

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

**BORU HATLARINDA TOZ KÖMÜR PNÖMATİK
TAŞINIMININ MODELLENMESİ**

CEYDA TURASAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MALATYA
Ocak 2006**

Fen Bilimleri Enstitüsü müdürlüğü' ne,

Bu çalışma Jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

(İmza)

Prof.Dr. Kadim CEYLAN
Başkan

(İmza)

Y.Doç. Dr. Ayşe SARİMEŞELİ
Üye

(İmza)

Y. Doç. Dr. A. Muttalip ŞAHİN
Üye

Onay

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../.....

(İmza)
Prof. Dr. Ali ŞAHİN
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORU HATLARINDA TOZ KÖMÜR PNÖMATİK TAŞINIMININ MODELLENMESİ

Ceyda Turasay

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

67+xi sayfa

2006

Danışman: Y. Doç. Dr. Ayşe Sarımeşeli

Pnömatik taşınım, gaz akımı kullanılarak bir boru hattında katı maddelerin taşınması yöntemidir. Günümüze kadar pnömatik taşınımın kullanım alanları gitgide artmıştır ve pnömatik taşınım kimyasal, farmasetik, gıda, mineral işlenmesi, çelik, plastik, kauçuk ve elektrik güç üretimi endüstrilerini kapsayan çok geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Bu çalışmanın esas amacı boru hatlarında toz kömürün pnömatik taşınımı ve termik santrallerde kullanılan bifurkatörler için bilgisayar destekli bir modelleme yapmak, bifurkatörün kolları arasında homojen ayrılmayı sağlayacak için bir eleman tasarlamaktır.

Sunulan çalışmanın ilk aşamasında FLUENT ve önışlemcisi GAMBIT kullanılmıştır. Boru hattının katı modeli GAMBIT'te çizilerek meshlerine ayrılmıştır. Bundan sonra model FLUENT çözücüsüne alınmış ve sınır koşulları verilmiştir. Nümerik çalışmalarda yoğunluk olarak 1500, 700 kg/m³ ve her bir yoğunluk için 1, 10, 30, 53, 75, 106, 150 µm parçacık çapına sahip parçacıklar kullanılmıştır. Nümerik çalışmaların sonuçları boru hattında herhangi bir eleman olmaksızın, optimum parçacık boyutunun 30 µm ve optimum besleme açısının 90° olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte bifurkatörde homojen ayrılma için bir eleman tasarlanmış ve her bir parçacık çapı ve yoğunluğu için homojen dağılımı sağlayabilecek inversör vana konumu hesaplanmıştır.

İkinci aşamada deneyler, -150+106, -106+75, -75+53, -53µm parçacık çap aralığı, 1150 kg/m³ yoğunluğa sahip kömür parçacıkları ve aynı parçacık çapı aralığındaki 700 kg/m³ yoğunluğa sahip kül parçacıkları ile yapılmıştır.

Bir dizi denemenin ardından, bifurkatörde homojen ayrılmayı sağlamak için "inversör vana" olarak adlandırılan uygun bir parça bulunmuştur. Her bir parçacık çap ve yoğunluk değeri için yapılmış olan deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçlarından, önerilen parçanın neredeyse çalışmada kullanılan tüm parçacık yoğunluk ve çapları için homojen ayrılmayı sağladığı kesinlikle görülebilir.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik Taşınım; Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(CFD); Türbülans Modelleri; Gaz-Katı Sistemleri

ABSTRACT

Master Thesis

MODELLING OF PULVERIZED COAL PNEUMATIC CONVEYING IN PIPE SYSTEMS

Ceyda Turasay

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering
67+xi pages

2006

Supervisor: Y. Doç. Dr. Ayşe Sarımeseli

Pneumatic conveying is a method of transportation of bulk products in a pipeline using a gas stream. Application fields of pneumatic conveying increased gradually until today and pneumatic conveying have a wide range of application fields that include chemical, pharmaceutical, food, mineral processing, steel, plastic, rubber and power generation industries.

