmada Fluent VOF metodu kullanılmış ve Fluent VOF metodu da temelde Eulerian bir yaklaşım içerdiği için VOF modeli Bölüm 5.5.1.2’de ele alınmıştır. Bölüm 5.5.3’te ise VOF metodu hakkında daha detaylı bilgi vermek amaçlanmıştır.

VOF metodu arayüzey modellemesini amaçlayan modeller içinde en eskisi ve en çok uygulaması olan modeldir. Arayüzey simulasyonlarının güçlüğü arayüzey geometrisinin zamana bağlı olarak değişmesidir ve değişimin geometrisi zaten çözümün bir parçasıdır. Diğer bazı metodlar çözüm yapabilmek için arayüzeyin ilk şekline ihtiyaç duyarlar ancak VOF modeli tersine bu arayüzeyi çözmeyi amaçlar. VOF formülasyonu ele alınan akışkanların birbiri içinde karışmadığı akış tipleri için uygulanabilir bir metoddur. Örneğin karışımın ortalama özelliklerine göre çözülebilecek damlacıklı ya da sisli akış VOF metodu ile modellenmez bu tip bir akış için karışım (mixture) metodu önerilir.

VOF metodunda tanımladığımız her faz için fazın hacimsel fraksiyonu kontrol hacmi içerisinde bir değişken olarak belirir ve her bir kontrol hacmi içerisinde fazların hacimsel fraksiyonları toplamı birdir. Fazların hacimsel fraksiyonları akış alanı içerisinde her bir noktada bilindiği sürece tüm akış alanındaki tüm değişkenler fazlar tarafından hacimsel fraksiyonlarına göre paylaşılır. Böylelikle bir hücredeki değerler ya fazlardan birini temsil eder ya da karışımı (arayüzey bölgesi). Şekil 5.12’i (Mavi renkli bölge p akışkanını temsil etsin) ele alalım eğer bir analizde p akışkanının hacimsel fraksiyonu α_p olarak temsil ediliyorsa bir kontrol hacmi için üç koşul geçerli olabilir. $\alpha_p = 0$ ise hücre boştur, $\alpha_p = 1$ ise hücre doludur, $0 < \alpha_p < 1$ ise bu hücre p akışkanı ile diğer akışkan arasında bir arayüzey içermektedir. Burada α_p ’nin lokal değerine göre her bir kontrol hacmi için fiziksel özellikler ve değişkenler saptanır. Takibeden bölümlerde VOF modeline ait denklemler daha ayrıntılı olarak verilmiştir.

1	1	1	.68	0
1	1	1	.42	0
1	1	.92	.09	0
1	.85	.35	0	0
.31	.09	0	0	0
0	0	0	0	0

Şekil 5.12 α_p Akışkanın sayısal ağ içindeki konumu

5.5.3.1 Hacimsel Oran Denklemi

Fazlar arası arayüzey geometrisinin elde edilmesi bir veya daha fazla fazın hacimsel oranı (fraksiyonu) için bir süreklilik denkleminin çözülmesi ile sağlanır. Bu denklem bir p fazı için aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{1}{\rho_p} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) \right] = S_{\alpha_p} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{kp} - \dot{m}_{pk}) \quad (5.66)$$

Burada \dot{m}_{kp} p fazından k fazına olan kütle transferini \dot{m}_{pk} ise k fazından p fazına olan kütle transferini belirtir. S_{α_p} ise normalde sıfır olan bir kaynak terimidir. Eğer faz değişiminden veya başka bir kaynaktan bir kütle transferi söz konusu ise bu terim altında tanımlanır.

Burada birincil faz olarak tanımlanan faz için hacimsel oran (fraksiyon) denklemi çözülmez. Birincil fazın hacimsel oranı aşağıdaki ifadede bulunur.

$$\sum_{p=1}^n \alpha_p = 1 \quad (5.67)$$

5.5.3.2 Fiziksel Özellikler

Sayısal çözüm ağı içerisindeki herhangi bir hücre için fiziksel özellikler o hücrede bulunan fazlara göre belirlenir. Eğer iki fazlı bir sistemde fazları 1 ve 2 altındisleri ile belirtirsek ve ikincil faz için hacimsel oran (fraksiyon) denklemi çözülüyor ise her bir hücredeki yoğunluk aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\rho = \alpha_2 \rho + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (5.68)$$

$$\rho = \sum \alpha_p \rho_p \quad (5.69)$$

Bölüm 5.5.3'te verilen açıklamaya benzer olarak Denklem 5.68 şunu ifade eder; bir hücrenin yoğunluğu ya fazlardan birinin ya da diğerinin yoğunluğuna eşittir. Eğer hücre fazlar arası arayüzeyde ise yoğunluk fazların dağılımına göre tespit edilir.

5.5.3.3 Momentum Denklemi

VOF modeli tüm sayısal çözüm ağı üzerinde yalnızca bir momentum denklemi çözer ve sonuçta ortaya çıkan hız alanı fazlar arasında paylaşılır. Denklem 5.70'te verilen momentum denklemi fazların hacimsel oranlarına ρ ve μ üzerinden bağlıdır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.70)$$

Hız alanının paylaşılması fazlar arasında hız gradyanları yüksek olduğunda sorun arayüzdeki hızların hesaplanması anlamında problem yaratabilmektedir. Arayüzeyin modellenmesi için kullanılan algoritmalara ileride değinilecektir.

5.5.3.4 Enerji Denklemi

Enerji denklemi de fazlar arasında benzer şekilde paylaşılır ve genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (5.71)$$

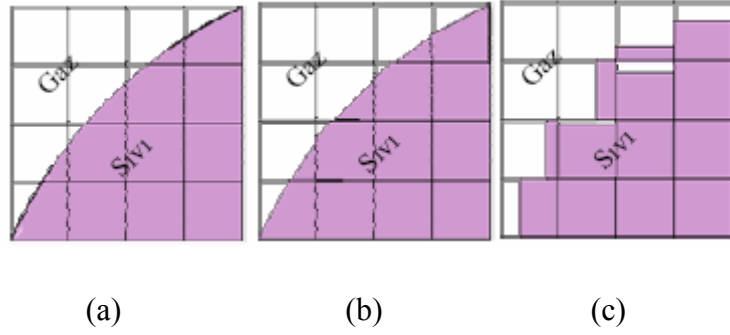
VOF modeli enerji E ve sıcaklığı T aşağıdaki şekilde hesaplar.

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_p \rho_p E_p}{\sum_{q=1}^n \alpha_p \rho_p} \quad (5.72)$$

Burada E_p her bir faz için enerji terimidir ve yine yoğunluk ile efektif termal iletkenlik fazlar tarafından paylaşılır S_h ise kaynak terimidir normalde sıfırdır. Eğer faz değişimden gelen gizili ısı terimi tanımlanmak istenirse bu terim kullanılır ancak Fluent'te faz değişimini direkt olarak çözemez, kod böyle bir algoritma içermemektedir. Bu noktada Fluent kullanıcının çözücü parametrelerine erişebilmesi için bazı olanaklar sunmuştur. UDF'ler (Kullanıcı tanımlı fonksiyonlar - User Defined Functions) ya da C programlama dilinde yazılmış fonksiyonlar yardımıyla kullanıcı faz değişiminden gelen enerji ve kütle transfer terimlerini tanımlayabilir. Ancak burada özetle basite indirgediğimiz bu süreç aslında oldukça zahmetlidir çünkü faz değişimi sadece enerji ve kütle denklemlerini değil tüm iki fazlı akış mekanizmasını etkilemektedir. Modellemesi oldukça zahmetli olan arayüzey geometrisi faz değişimi etkisiyle daha karmaşık hale gelir. Ayrıca faz değişimi nümerik açıdan da enerji denkleminde stabilite sorunlarına yol açarak yakınsamayı zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada ısı transferinin olmadığı kabulü yapıldığından enerji denklemi çözülmemiştir.

5.5.3.5 Arayüzey Geometrisinin Tespiti İçin Algoritmalar

Fluent arayüzey hesaplamaları için dört algoritma sunmaktadır. Bu algoritmalar geometrik hassasiyet ve hesaplama zamanı gibi farklı parametrelere göre seçilmelidir. Şekil 5.13'de farklı iki çözüm şemasına göre arayüzeyin temsili hali görülmektedir. Bu çalışmada Geometrik Yeniden Yapılandırma Şeması tercih edilmiştir ancak bu yaklaşımla birlikte diğer algoritmalarda gözden geçirilmiştir.

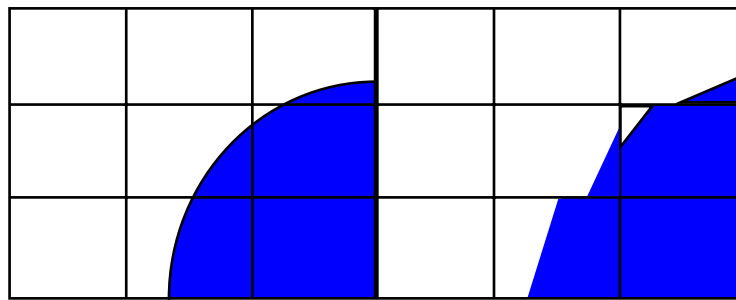


(a) Arayüzeyin gerçek geometrisi
 (b) Geometrik yeniden yapılandırma şeması ile modelleme
 (c) Alıcı – verici şeması ile modelleme

Şekil 5.13 Arayüzey hesaplamaları (Fluent User Guide 2005)

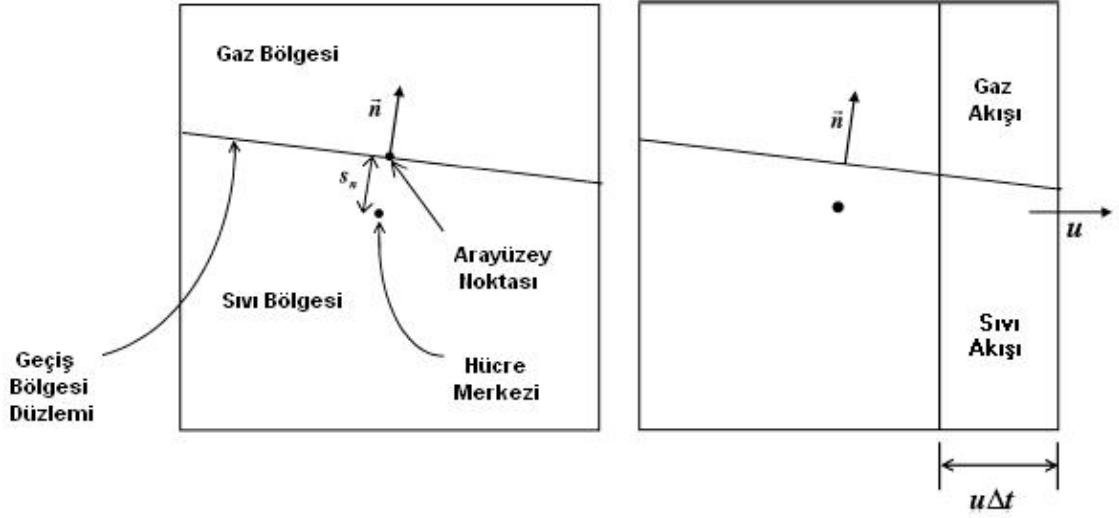
5.5.3.5.1 Geometrik Yeniden Yapılandırma

Sayısal çözüm ağı içerisindeki bir hücre eğer fazlararası arayüzde değil ise hücreye bir yüzeyinden giren ve çıkan akışı hesaplamak için standart enterpolasyon şemaları kullanılır ancak hücre fazlararası arayüzde ise arayüzey geometrisini belirlemek için “Geometrik Yeniden Yapılandırma” (Geometric Reconstruction) şeması kullanılır. Geometrik Yeniden Yapılandırma şeması gerçek arayüzey geometrisini parçalı lineer bir şekilde modeller (Şekil 5.14). Geometrik Yeniden Yapılandırma Şeması yapısal olmayan sayısal çözüm ağı geometrileri için en doğru enterpolasyon şemasıdır ve bu şema yapısal olmayan meshler için



Şekil 5.14 Gerçek ve yeniden yapılandırılmış arayüzey geometrisinin karşılaştırılması

Youngs’ın1982 (Fluent User Guide, 2005) çalışmalarına dayanılarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşıma göre fazlararası arayüzeyin gerçek geometrisi elde edilmeye çalışılmaz. Her bir hücrede iki fazı ayıran sınırın lineer bir eğimi (Şekil 5.15) olduğu kabulü yapılır ve bu lineer şekil hücre yüzeyinden olan adveksiyonu hesaplamakta kullanılır.



Şekil 5.15 Arayüzey hücresi (Welch ve Wilson 2000)

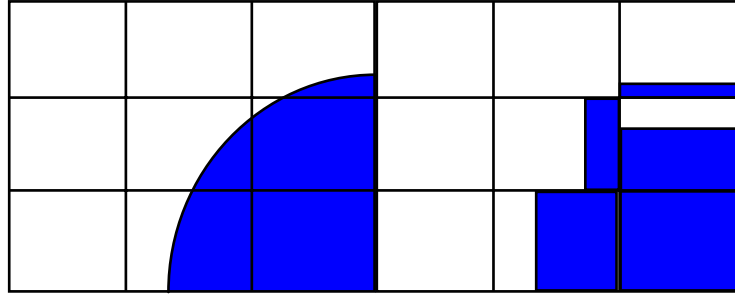
Bu yöntemde ilk aşama kısmi olarak hücre merkezine göre lineer arayüzeyin konumunun hesaplanmasıdır. Arayüzeyin konumu birim normal vektör yardımıyla ikincil fazın hacimsel fraksiyonundan yola çıkılarak hesaplanır.

$$\vec{n} = \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (5.73)$$

İkinci adım hücre yüzeyinden olan adveksiyonun arayüzeyin lineer geometrisi ile hücredeki teğetsel ve normal hız dağılımı kullanılarak belirlenmesidir. Üçüncü adım ise hacimsel fraksiyonun hücreden taşınan miktara göre yeniden belirlenmesidir. Geometrik yeniden yapılandırma şeması ancak zamana bağlı analizlerde kullanılabilir. Bu çalışmada Geometrik Yeniden Yapılandırma şeması fazlar arası arayüzey geometrisini en iyi temsi eden şema olduğu için tercih edilmiştir.

5.5.3.5.2 Alıcı –Verici Şeması

Bu şema kullanıldığında arayüzeyde bulunan hücrelerden birisi nümerik difüzyonu önlemek için donör (verici) diğeri akseptör (alıcı) olarak belirlenir. Alıcı hücreden ayrılan akışkan miktarı verici hücreye gelen akışkan miktarına eşittir. Bir hücreden ayrılacak akışkan miktarı verici hücrenin kapasitesi ile alıcı hücrenin boş hacmine bağlıdır. Arayüzey yine hücre yüzeyinden olan akışı belirlemek için kullanılır. Arayüzey geometrisi ikincil fazın hücre içindeki hacimsel fraksiyonuna göre dikey veya yatay olmak zorundadır. (Şekil 5.16)



Şekil 5.16 Gerçek arayüz geometrisi ile alıcı – verici şemasının karşılaştırılması

Donör – Akseptör şeması da sadece zamana bağlı analizlerde kullanılabilir ve eğer bu şema kullanılıyorsa dörtgen veya altıgen elemanlar kullanılmalıdır.

5.5.3.5.3 Açık Euler Şeması

Açık (eksplisit) Euler yaklaşımı bir önceki zaman adımında hesaplanan hacimsel fraksiyon değerleri için uygulanan standart bir sonlu fark enterpolasyon şemasıdır. Bu yaklaşım matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{\alpha_p^{n+1} \rho_p^{n+1} - \alpha_p^n \alpha_p^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_p U_p^n \alpha_{p,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{kp} - \dot{m}_{pk}) + S_{\alpha_p} \right] V \quad (5.74)$$

$n + 1$ = Yeni zaman adımının indeksi

n = Bir önceki zaman adımının indeksi

$\alpha_{p,f}$ = p 'nci fazın hacimsel oranının (fraksiyon) yüzey değeri

V = Hücrenin hacmi

U_f = Normal hıza göre hücreden geçen hacimsel debi

Yine diğer VOF algoritmaları gibi bu şema tercih edilmiş ise zamana bağlı analiz yapılmalıdır.

5.5.3.5.4 Kapalı Şema

Kapalı (implisit) enterpolasyon şeması Fluent'in standart sonlu fark enterpolasyon şemasıdır. Fazlar arası arayüzeyde ve diğer hücrelerde hücreye giren ve çıkan akış miktarını hesaplamak için kullanılır. Bu yaklaşım matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\alpha_p^{n+1} \rho_p^{n+1} - \alpha_p^n \rho_p^n}{\Delta t} \cdot V + \sum_f (\rho_p^{n+1} U_p^{n+1} \alpha_{p,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_p} \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{kp} - \dot{m}_{pk}) \right] V \quad (5.75)$$

6 YATAY SİLİNDİRİK BORULARDA HALKA AKIŞIN MODELLENMESİ

Montreal Protokolüne paralel olarak geleneksel soğutucu akışkanların yeni nesil soğutucu akışkanlar ile değiştirilmesi, yeni deneysel ve teorik çalışmaların yapılması için bir fırsat ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak bugün iklimlendirme sistemlerinde yeni nesil soğutucu akışkanlar kullanılmaya başlanmış ve sistem verimlerinde artış olmuştur. Bu sonucun ortaya çıkması yeni soğutucu akışkanların soğutma çevrimindeki performanslarının daha yüksek olması ve soğutucu akışkanların değiştirilmesi sürecinde çeşitli araştırmacıların bu fırsattan yararlanarak ortaya koydukları çalışmalarla ilgilidir.

Geleneksel soğutucu akışkanların ortadan kalkması ile başlayan süreçte yaşanan bir gelişmede HAD teknolojisinin daha kolay kullanılabilir hale gelmesi ve endüstrinin hizmetine girmesidir. HAD teknolojisi sayesinde zahmetli deneysel yöntemlere bir alternatif ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada da R134a soğutucu akışkanın adyabatik koşullardaki hidrodinamik karakteri incelenmiş ve sayısal olarak bulunan iki fazlı basınç düşüşleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel verilere dayalı olarak kurulan model halka akış rejimini içermektedir. Halka akış modelinin oluşturulması ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

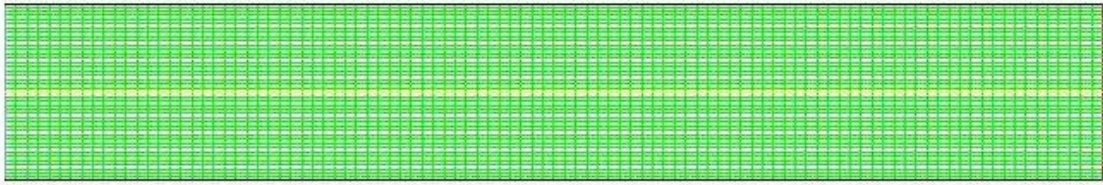
6.1 Sayısal Çözüm Ağının Oluşturulması

Bu çalışmada Cavallini ve arkadaşlarının(2001) R134a ve diğer bazı HFC soğutucu akışkanlar ile yaptıkları deneysel çalışma temel alınmış, çözüm geometrisi ve sınır şartları bu deneysel çalışmadaki şartlara göre belirlenmiştir. Cavallini ve arkadaşlarının çalışması yoğuşmadaki ısı transferi ve basınç düşüşlerini içermesine rağmen bizim kurduğumuz HAD modelinde faz değişimi daha önce belirtilen nedenlerden dolayı modellenmemiştir. Dolayısıyla mevcut deneysel basınç düşüşleri $\Delta p_{Momentum}$ terimini de içermektedir. Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların sağlıklı olarak karşılaştırılabilmesi için $\Delta p_{Momentum}$ teriminin toplam basınç düşüşünden çıkartılması gerekmektedir. Bu konu ile ilgili detaylar ileride verilmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan boru iç çapı 8mm ve ölçüm yapılan yata boru boyu 1 m'dir. Bu çalışmada 1m'lik boru boyunun tamamı modellenmemiştir. Boru boyunun tamamının modellenmemesi kullanılan hesaplama platformları ile ilgilidir. Bu çalışmada halka akışın analizi Pentium 4- 3GHZ- 512MB RAM ve Pentium 4 Hyperthreading- 2.8GHZ- 1GB RAM

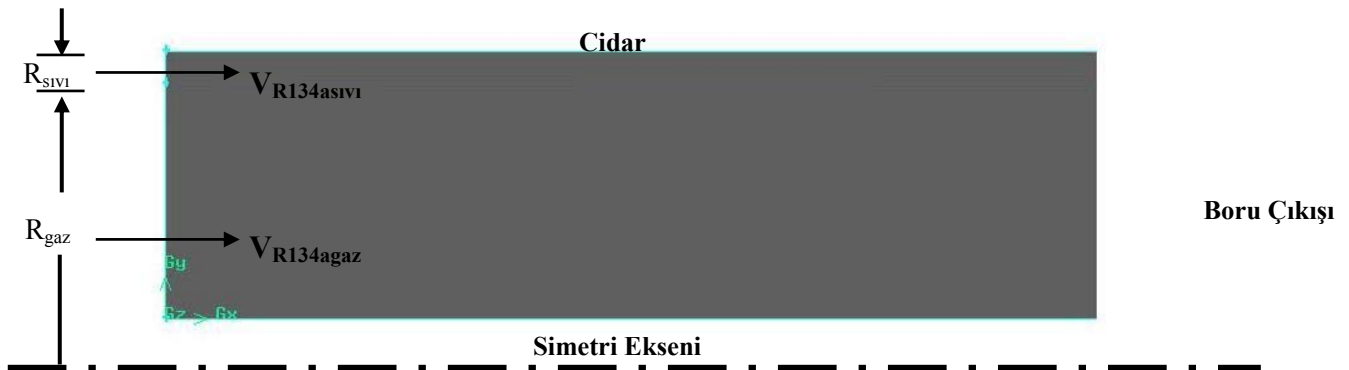
kapasitelerinde iki farklı bilgisayar ile yapılmıştır. Kullanılan VOF iki fazlı akış modeli küçük zaman adımlarına ihtiyaç duymaktadır ve bu durumda işlem zamanını uzatmaktadır. Hesaplama zamanı ile mevcut hesaplama platformları arasında bir optimum nokta bulunabilmesi için 50mm uzunluğunda iki boyutlu bir ön model ve 80mm uzunluğunda yine iki boyutlu ikinci bir model oluşturulmuştur. Hesaplama platformlarının yetersizliği nedeniyle modeller oldukça küçük tutulmak zorunda kalmıştır.