The main objective of this study was to make a computer aided modelling of the transport of pulverised coal and the bifurcators used in pipelines, such as in power generation industry, AND to suggest a new design or a piece of equipment to be able to obtain for homogeneous distribution of the particles between the arm of the bifurcator.

In the first stage of the presented work, FLUENT and its preprocessor GAMBIT was used. The solid model of the pipeline system was drawn in GAMBIT and was divided into meshes. Then, it was transported to FLUENT and the boundary conditions were defined. In the numerical studies, the particle density range of were 1500, 700 kg/m³ and a particle size range of 1, 10, 30, 53, 75, 106, 150 microns. The results showed that the optimum particle size was 30 microns and angle of feed was 90 degrees without introducing any suggested element to the pipeline. However, a new element was designed and obtained position of inverter valve to be able to homogeneous distribution for each particle diameter and density

In the second part of the present study, the experiments were performed with coal particles that have diameters of -150+106, -106+75, -75+53, -53 microns and a density of 1150 kg/m³. Also the ash particles with same particle diameter range as the pulverised coal that have a density of 700 kg/m³ were used.

After a series of trials, a convenient piece that can be called 'inverter valve' was found suitable for the homogeneous distribution of the powdered material in bifurcator. From the results of both the experimental and numerical studies carried out at each particle diameter and density values, it can be clearly seen that the suggested piece, supplied a homogeneous distribution at almost of all particle density and size ranges used in the study.

Anahtar Kelimeler: Pneumatic Conveying; Computational Fluid Dynamics(CFD); Turbulence Models; Gas-Solid Systems.

TEŞEKKÜR

Tez konumun seilmesinde, deneysel alıŐmalarım için gerekli imkânın sağlanmasında ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında büyük yardımını grdğim tez yöneticisi değerli hocam Y. Doç. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ' ye;

Tez çalıŐmalarımda yardım ve bilgilerinden yararlandığım Kimya Mühendisliği Bölüm BaŐkanı sayın Prof. Dr. Kadim CEYLAN' a;

Bu alıŐma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından İBAP–52 nolu proje ile desteklenmiŐtir. Sağlanan maddi destekten dolayı İnönü Üniversitesi Rektörlüğü'ne;

Tezim ile ilgili her aşamada bana yardımını esirgemeyen, destekleri ile her zaman yanımda olan aileme özellikle kardeŐim Lütfiye TURASAY' a;

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	iii
	ABSTRACT.....	iv
	TEŞEKKÜR.....	v
	İÇİNDEKİLER.....	vi
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
	TABLolar DİZİNİ.....	ix
	SİMGELEr VE KISALTMALAR.....	x
1.	GİRİŞ.....	1
2.	KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1.	Akışkan ve Akışkanlar Mekaniği.....	5
2.2.	Akışkanların Akımını Tanımlayan Denklemler.....	6
2.2.1.	Üç Boyutta Kütleinin Korunumu.....	6
2.2.2.	Üç Boyutta Momentum Denklemi.....	6
2.2.3.	Üç Boyutta Enerji Denklemi.....	8
2.3.	Akışkan Akımı.....	8
2.3.1.	Türbülansın Doğası.....	11
2.3.2.	Boruda Akış İçin Logaritmik Hız Profili Yasası.....	12
2.4.	Türbülans Modelleri.....	14
2.4.1.	Sıfır Denklemli Modeller - Karışım Mesafesi Modeli.....	15
2.4.2.	İki Denklemli Modeller - k-ε Modeli.....	16
2.4.3.	Reynolds Gerilim Denklemi Modeli.....	20
2.4.4.	Cebirsel Gerilim Denklemi Modelleri.....	22
2.5.	Çok Fazlı Akışlar.....	23
2.5.1.	Gaz-Katı Akışları ve Pnömatik Taşınım.....	23
2.6.	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Hakkında Genel Bilgiler.....	25
2.6.1.	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)	25
2.6.2.	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (CFD) Tarihçesi.....	26
2.6.3.	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (CFD) Kullanım Alanları.....	28
2.6.4.	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Kodlarının Çalışma Prosedürü.....	28
2.7.	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizinde Temel Adımlar.....	29
2.7.1.	Model Amaçlarının Tanımlanması.....	30
2.7.2.	Modellenecek Domainin Tanımlanması.....	30
2.7.3.	Grid Dizaynı ve Oluşturulması.....	30
2.7.4.	Nümerik Modelin Seçilmesi.....	32
2.7.5.	Çözümün Hesaplanması.....	33
2.7.6.	Sonuçların Tartışılması.....	34
2.7.7.	Modele Revizyon Yapılması.....	34
2.8.	Fluent Nedir?	34
2.8.1.	Diskretizasyon Nedir?	35
2.8.2.	Fluent'te Çok Fazlı Akımlar İçin Modelleme Yaklaşımları.....	37
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1.	Kömür ve Kül numunesinin Temini ve Hazırlanması.....	39
3.2.	CFD Çözücüsünün Temini.....	39
3.3.	Deneyde Kullanılan Düzenek.....	39
3.4.	GAMBIT 'te Katı Modelin Oluşturulması.....	42