Çözüm geometrisi Gambit 2.2.30 programında hazırlanmıştır. 50 mm uzunluğundaki model için oluşturulan sayısal ağ 2100 hücre içermektedir. Şekil 6.1'de 2D aksel simetrik çözüm ağı verilmiştir.



Şekil 6.1 50 mm uzunluğundaki model için sayısal çözüm ağı

Normal çalışma koşullarında belli bir kuruluk derecesinde boruya giren yüksek hızlı buhar nedeniyle boru cidarında kısa sürede sıvı filmi oluşmasına rağmen bu problem sayısal olarak ele alındığında farklı bir durum ortaya çıkar. Eğer girişte hız sınır koşulu ve belli bir kuruluk derecesinde buhar tanımlanırsa VOF modeli bu problemi homojen akışmış gibi çözer ve cidarda sıvı filminin oluştuğu gözlenemez. Cidarda gaz sıvı arayüzeyinin hareketini modelleyebilmek için giriş sınır koşulunda bir VOF modeline uygun bir yönlendirme yapılmalıdır. Bu yönlendirme girişte sıvı ve gaz hızlarının ayrı-ayrı tanımlanması ile yapılır. Bu yaklaşım Han(2005) tarafından da kullanılmıştır. Şekil 6.2'de çözüm alanını ve sınır koşulları şematize edilmiştir.



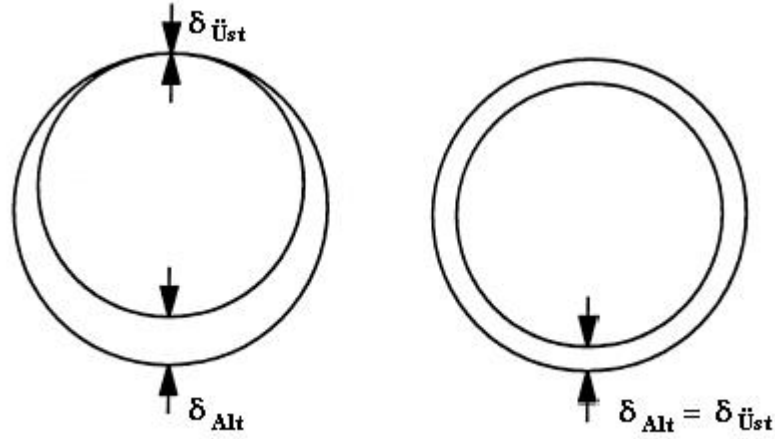
Şekil 6.2 2D Aksel simetrik model ve sınır koşulları ($R_{sıvı}$:0,5mm R_{gaz} :3,5mm)

6.2 Sınır Koşullarının Tanımlanması ve Çözücü Ayarlarının Yapılması

Her iki model için aynı sınır şartları ve aynı çözücü ayarları kullanılmıştır. İlk olarak şekil 6.2’de verilen prensibe uygun olarak giriş hızları sıvı fazı için 1m/s gaz fazı için 12.5 m/s olarak tanımlanmıştır. Buna göre kütleli akı $750\text{kg/m}^2\text{s}$ olarak deneysel verilere paraleldir. Sıvı hız giriş koşulunda sıvı hacimsel fraksiyonu 1, gaz hız giriş koşulunda sıvı hacimsel fraksiyonu 0 olarak tanımlanmış böylelikle girişte bir taraftan sadece sıvı diğer taraftan sadece gaz girdiği ayrımı yapılabilmektedir.

Fluent’in türbülans denklemlerinin çözümüne başlayabilmesi için girişte türbülans büyüklüklerinin hesaplanmasını sağlayacak ilk değerlerin tanımlanması gereklidir. Fluent’in türbülans parametrelerine geçiş yapabilmesi için hidrolik çap, sıvı ve gaz için sırasıyla 0,5 ve 7 mm ve türbülans yoğunluğu da %1 ve % 5 olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Fluent User Guide’a göre belirlenmiştir. Cidar kenarında %1 türbülans yoğunluğu düşük türbülans yoğunluğunu ifade ettiği için modelimize uygundur. Gaz fazı için %5 ilk değer olarak girilmiştir.

Eksenel simetrik çözüm yaptığımız için boru ekseni, eksen sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Böylelikle borunun sadece bir yarısı modellenerek hesaplama zamanından tasarruf sağlanmıştır. Ancak eksenel simetrik çözüm yapılabilmesi için akışında eksenel simetrik olması gereklidir. Normalde yatay silindirik boruda sıvı filmi yerçekimi etkisiyle borunun alt kısımlarında toplanma eğiliminde olduğundan akış eksenel simetrik değildir bu sebeple yerçekimi sıfır olarak alınmıştır. Bu kabul sonuçlara etki etmeyecek ancak sıvı filmi kalınlığı tüm cidar boyunca aynı olacaktır (Bknz şekil 6.5).Boru cidarında ise duvar sınır koşulu, çıkışta ise basınç sınır koşulu tanımlanmıştır. Basınç sınır koşulları gerçeğe en yakın çözümü sunmakla beraber nümerik açıdan en problemlisi sınır koşullarından biridir. İki fazlı akışta farklı yoğunlukla olan fazların hareketi söz konusu olduğu için çıkışta hızların hesaplanması da oldukça zordur. Tahmini bir hız profili verilemediğinden basınç sınır koşulu tercih edilmiştir.



Şekil 6.5 Yerçekimi etkisinde göre sıvı filmi dağılımı (Hurlburt ve Newell, 1997)

R134a için fiziksel özellikler sıvı ve buhar fazları için 40°C'ye göre Refprop Version 7'den alınmıştır. 40°C için Çizelge 6.1'de verilen fiziksel özellikler Fluent'te sıvı ve gaz fazları için ayrı-ayrı girilmiştir ve gaz fazı birincil faz olarak tanımlanmıştır. Fluent çözüm alanının herhangi bir bölgesinde bir fazın hacimsel fraksiyonu 1 olarak tanımlanmak isteniyorsa bu fazın ikincil faz olarak tanımlanmasını önermektedir. Fluent VOF modeli fazların etkileşimi için adezyon ve yüzey geriliminin tanımlanabildiği özel bir seçenek sunmaktadır. Buna göre yüzey gerilimi 0,0061268 N/m olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 6.1 40 °C için R134a fiziksel özellikleri

Sıcaklık	Basınç	Sıvı Yoğunluğu	Gaz Yoğunluğu	Sıvı Entalpi	Gaz Entalpi	Faz Değişim Entalpisi	Sıvı Viskozite	Gaz Viskozite	Yüzey Gerilimi
(°C)	(Pa)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(Poise)	(Poise)	(N/m)
40	1016600	1146,7	50,085	256,41	419,43	163,02	0,0016343	0,00012545	0,0061268

Yüzey gerilimi fazlar arası arayüzeyde oluşan dalgaların şekline etki ettiği için bu seçeneğin kullanılması tercih edilmiştir.

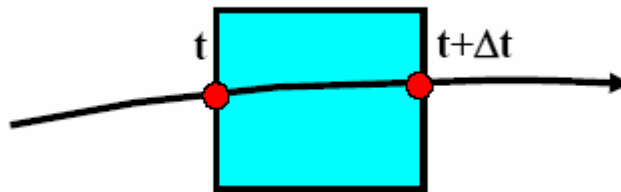
Daha öncede belirtildiği gibi eğer Fluent VOF modeli ayrık çözüm algoritması ile birlikte çalışmaktadır. Bu sebeple çözüm eksenal simetrik ve zamana bağlı olarak ayrık çözüm algoritması ile birlikte yapılacaktır. VOF modeli bir birlikte kullanmayı tercih ettiğimiz türbülans modeli RNG k-ε türbülans modelidir ve bu model cidar kenarındaki etkileri de modelleyebilmek için cidar fonksiyonları ile birlikte kullanılmıştır.

Bölüm 5.4.3.2’de belirtildiği gibi zamana bağlı problemlerdeki performansı ve hesaplama zamanını azaltması nedeniyle basınç ve hızın eşleştirilmesi için PISO algoritması tercih edilmiştir. Basıncın enterpolasyonu için ise yine Bölüm 5.4.3.1’de tanımlanan hususlar doğrultusunda cisim kuvveti ağırlıklı enterpolasyon şeması tercih edilmiştir. Momentum, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans sönmüleme oranları için ise birinci dereceden enterpolasyon şemaları tercih edilmiştir. Tüm rahatlatma parametreleri ise PISO algoritmasının getirdiği esneklik sayesinde 1 olarak tanımlanmıştır.

Analizin zamana bağlı olarak yapılacağını belirtmiştik dolayısıyla zaman adımının belirlenmesi analizin geneli açısından çok önemlidir. Fluent hacimsel fraksiyon için zamana bağlı süreklilik denklemini açık zaman adımı algoritması ile çözer. Açık (eksplisit) ayıklaştırma şemasının stabilitesini garanti etmek için zaman adımının seçimi belli kıstaslara göre yapılmalıdır. Zaman adımını belirleyen parametre en küçük mesh boyutu ve faz hızıdır. Bu iki parametre arasındaki ilişki Courant sayısı yardımıyla kurulur. Courant sayısı boyutsuz bir sayıdır ve zamana bağlı analizde seçilen zaman adımını akışkanın tipik bir kontrol hacmi içinde akış yönünde hareket etmesi için geçen karakteristik süre ile karşılaştırır. Courant sayısı denklem 6.1’de verilmiştir. Tüm akış alanını doğru bir şekilde modelleyebilmek için 6.2’de verilen şart sağlanmalıdır. Şekil 6.6’da bu açıklama şematize edilmiştir akışkan bir zaman adımında bir mesh mesafesinden daha hızlı hareket etmemelidir.

$$\frac{\Delta t \cdot V_{Maks,Akışkan}}{\Delta x_{Min,Mesh}} \leq 1.0 \quad (6.1)$$

$$\frac{\Delta t \cdot V_{Maks,Akışkan}}{\Delta x_{Min,Mesh}} \leq 1.0 \quad (6.2)$$



Şekil 6.6 Δt zamanında akışkanın hareketi

Fluent courant sayısının değerini standart olarak 0,25 olarak alır. Bu değer stabil bir çözümlü garanti eder. Zaman adımının belirlenmesinde diğer önemli bir husus simulasyon sürecinde gaz hızının fazlararası arayüzey geometrisine bağlı olarak artmasıdır. Bu artan hızlara bağlı olarak zaman adımlarının değiştirilmesi gerekebilir. Her iki simulasyonda da zaman adımları $10^{-6(\pm 1)}$ mertebesinde tutulmuştur.

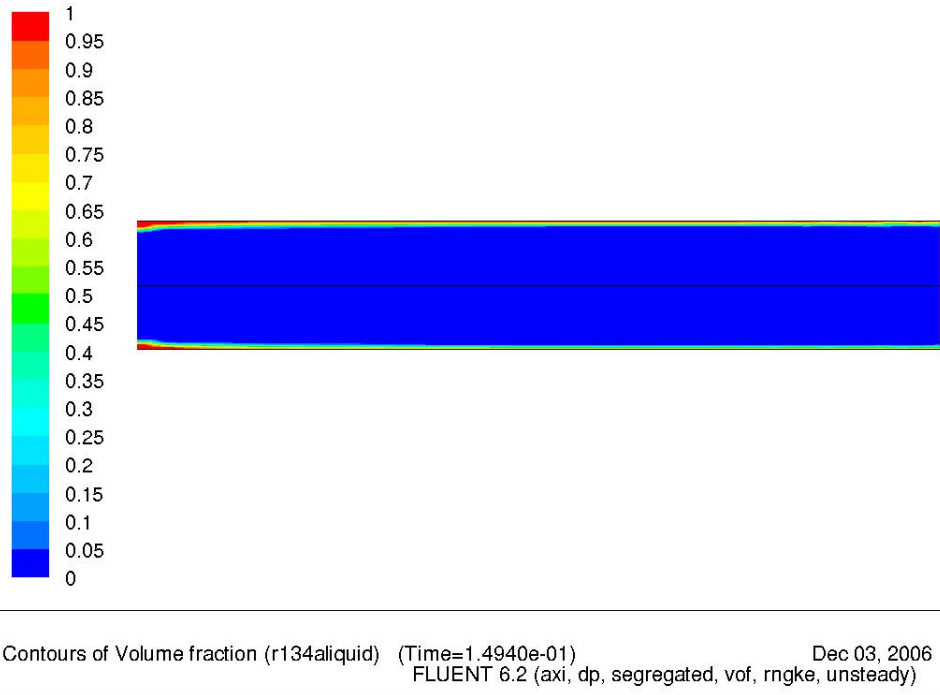
Analize başlamak için yapılması gereken son şey ilk değerlerin atanmasıdır. k, ε değerleri için başlangıç değeri sıfır atanmış ve boruda fazların hacimsel fraksiyonları için başlangıç değeri yine sıfır olarak tanımlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi tüm yakınsama kriterleri de 10^{-4} olarak belirlenmiştir.

7 ANALİZ SONUÇLARI

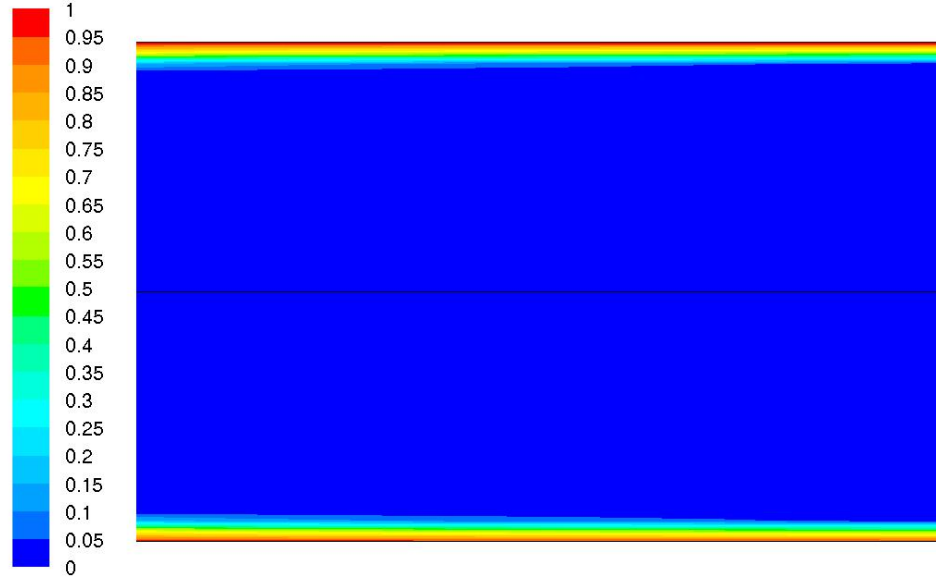
Analiz sonuçları fazlararası arayüzey geometrisi ve iki fazlı basınç düşüşleri olmak üzere iki farklı kritere göre değerlendirilmiştir.

7.1 Fazlararası Arayüzey Geometrisi

İki fazlı akışta sürtünme kaybını arttırması ve ayrıca sıvı filminden damlacıkların koparak gaz fazına karışması mekanizmasında etkileri olduğu için halka akıştaki önemli olgulardan biride arayüzeyde oluşan dalgalardır. Bu çalışmada özel olarak halka akışta dalga mekanizmasının incelenmesi amaçlanmamıştır ancak özellikle 80mm'lik ikinci modelde küçük genlikli dalgalar gözlenebilmiş ve ayrıca dalga hareket mekanizması incelenebilmiştir. 50mm'lik ilk modelde ise özellikle cidara yakın bölgelerde mesh sıklığı yetersiz olduğu için dalgalar gözlenememiştir. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de 50mm'lik model için $t=0,14$ sn'deki sıvı filminin yapısı incelenebilir. Şekil 7.3 ve 7.4'te ise 80mm'lik model için $t=0,23$ sn'de aynı detaylar verilmiştir.



Şekil 7.1 Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları–1 $t=0,14$ s (50mm)



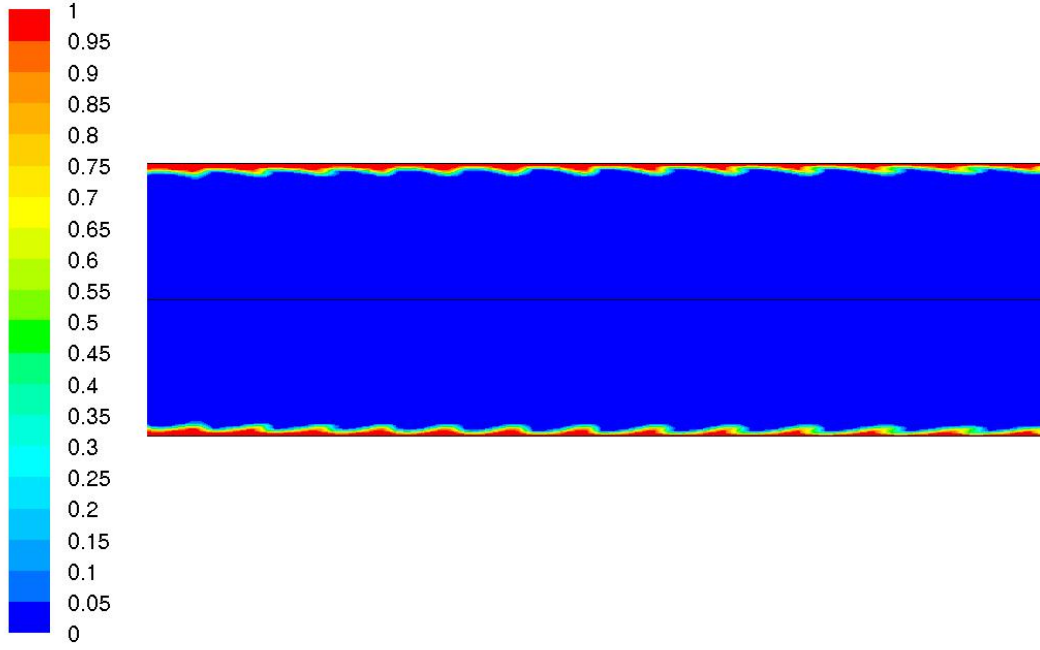
Contours of Volume fraction (r134aliquid) (Time=1.4940e-01) Dec 03, 2006
 FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

Şekil 7.2 Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-2 $t=0,14s$ (50mm)



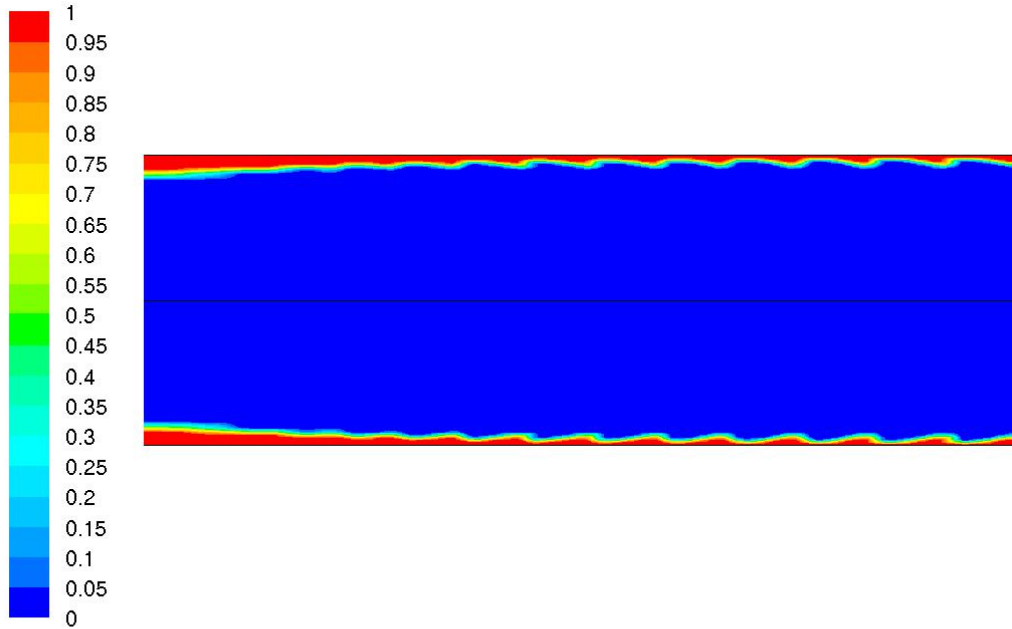
Contours of Volume fraction (r134aliquid) (Time=2.3875e-01) Dec 03, 2006
 FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

Şekil 7.3 Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-1 $t=0,23s$ (80mm)



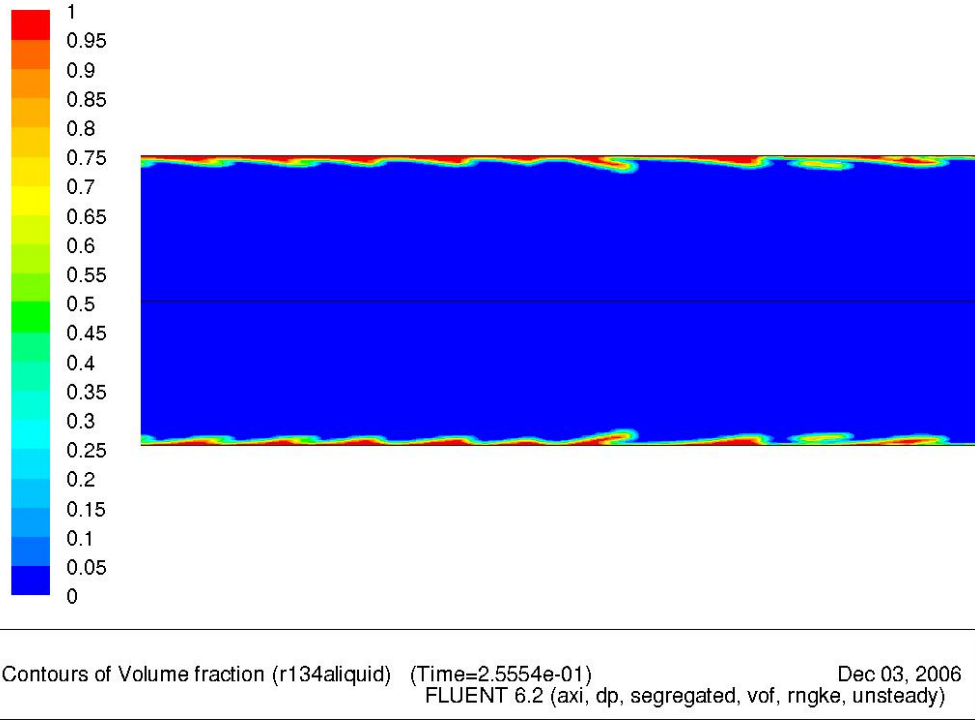
Contours of Volume fraction (r134a liquid) (Time=2.3875e-01) Dec 03, 2006
FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