3.5.	FLUENT'te Çözüm İşlemlerinin Gerçekleştirilmesi.....	45
3.6.	Deneysel Çalışma.....	47
3.6.1.	Sisteme Eklenen İversör Vana İle İlgili Deneyle.....	47
3.6.2.	Modelleme Sonucunda Bulunan Sonuçların Kontrolü İçin Yapılan Deneyle.....	48
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	49
4.1.	Modelleme ve Parametre Çalışmaları.....	49
4.1.1.	Parçacık Çapı.....	49
4.1.2.	Parçacık Yoğunluğu.....	52
4.1.3.	Parçacık Besleme Açısı.....	55
4.1.4.	Sisteme Eklenen İversör Vana.....	56
4.2.	Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi.....	59
4.2.1.	Parçacık Çapı.....	59
4.2.2.	Parçacık Yoğunluğu.....	59
4.2.3.	Sisteme Eklenen İversör Vana.....	60
4.3.	Modelleme ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	62
4.3.1.	Parçacık Çapı Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	62
4.3.2.	Parçacık Yoğunluğu Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	62
4.3.3.	Sisteme Eklenen İversör Vana Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	63
5.	SONUÇLAR.....	64
6.	KAYNAKLAR.....	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Türbülent akışın görüntülenmesi.....	9
Şekil 2.2.	Akım içerisine verilen bir jetin görüntülenmesi.....	9
Şekil 2.3.	Türbülent akım içindeki bölgeler.....	10
Şekil 2.4.	Anlık hızdaki dalgalanmalar.....	11
Şekil 2.5.	Türbülent akım içinde edilerin hareketi.....	15
Şekil 2.6.	Yatay gaz-katı akımı için akış modelleri.....	25
Şekil 2.7.	Grid oluşturulurken kullanılan topolojiler.....	31
Şekil 2.8.	Konuşan ve konuşmayan meshler.....	32
Şekil 2.9.	İterasyon izleme monitörü.....	33
Şekil 2.10.	Grid noktaları.....	36
Şekil 3.1.	Deneyde kullanılan düzenek.....	40
Şekil 3.2.	Sisteme eklenen inversör vananın şekli.....	41
Şekil 3.3.	GAMBIT'e aktarılmış sistem geometrisi.....	42
Şekil 3.4.	Mesh atılmış sistem geometrisi.....	43
Şekil 3.5.	Konuşan meshler.....	44
Şekil 3.6.	Dirsek ve düz borularda mesh yapısı.....	44
Şekil 3.7.	Sınır koşulları belirlenmiş sistem geometrisinin son hali.....	45
Şekil 3.8.	Gridin görüntülenmesi.....	46
Şekil 4.1.	Dirsekten sonra yapılan besleme için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi.....	51
Şekil 4.2.	Dirsekten önce yapılan besleme için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi.....	52
Şekil 4.3.	700 kg/m ³ yoğunluk değeri için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi.....	54
Şekil 4.4.	1150kg/m ³ yoğunluk değeri için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi.....	54
Şekil 4.5.	Sisteme Eklenen İversör Vananın Boru içerisindeki Açısal Durumu...	57
Şekil 4.6.	Uçucu kül ile yapılan model ve deney çalışmaları ile bulunan inversör vana kapanma açılarının kıyaslanması.....	63
Şekil 4.7.	Toz kömür ile yapılan model ve deney çalışmaları ile bulunan inversör vana kapanma açılarının kıyaslanması.....	63