Şekil 7.4 Sıvı ve gaz fazlarının hacimsel oranları-2 $t=0,23s$ (80mm)



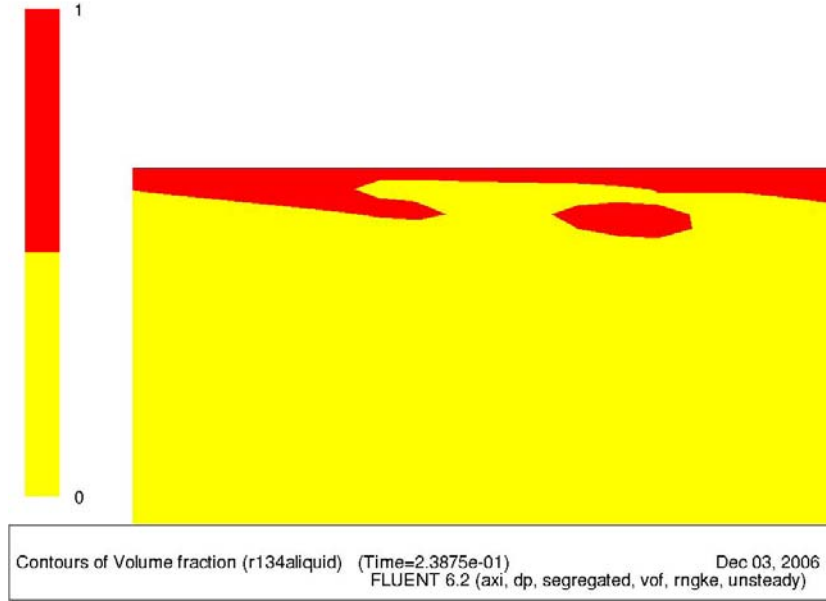
Contours of Volume fraction (r134a liquid) (Time=2.5554e-01) Dec 03, 2006
FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

Şekil 7.5 Giriş bölgesi sıvı ve gaz hacimsel oranları $t=0,25s$ (80mm)



Şekil 7.6 Çıkış bölgesi sıvı ve gaz hacimsel oranları $t=0,25s$ (80mm)

Şekil 7.3–7.4–7.5 ve 7.6 incelendiğinde 80mm’lik model için dalga hareketi ile ilgili detayların olduğu gözlenebilir 50mm’lik modelde sınır şartları aynı olmasına rağmen cidar yakın bölgelerdeki sayısal çözüm ağının yetersiz olması nedeniyle arayüzey geometrisi yakalanamamıştır. Bilindiği gibi halka akışta yüksek gazı hızı nedeniyle dalgaların tepeleri kopmakta ve bu kopan parçacıklarda gaz fazına karışarak gaz fazı içindeki damlacıkları oluşturmaktadır. Daha sonra bu damlacıklar türbülansın etkisiyle sıvı fazına tekrar karışmaktadır. Eğer boru yeterince uzunsa bu mekanizma dengeye ulaşır. Ancak bu dengenin sağlanabileceği uzunluk çapın 200 katı kadar olabilir.(Kishore ve Jayanti 2004) Bu çalışmada seçilen model gaz fazı içindeki damlacıkları modellemek için uygun değildir ancak akışın çıkışa yaklaştığı noktalarda bu dalgaların tepesinden sıvının kopma mekanizması yakalanabilmiştir. Şekil 7.7’de bu mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi için hacimsel fraksiyon iki renk ile belirtilmiştir.



Şekil 7.7 Dalga tepesinin kopması $t=0.23$ sn (80mm)

Görüldüğü gibi arayüzey geometrisini modellemek için 2D eksenel simetrik model yeterlidir. Ancak daha detaylı 2D ve 3D analizler yapılabilmesi için kişisel hesaplama platformları yeterli gözükmemektedir. Özellikle 3D analizler yapılabilmesi için yüksek performanslı hesaplama platformu altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Halka akıştaki dalgaların oluşumu ve bununla ilgili teoriye katkıda bulunmak için HAD metodu deneysel görüntüleme tekniklerinin yokluğunda veya uygulanabilir olmadığı durumlarda kullanılabilir. Ayrıca dalga ve damlacık oluşumu ile ilgili mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi için yine HAD teknolojisi kullanılabilir.

7.2 İki Fazlı Basınç Düşüşleri

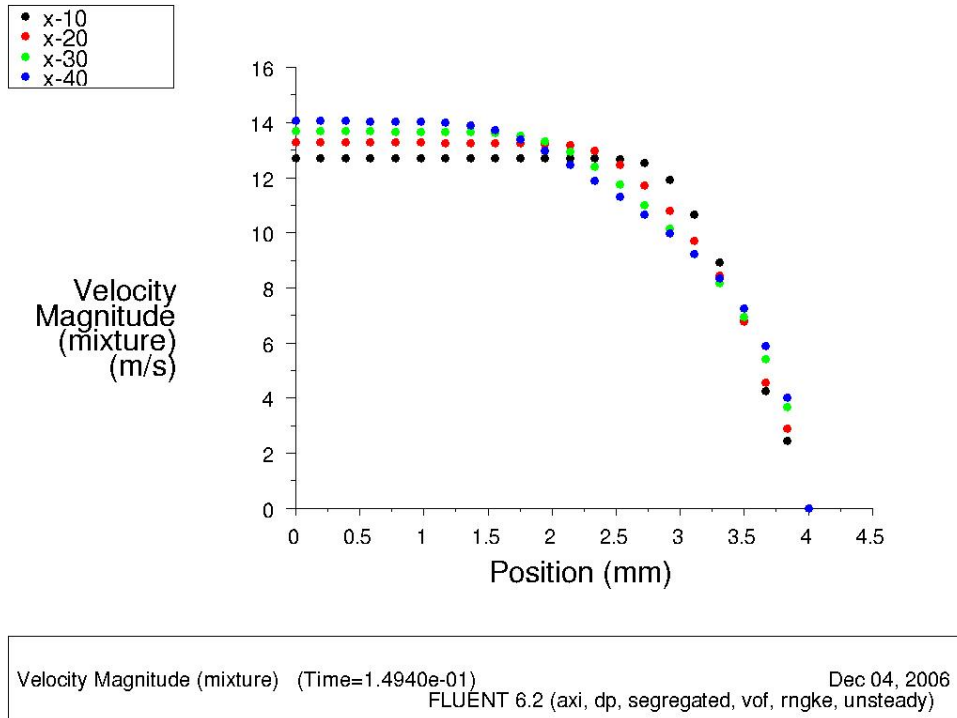
Bu aşamada yatay boruda halka akışta iki fazlı basınç düşüşünün hesaplanabilmesi için HAD teknolojisinin kullanılabilir olup olmadığı değerlendirilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada karşılaştırmada kullanılacak deneysel veriler Cavallini'nin Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube (2001) çalışmasından alınmıştır. Bu çalışmaya göre R134a'nın 40°C doyma sıcaklığında 750kg/s m^2 kütleli akıda yoğunmadaki iki fazlı basınç düşüşü ortalama buhar kuruluk derecesi 0,65 için $13,5\text{ kPa/m}$ 'dir. Basınç düşüşünün ortalama kuruluk derecesi 0,65'deki değerinin alınmasının nedeni bizim kurduğumuz modele göre de kuruluk derecesinin 0,65 olmasıdır.

Elbette deneysel sonuçlardan alınan bu değer yoğunlaşma için olduğundan faz değişiminden gelen basınç düşüşü terimini de içermektedir. Bu terim denklem 3.14 yardımıyla hesaplanır. Momentum teriminin bulunabilmesi için giriş ve çıkış buhar kuruluk derecelerinin bilinmesi gerekmektedir. Ortalama buhar kuruluk derecesi ve aynı şartlar için ısı transfer katsayısı Cavallini'nin çalışmasından $7000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ olarak bilinmektedir. Tüm bu bilinenlere göre aşağıdaki ifade yazılabilir.

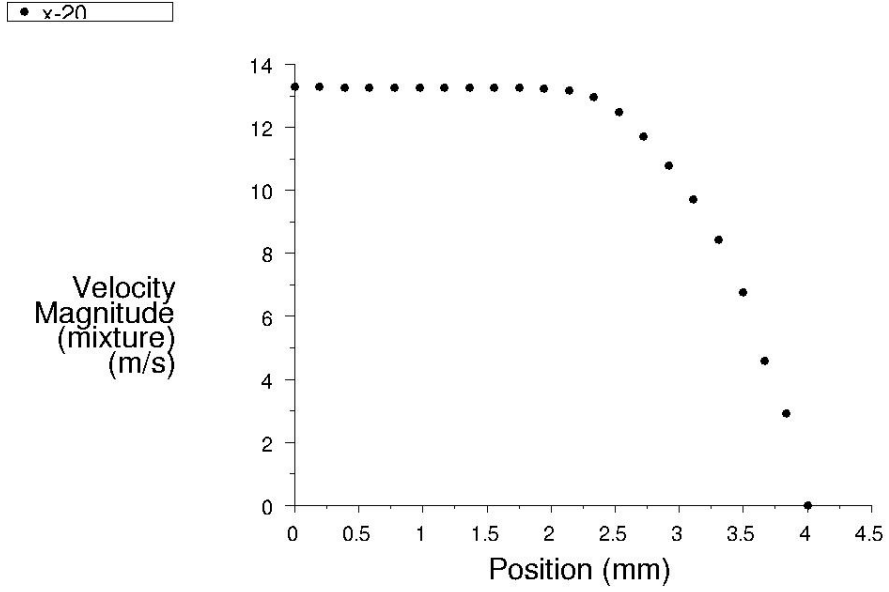
$$\dot{m} h_{sg} (x_{giriş} - x_{çıkış}) = h_i \Delta t \quad (7.1)$$

Denklem 7.1'de faz değişim entalpisinin 163020 J/kg , giriş buhar kuruluk derecesinin ise 0,15 ile 0,85 arasında olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkıldığında giriş kuruluk derecesinin $x=0,75$ olduğu durumda çıkış kuruluk derecesi 0,54 olmakta ve ortalama 0,65 buhar kuruluk derecesi sağlanmaktadır. Bu değerlere göre denklem 3.14'te momentum kaynaklı basınç düşüşü $2,32 \text{ Pa}$ olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlara göre Model-1 ve 2 değerlendirilebilir. 50mm'lik ilk model için $x = 10, 20, 30$ ve 40 mm 'de radyal hız dağılımları Şekil 7.8 de 80 mm 'lik model için $x = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ ve 70 'deki hız dağılımları ise Şekil 7.10'da verilmiştir.

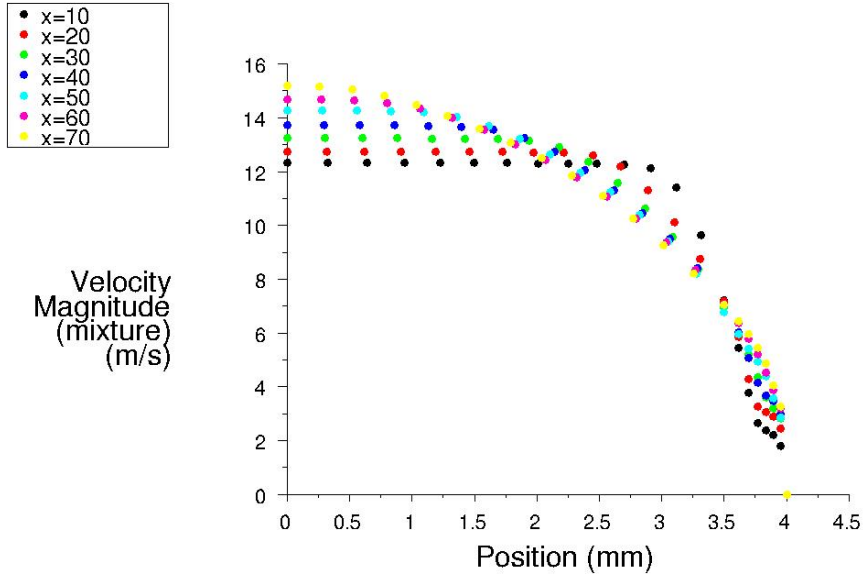


Şekil 7.8 Çeşitli x koordinatlarında radyal hız dağılımı. (50mm)



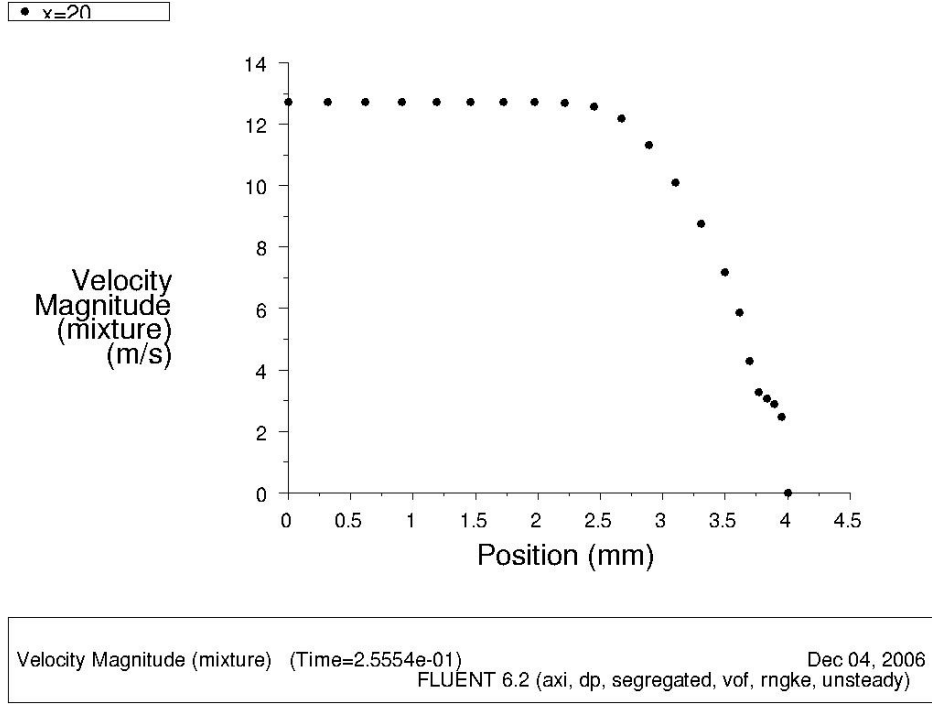
Velocity Magnitude (mixture) (Time=1.4940e-01) Dec 04, 2006
 FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

Şekil 7.9 x =20 mm koordinatında raydal hız dağılımı (50mm)



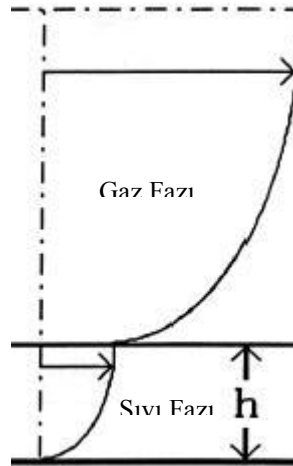
Velocity Magnitude (mixture) (Time=2.5554e-01) Dec 04, 2006
 FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

Şekil 7.10 Çeşitli x koordinatlarında raydal hız dağılımı (80mm)

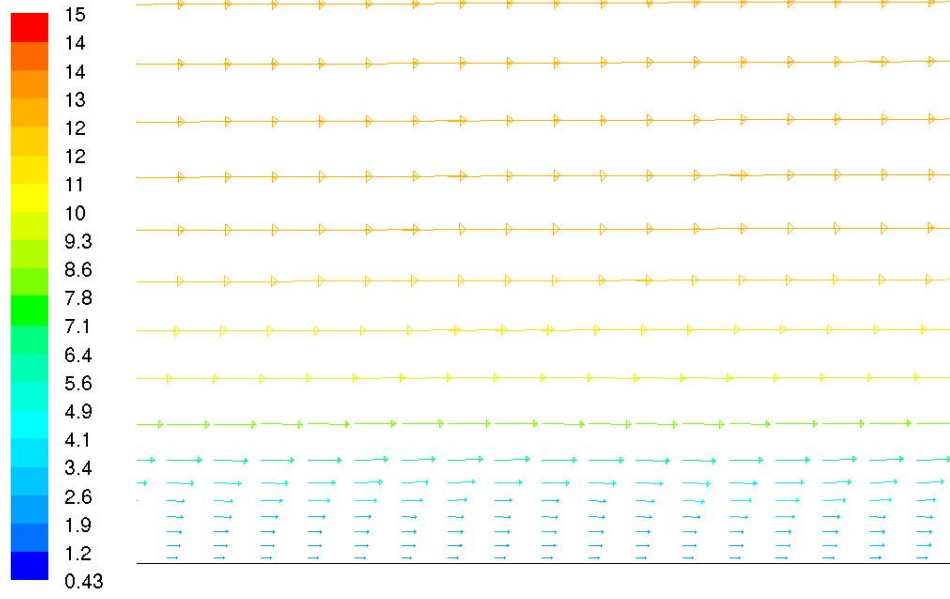


Şekil 7.11 $x = 20$ mm koordinatında raydal hız dağılımı (80mm)

Şekil 7.12 halka akışta elde edilmesi gerekli hız profilini göstermektedir. 50 mm'lik model cidardaki çözüm ağı hücre sıklığının yetersizliği nedeniyle cidara yakın bölgelerde gerçek hız profilinden uzak kalmıştır. 80mm'lik model ise cidara yakın bölgedeki hız profillerini daha iyi yakalamıştır.

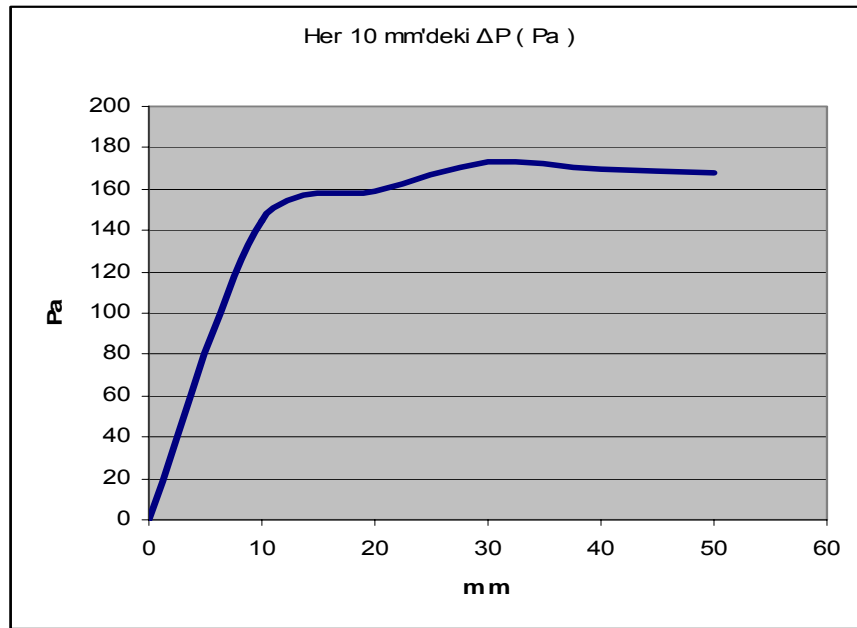


Şekil 7.12 Halka akışta hız profili

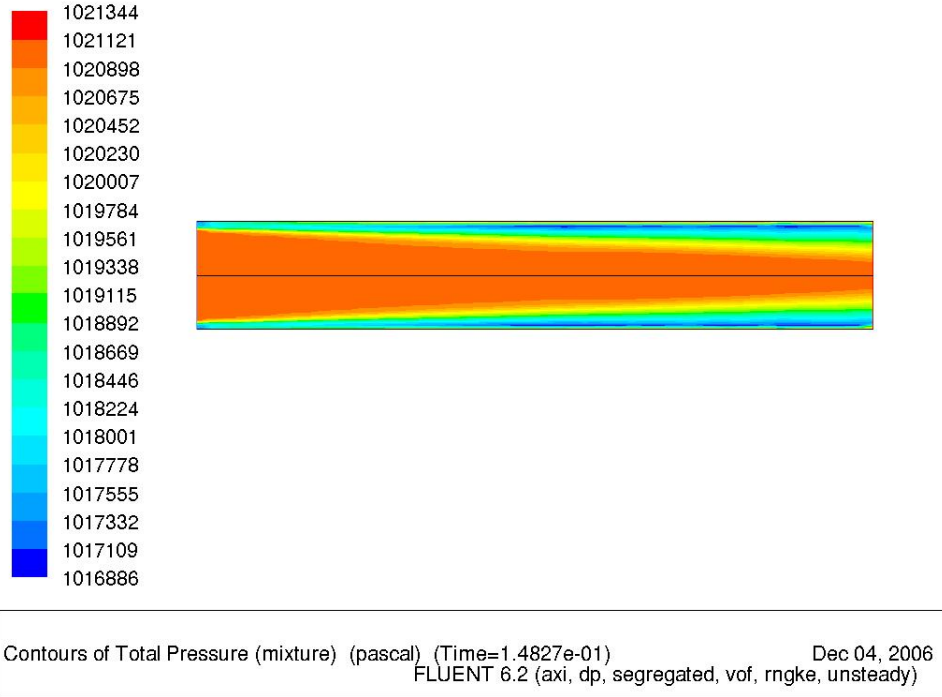


Şekil 7.13 Hız profili t=0.25 (80mm)

50 mm'lik model için HAD analizinden alınan sonuçlara göre her 10mm'deki basınç düşüşü aşağıdaki grafikte verilmiştir. Toplam basıncın boru içinde dağılımı ise şekil 7.15'te görülebilir.