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1.	Diskretizasyon Teknikleri.....	37
Tablo 4.1.	Modellemede Kullanılan Veriler.....	49
Tablo 4.2.	Parçacık Büyüklüğüne Bağlı Dağılım İçin Modellemede Elde Edilen Sonuçlar.....	50
Tablo 4.3.	Dirsek Besleme Açısı ve Şekli ile İlgili Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar.....	51
Tablo 4.4.	Parçacık Yoğunluğuna Bağlı Dağılım İçin Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (100 adet parçacık için)	53
Tablo 4.5.	Parçacık Yoğunluğuna Bağlı Dağılım İçin Modellemede Elde Edilen Sonuçların Kollar Arası Yüzde Fark Cinsinden Değeri (100 adet parçacık için).....	53
Tablo 4.6.	Çeşitli Tanecik Boyutundaki Kül Numunesi İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 700 kg/m^3)	55
Tablo 4.7.	Çeşitli Tanecik Boyutundaki Toz Kömür Numunesi İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 1150 kg/m^3).....	56
Tablo 4.8.	Uçucu Kül İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (90° besleme için).....	57
Tablo 4.9.	Toz Kömür İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar(90° besleme için).....	58
Tablo 4.10.	Parçacık Büyüklüğüne Bağlı Dağılım İçin Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar ve Yüzde Cinsinden Değerleri.....	59
Tablo 4.11.	Parçacık Yoğunluğu İçin Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar.....	60
Tablo 4.12.	Parçacık Yoğunluğu İçin Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçların Yüzde Cinsinden Değeri.....	60
Tablo 4.13.	Sisteme Eklenen İversör Vana İçin Uçucu Kül ile Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 700 kg/m^3 , besleme açısı 90°).....	61
Tablo 4.14.	Sisteme Eklenen İversör Vana İçin Toz Kömür ile Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 1150 kg/m^3 , besleme açısı 90°).....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

a	İvme, (m ² /s)
C _μ , σ _k , σ _ε , C _{1ε} ve C _{2ε}	Standart k-ε model sabitleri
C ₁ , C ₂	Basınc- gerilim terimi için sabitler
C _D , C ₁	Cebirsel gerilim model sabitleri
ε	Dissipasyon hızı, (m ² /s ³)
D _{xy}	Difüzyon terimi
$\overline{e_{11}}$, $\overline{e_{12}}$, $\overline{e_{13}}$, $\overline{e_{22}}$, $\overline{e_{23}}$, $\overline{e_{33}}$	Anlık deformasyon hızı matris elemanlarının zamana göre ortalamaları, (m/s)
$\overline{e_{xy}}$	Anlık deformasyon hızının zamana göre ortalaması, (m/s)
E	Akışkanın spesifik enerjisi
E	Duvar pürüzlülük parametresi
E _{xy}	Ortalama deformasyon hızı, (m/s)
F	Kuvvet, (kg/ m.s)
f _μ , f ₁ , f ₂	Türbülans Reynolds sayısı fonksiyonları
g	Yerçekimi ivmesi, (m ² /s)
g _c	Newton çevirme faktörü, (kg.m / N.s ²)
g _x	Yerçekimi ivmesinin x-bileşeni, (m ² /s)
g _y	Yerçekimi ivmesinin y-bileşeni, (m ² /s)
g _z	Yerçekimi ivmesinin z-bileşeni, (m ² /s)
g _φ	Yerçekimi ivmesinin φ bileşeni, (m ² /s)
k	Türbülent kinetik enerji,
k	Boltzman sabiti
K	Ortalama kinetik enerji,
f	Prandtl karışım mesafesi, (m)
f	0.07L
L	Ekipmana ait karakteristik uzunluk, (m)
m	Kütle, (kg)
P	Basınc, (Pa)
P _{xy}	Üretim terimi
Re _t	Türbülans Reynolds sayısı
Re _γ	k ^(1/2) y/ v ile tanımlanan Reynolds sayısı
R _{xy}	Reynolds stress terimi
S _E	Enerji kaynak terimi
t	Zaman, (s)
t ₀	Belirli bir zaman dilimi, (s)
T	Sıcaklık, (C)
T _i	Türbülans yoğunluğu
V	Hız, (m/ s)
V _x	Hızın x- bileşeni, (m/ s)
V _y	Hızın y- bileşeni, (m/ s)
V _z	Hızın z- bileşeni, (m/ s)
V _x	x- yönünde sapma hızı, (m/ s)