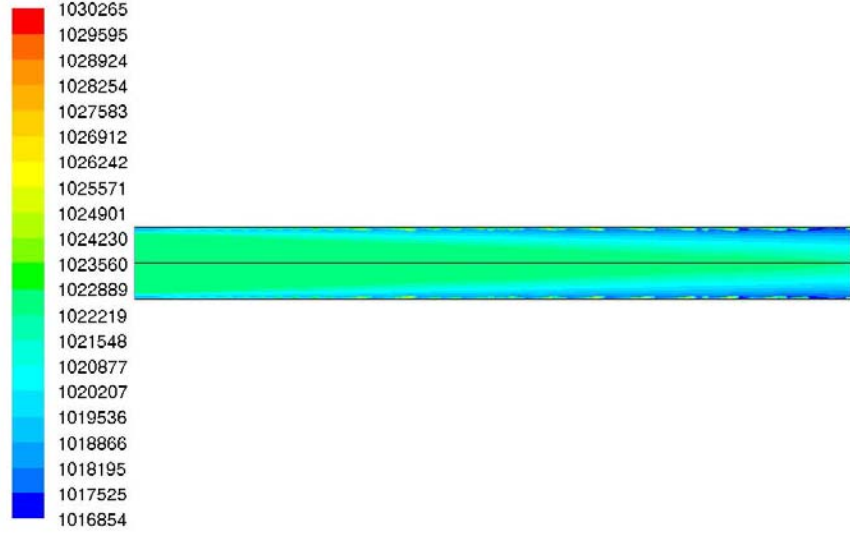


Şekil 7.14 Her 10mm'deki basınç farkı (50mm)



Şekil 7.15 Boru boyunca toplam basıncın dağılımı (50mm)

HAD analizine göre sonuçlar değerlendirildiğinde 50 mm'lik modele göre elde edilen basınç düşüşü 16,3 kPa/m'dir. Deneysel sonuçlara göre toplam basınç düşüşü 13,5 kPa/m, yine deney şartlarında momentum terimi ise 2,32 kPa'dır. Buna göre sürtünme terimi 1 m boru boyu için 11,18 kPa/m'dir. HAD ve deneysel sonuç karşılaştırıldığında da %31,5 kadar bir sapma ortaya çıkmaktadır. 80 mm'lik modele göre elde edilen basınç düşüşü ise 13,3 kPa /m ve deneysel basınç düşüşü ile karşılaştırıldığında % 15 sapma ortaya çıkmaktadır. Bu model deneysel sonuçlara daha çok yaklaşmıştır ancak boru boyunca basınç düşüşleri incelendiğinde 40. ve 50. mm arasında basınç düşüşünün aniden birkaç merteye sığdığı görülür. Tanımlanan bu bölgede dalga hareketi hızlanmaktadır ancak yine de bu ani yükselişin sebebi açıklanamamıştır.



Contours of Total Pressure (mixture) (pascal) (Time=2.6355e-01) Dec 05, 2006
FLUENT 6.2 (axi, dp, segregated, vof, rngke, unsteady)

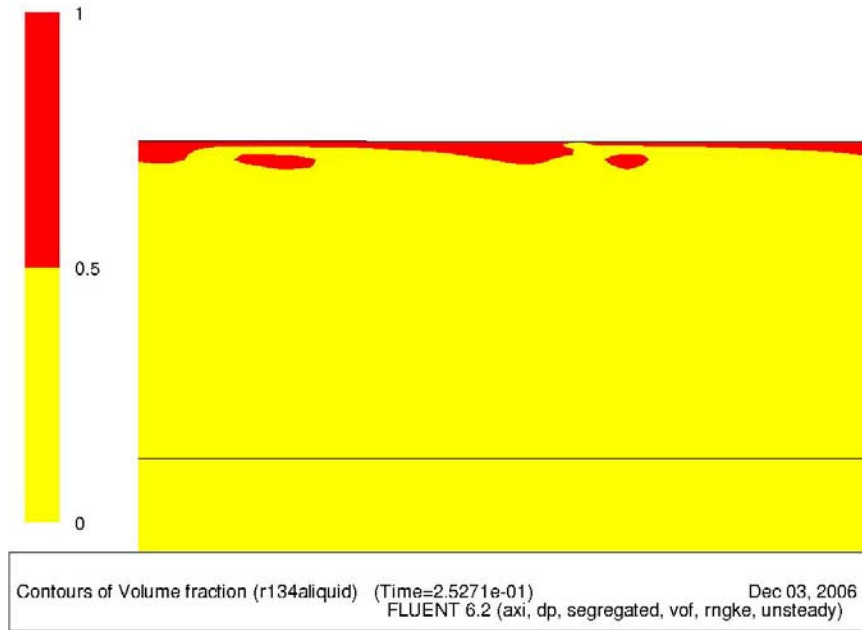
Şekil 7.16 Boru boyunca toplam basıncın dağılımı (80mm)

8 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gaz – sıvı akış rejimlerine uygulanabilecek sayısal yöntemler tanıtılmış özel olarak ta halka akış sayısal olarak incelenmiştir. İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması başta da belirtildiği gibi güncel bir araştırma konusudur. Kullanılan yöntemlerin optimizasyonu ve daha güvenilir hale getirilmesi bu teknoloji açısından devamlı güncel bir sorundur.

Ele alınan çözüm yöntemi ve sonuçlar incelendiğinde Fluent 6.2.16 ticari HAD kodu ile VOF modelinin halka akışın modellenmesi için kullanılabileceği görülmektedir. 8mm iç çapındaki yatay boruda adyabatik iki fazlı halka akışta R134a akışkanı ile yapılan simülasyonlarda hazırlanan iki farklı modele göre basınç düşüşleri %31,5 ve % 15 sapma elde edilmiştir. Ele alınan boru boyları hesaplama platformları ile ilgili kısıtlamalar nedeniyle 50 ve 80 mm olarak sınırlandırılmıştır. R134a akışkanının fiziksel özellikleri deneysel şartlara paralel olarak Refprop Version 7'den 40°C için alınmıştır.

Özellikle 80 mm'lik model ile arayüzey geometrisi detayları elde edilebilmiş ve film yüzeyindeki dalgalar gözlemlenmiştir. Bu çalışmada gaz fazı içindeki damlacıkların hareketi ihmal edilmiştir ancak damlacık oluşum sürecinin bir parçası olan dalga tepelerinin gaz fazının yarattığı gerilme ile kopması ve gaz fazına karışması modellenmiştir.



Şekil 8.1 Dalga tepelerinin kopması

Karşılaşılan temel sorun hesaplama platformları ile ilgilidir bu sorun bizi süre ve farklı türbülans modellerinin kullanılabilmesi açısından sınırlamıştır. Yukarıda ele alınan her iki model içinde simülasyonlar 4 hafta kadar sürmüştür. Kaldı ki kullanılan kişisel bilgisayarlar bile nispeten eski teknolojidir ve bu tip bir çalışmanın ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Özellikle 80 mm'lik ikinci model ile dalga hareketleri gözlenebilmiş olsa bile sonuçlara göre gözden geçirilmiş yeni modeller kurularak optimizasyon yapılamamıştır. Deneysel uygulamaların ve görüntüleme tekniklerinin uygulanabilirliğinin az olduğu çalışma koşullarında uygun altyapı sağlandığı takdirde VOF modeli kesinlikle alternatif bir mühendislik aracı olabilir.

Birinci ve ikinci modellerde sayısal olarak elde edilen iki fazlı basınç düşüşleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Kurduğumuz model optimizasyonlar yapılarak farklı soğutucu akışkanlar içinde uygulanabilir ve sonuçların geçerliliği artırılabilir. Bu husus önemlidir çünkü sayısal yöntemler deneysel yöntemlere ve amprik yaklaşımlara alternatif olarak farklı soğutucu akışkanlar için dizayn edilecek sistemlerin hidrodinamik performansını incelemek, basınç düşüşlerini hesaplamak için kullanılabilir. Uygun altyapı sağlandığı takdirde HAD simülasyonları ile ısı değiştiricilerin optimizasyonu yapılabilir. Bu bağlamda türbülans modelinin seçimi çok önemlidir $k-\omega$ ve RSM modelleri seçtiğimiz RNK $k-\epsilon$ türbülans modeline alternatif olabilir ancak RSM türbülans modeli % 50–60 daha fazla hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır.

Fazlar arası arayüzey dinamiği açısından ele alındığında yaptığımız çalışma halka akışta dalga hareketi ile ilgili olarak yapılacak daha kapsamlı çalışmalar için başlangıç noktası olabilir. Kurduğumuz modelde arayüzeyde dalga hareketi gözlenebilmiştir.

Sonuç olarak hesaplamalı akışkanlar mekaniği teknolojisinin deneysel metodlara alternatif olabileceği söylenebilir ancak iki fazlı basınç düşüşlerinin daha hassas olarak hesaplanabilmesi için kullanılan yöntemlerin gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın faz değişimi gibi daha kapsamlı iki fazlı akış mekanizmalarını da içerecek şekilde genişletilebilmesi bu optimizasyonların yapılabilmesine bağlıdır.

KAYNAKLAR

Adechy D., Issa R.I. (1999) "Numerical Modelling of Horizontal Annular Flows" Proc. of Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, vol. III, p.1607, PISA, 1999.

Adechy D., Issa R.I. (2003) "Modelling of Annular Flow Through Pipes And T-Junctions" Computers & Fluids 33, (2004), 289–313.

Andersen V., (2003) "Simulation of Two-Phase Flows in a Distributor Application", Master Thesis in Mechanical Engineering, Lund Institute of Technology.

Balasubramaniam R., Ramé E., Kizito J., ve Kasemsi M. (2006) "Two Phase Flow Modeling: Summary of Flow Regimes and Pressure Drop Correlations in Reduced and Partial Gravity" Technical Report NASA/CR—2006-214085, National Center for Space Exploration Research, Cleveland, Ohio.

Bandarra Filho E. P., Saiz Jabardo J.M., Barbieri P. E.L., (2004) "Convective boiling pressure drop of refrigerant R-134a in horizontal smooth and microfin tubes" International Journal of Refrigeration 27,(2004),895–903.

Blazek J.(2001) "Computational Fluid Dynamics:Principles and Applications", Elsevier, Amsterdam.

Bektaş Ü.M.,(2005) "Kondenser Deney Sisteminin Ön Hesaplarının ve Kalibrasyon Deneylerinin Yapılması" Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Cavallini A., Col D.D.,Doretti L., Longo G.A., Rossetto L. (1999) "Heat transfer and pressure drop during condensation of refrigerants inside horizontal enhanced tubes" International Journal of Refrigeration 23, (2000), 4-25.

Cavallini A., Col D.D., Doretti L., Longo G.A., Rossetto L.(2000) "Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube" International Journal of Refrigeration 24, (2001), 73-87.

Cavallini A., Censi G., Del Col D., Doretti L.,Longo G.A , Rossetto L., Zilio C.(2002) "Condensation inside and outside smooth and enhanced tubes - a review of recent research" International Journal of Refrigeration 26, (2003), 373–392.