V_y'	y- yönünde sapma hızı, (m/ s)
V_z'	z- yönünde sapma hızı, (m/ s)
$\overline{V_x}$	Hızın x- bileşeninin zamana göre ortalaması, (m/ s)
$\overline{V_y}$	Hızın y- bileşeninin zamana göre ortalaması, (m/ s)
$\overline{V_z}$	Hızın z- bileşeninin zamana göre ortalaması, (m/ s)
$\overline{V_x'}$	x- yönünde sapma hızının zamana göre ortalaması, (m/ s)
$\overline{V_y'}$	y- yönünde sapma hızının zamana göre ortalaması, (m/ s)
$\overline{V_z'}$	z- yönünde sapma hızının zamana göre ortalaması, (m/ s)
V^*	Sürtünme hızı, (m/ s)
V^+	Boyutsuz hız
$\langle \overline{V} \rangle$	Hızın zamana göre ortalaması, (m/ s)
V_{ref}	Referans hız, (m/s)
x	x- yönündeki uzaklık, (m); x bileşeni
y	y- yönündeki uzaklık, (m); y bileşeni
y^+	Boyutsuz uzunluk
z	z-yönündeki uzaklık, (m); z bileşeni
β	Nozzle katsayısı
ΔS	Entropinin değişimi, (joule)
Δx	x-yönünde iki nokta arası uzaklık, (m)
Δy	y-yönünde iki nokta arası uzaklık, (m)
ε_{xy}	Dissipasyon hızı terimi
κ	Von Karman sabiti
μ	Viskozite, (kg/ m.s)
ρ	Yoğunluk, kg/ m ³
I	Türbülans şiddeti
ϕ	Ortalama ϕ
φ	Akıma ait skaler bir nicelik
$\overline{\varphi}$	φ nin zamana göre ortalaması
ν	Kinematik viskozite, (m ² /s)
τ_{xx}	Kayma gerilmesi tensörünün xx bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{xy}	Kayma gerilmesi tensörünün xy bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{xz}	Kayma gerilmesi tensörünün xz bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{yx}	Kayma gerilmesi tensörünün yx bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{yy}	Kayma gerilmesi tensörünün yy bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{yz}	Kayma gerilmesi tensörünün yz bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{zx}	Kayma gerilmesi tensörünün zx bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{zy}	Kayma gerilmesi tensörünün zy bileşeni, (kg/ m.s ²)
τ_{zz}	Kayma gerilmesi tensörünün zz bileşeni, (kg/ m.s ²)
$\underline{\underline{\tau}}$	Kayma gerilmesi tensörü, (kg/ m.s ²)
τ_ω	Duvar kayma gerilmesi, (kg/ m.s ²)
Ω_{xy}	Döngü terimi
δ_{xy}	Kronocker deltası
ω_k	Döngü vektörü
Π_{xy}	Basınç – gerilim terimi