Choi J.Y., Kedzierski M.A., Domanski P.A.(1999) "A Generalized Pressure Drop Correlation for Evaporation and Condensation of Alternative Refrigerants in Smooth and Micro-fin Tubes" National Institute of Standards and Technology Building and Fire Research Laboratory Report ,NISTIR 6333.

Chapra S.C., Raymond P.Canale(2004) "Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler İkinci Baskı" Literatür Yayıncılık, İstanbul.

Cokljat D., Slack M., Vasquez S.A., Bakker A., Montante G.(2004)"Reynolds-Stress Model for Eulerian Multiphase" Fluent Technical Notes, March 2004

Cokljat D., Ivanov V.A., F. J. Sarasola, Vasquez S.A., (2000) “Multiphase k- ϵ Models for Unstructured Meshes” Presented at the ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting June 11-15, 2000, Boston, MA

Collier J.G., Thome J.R., (1996) “Convective Boiling and Condensation Third Edition” Oxford University Press Inc, New York.

Çengel Y.A.,(2004) “Heat Transfer A Practical Approach Second Edition In SI Units” McGraw Hill, Singapore.

Çengel Y.A, Cimbala J.M., (2006) “Fluid Mechanics Fundamentals and Applications” McGraw Hill, New York

Dal M.(1999) “Numerical Simulation of Two Phase Flow Using the Homogeneous Flow Model” Master Study, Boğaziçi University, İstanbul.

El Hajal J., Thome J.R., Cavallini A.,(2002) “Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map” International Journal of Heat and Mass Transfer 46,(2003),3349–3363.

El Hajal J., Thome J.R., Cavallini A.,(2003) “El Hajal J., Thome J.R., Cavallini A.,(2002) “Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map” International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 3349–3363.” International Journal of Heat and Mass Transfer 46, (2003),3365–3387

Fluent 6.2.16 User Guide (2005) Fluent Inc.

Frank T., Zwart P. J., Shi J.M., Krepper E., Lucas D, Rohde U. (2005) “Inhomogeneous MUSIG Model – a Population Balance Approach for Polydispersed Bubbly Flows” International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005 Bled, Slovenia, September 5-8, 2005.

Frank T.:(2005) “Advances in Computational Fluid Dynamics (CFD) of 3-dimensional Gas-Liquid Multiphase Flows” NAFEMS Seminar: “Simulation of Complex Flows (CFD)“, April 25 - 26, 2005,Niedernhausen/Wiesbaden, Germany

Frank T., (2005) “Numerical simulation of slug flow regime for an air-water two-phase flow in horizontal pipes” The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11) Paper: 038 Popes’ Palace Conference Center, Avignon, France, October 2-6, 2005.

Fukano T., Inatomi T. (2003) “Analysis of Liquid Film Formation in A Horizontal Annular Flow By DNS” International Journal of Multiphase Flow 29,(2003),1413–1430.

Gao H.,Gu H.Y. ve Guo L.J. (2002) “Numerical Study of Stratified Oil–Water Two-Phase Turbulent Flow in A Horizontal Tube” International Journal of Heat and Mass Transfer 46, (2003),749–754.

Ghorai S., Nigam K.D.P. (2005) “CFD Modeling of Flow Profiles and Interfacial Phenomena in Two-Phase Flow in Pipes”Chemical Engineering And Processing 45,(2006),55–65.

- Han H., (2005) "A Study of Entrainment in Two Phase Upward Cocurrent Annular Flow in a Vertical Tube" Ph.D Thesis, University of Saskatchewan.
- Han H., Zhu Z. ve Gabriel K. (2006) "A study on the effect of gas flow rate on the wave characteristics in two-phase gas-liquid annular flow" Nuclear Engineering and Design,4483, No of Pages 9.
- Hinde D.K, Dobson M.K.,Chato J.C.,Mainland M.E.,Rhines N., (1992) "Condensation Of Refrigerants 12 And 134a In Horizontal Tubes With And Without Oil" ACRC Technical Report 26.
- Hurlburt E.T., Newell T.A.(1996) "Two-Phase Modelling Of Refrigerant Mixtures In The Annular/ Stratified Flow Regimes ACRC Technical Report 96.
- Hurlburt E.T., Newell T.A.(1997) "Modelling of the Evaporation and Condensation of Zeotropic Refrigerant Mixtures in Horizontal Annular Flow" ACRC Technical Report 129.
- Incropera F.P., DeWitt D.P. (2001) "Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri" Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Jayanti S. ve Hewitt G. F. (1997) "Hydrodynamics and Heat Transfer in Wavy Annular Gas-Liquid Flow: A Computational Fluid Dynamics Study", Int. J. Heat Mass Transfer,Vol. 40, No. 10, pp. 2445-2460.
- Kaykaoğlu R., (1994) "Introduction to Computational Fluid Dynamics – Summer Short Course Series on Computational Fluid Dynamics Techniques in Engineering",Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kleinstreuer C.,(2003) "Two Phase Flow Theory and Applications", Taylor&Francis, New York.
- Kishore B.N., Jayanti S.(2004) "A multidimensional model for annular gas-liquid flow" Chemical Engineering Science 59 ,(2004), 3577 -3589.
- Li, J ve Renardy, Y. Y. (1998) "Direct Simulation of Unsteady Axisymmetric Core-Annular Flow with High Viscosity Ratio" J.Fluid mechanics 391 ,123-149.
- Li G., Frankel S., Braun J.E., Groll E. A. (2004) "Application of CFD models to two -phase flow in refrigerant distributors "HVAC&R Research; Jan 2005; 11, 1; Career and Technical Education pg. 45.
- Lim T.W. ve Kim J.H (2005) "An Experimental Investigation of Pressure Drop in Flow Boiling of Flow Pure Refrigerants and Their Mixture in Horizontal Tubes" JSME International Journal, Series B, Vol 48, No.1 92-98.
- Lioumbas I. S. , Mouza A. A. ve Paras S. V. (2002) "Local Velocities inside the Gas Phase During Counter-Current Two-Phase Flow in A Narrow Vertical Channel" Trans IChemE, Vol 80, Part A, September 2002
- Marshall E. M., Bakker A. (2003) "Computational Fluid Mixing" John Wiley and Sons, USA.

Meier M., Yadigaroglu G., Smith B.L.(2001) “A Novel Technique for Including Surface Tension in PLIC-VOF Methods” *Eur. J. Mech. B - Fluids* 0 ,1–15.

Mouza A. A., Paras S. V., A. J. Karabelas (2001) “CFD Code Application to Wavy Stratified Gas-Liquid Flow” *Trans IChemE, Vol 79, Part A*.

Muehlbauer P., Egorov Y., Pigny S., Andreani M., Alavyoon F., Boucker M., Lo S., (2004) “Review of two-phase modelling capabilities of CFD computer codes and feasibility of transient simulations” European commission 5th euratom framework programme 1998-2002 key action: nuclear fission - evaluation of computational fluid dynamic methods for reactor safety analysis.

Newton C.H., Behnia M. (2000) “Numerical Calculation of Turbulent Stratified Gas-Liquid Pipe Flows” *International Journal of Multiphase Flow*, 26 , 327-337

Newton C. H., Behnia M. (2001) “A Numerical Model of Stratified Wavy Gas–Liquid Pipe Flow” *Chemical Engineering Science* 56, 6851–6861.

Nualboonrueng T. ve Wongwiset S., (2004) “Two Phase Pressure Drop of R134a During Condensation in Smooth and Micro-Fin Tubes at High Mass Flux” *Int.Comm.Heat Transfer* Vol.31 No.7 ,991-1004.

Ould Didi M.B., Kattan N.,Thome J.R., (2001) “Prediction of two-phase pressure gradients of refrigerants in horizontal tubes” *International Journal of Refrigeration* 25, (2002) ,935–947.

Ould Didi M.B., Kattan N., Thome J.R.,(2001) “Prediction of two-phase pressure gradients of refrigerants in horizontal tubes” *International Journal of Refrigeration* 25, (2002), 935–947.

Quiben J. M., (2005) “Experimental and Analytical Study of Two-Phase Pressure Drops During Evaporation In Horizontal Tubes” Ph.D.Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne.

Scheuerer M., Andreani M., Bestion D., Egorov Y., Heitsch M., Menter F.,Muehlbauer P., Pigny S., Schwäger C., Willemsen S. (2005) “Condensed Final Summary Report” European commission 5th euratom framework programme 1998-2002 key action: nuclear fission - evaluation of computational fluid dynamic methods for reactor safety analysis.

Smith S.J., Shao L., Riffat S.B.(2001) “Pressure Drop of HFC Refrigerants Inside Evaporator and Condenser Coils as Determined By CFD” *Applied Energy* 70, (2001) ,169–178

Supa-Amornkul S., Steward F. R., Lister D. H. (2005) “Modeling Two-Phase Flow in Pipe Bends” *Journal of Pressure Vessel Technology* MAY 2005, Vol. 127, 204-209

Taha T, Cui Z.F.(2005) “CFD Modelling of Slug Flow in Vertical Tubes” *Chemical Engineering Science* 61, (2006) ,676 – 687.

Tannehill J.C.,Anderson D.A.,Pletcher R.H, (1997) “Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer Second Edition”, Taylor&Francis, Philadelphia.

Thome J.R., (2001) "Flow Regime Based Modelling of Two Phase Flow Heat Transfer" Multiphase Science and Technology, Vol 13, Nos 3&4, pp 131-160.

Thome J. R., (2004) "Wolverine Engineering Data Book III", Wolverine Tube Inc.

Thome J. R., (2005) "Condensation in Plain Horizontal Tubes: Recent Advances in Modelling of Heat Transfer to Pure Fluids and Mixtures" J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng, January-March 2005, Vol. XXVII, No.1 / 23.

Van Wachem B.G.M., Almstedt A.E. (2003) "Methods for Multiphase Computational Fluid Dynamics" Chemical Engineering Journal 96 ,(2003) ,81-98.

Vasquez S. A. ve Ivanov V. A (2000) "A Phase Coupled Method for Solving Multiphase Problems on Unstructured Meshes" Appearing in the Proceedings of ASME FEDSM'00: ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting Boston, Massachusetts, June 11-15, 2000

Versteeg H.K., Malalasekera W. (1995) "An Introduction to Computational Fluid Dynamics-Finite Volume Method", Longman Scientific&Technical, London.

Welch S. W. J. ve Wilson J. (2000) "A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change" Journal of Computational Physics 160, 662-682

White F.M., (2004) "Akışkanlar Mekaniği Dördüncü baskı" Literatür Yayıncılık, İstanbul.

Wörner M. (2003) "A Compact introduction to the Numerical Modelling of Multiphase Flows" "International Summer School on Computational Modeling of Combustion & Multiphase Flows in Energy Systems, July 21 - 25, 2003.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] \\http.www.cd-adapco.com

[2] \\http.www.fluent.com

[3] \\http.microgravity.grc.nasa.gov

[4] \\http.philon.cheng.auth.gr\site\docs

[5] \\http.www.wlv.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 19.08.1981

Doğum yeri Ankara

Lise 1995 – 1996 Ordu Fen Lisesi
1996 – 1998 Giresun Lisesi

Lisans 1999–2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

2004 – 2005 Emo Yangın ve Güvenlik Sistemleri
2006 Arup Mühendislik ve Müşavirlik