1. GİRİŞ

Duvar sınırlı olarak tanımlanan sistemlerde gaz-katı akışı teknik ve endüstriyel süreçlerde sık sık karşımıza çıkmaktadır. Bu süreçlerin başında pnömatik taşınım gelmektedir. Pnömatik taşınım, gaz akımı kullanılarak bir boru hattında yığın ürünlerin taşınması yöntemidir. Pnömatik taşınım katı besleme hızı ve taşınım hızına bağlı olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: seyreltik faz ve yoğun faz pnömatik taşınım. Seyreltik fazda katı parçacıklar gaz akımı içerisinde tamamen asılı bir halde hareket ederler. Yoğun faz taşınım ise parçacıkların akım içerisinde tam olarak asılı halde olmadığı ve parçacık hareketlerinde parçacık-parçacık çarpışmalarının baskın olduğu taşınım türüdür. Yığın katı materyaller endüstriyel ölçekte yirminci yüzyılın başlarından beri pnömatik olarak taşınmaktadır. Bu yöntem kimya, farmasetik, mineral üretimi, çelik, plastik, kauçuk, gıda işleme ve çimento endüstrisi ile termik santrallerde toz kömürün taşınması da dâhil geniş bir kullanım alanına sahiptir. Böylesi geniş bir uygulama alanı, katıların pnömatik taşınımı üzerine yaygın şekilde araştırmalar yapılmasına yol açmıştır.

Boru hatlarında toz kömür pnömatik taşınımı elektrik üreten termik santrallerde kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde kömür yakma ünitelerine gönderilmeden önce pnömatik taşınmayı sağlamak ve yanma verimini arttırmak amacı ile kömür belli bir parçacık boyutuna indirgenir. Bu işlem öğütücülerde yapılır. Öğütülmüş kömür belli bir hava/yakıt oranı ayarlanarak basınçlı hava yardımı ile boru şebekesine beslenir ve bu şebeke ile yakıcılara taşınır. Boru şebekesi yakıcılara ulaştığında çoklu kollara ayrılır (sayısına göre bifurcator, trifurcator, quadrafurcator gibi). Yakıcılarda yanma işlemi gerçekleşerek elde edilen ısı ile buhar elde edilir ve türbinler vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilir.

Toz kömür pnömatik taşınım sistemlerinin çalışması esnasında bazı problemlerle de karşılaşılmaktadır. Bu tür sistemlerde en çok görülen problemler: eğim ve kollarda oluşan, boru kesit alanında homojen olmayan parçacık konsantrasyon dağılımı; boru ve ek parçalarda korozyonlar, borularda parçacık birikmeleri, akımda oluşan ayrılmalardır. Bu durum ayarlanmış olan hava/yakıt oranından sapmalara neden olur. Bunun sonucu olarak da eksik yanma ve azotun yanması ile ortaya çıkan CO ve NO_x gazlarının atmosferdeki emisyonlarının artması, külde yanmamış C kalması sorunları ile

karşılaşılır [23]. Atmosfere verilen CO ve NO_x gazları havada yağmur ile birleşerek asit yağmurlarını oluşturur. Bu da su, hava ve toprak kirliliğini artırır. Ek olarak kaybedilen ısı ve yakıttan, kullanılan boru ve ek parçalarının aşınmasından doğan maliyetler de olumsuz etkenlerdir. Tüm bu etkenler bu sistemlerin kontrol altına alınmasının gerekliliğini göstermektedir.

Pnömatik taşınım sistemlerindeki problemlerin ortadan kaldırılması için birçok çalışmalar yapılmış olup günümüzde en yaygın çalışma yöntemi akım hattının veya düzeltilmesi istenen sistem parçasının bilgisayarda modellenmesidir. Bu amaçla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemleri kullanılmaktadır [5, 6, 12, 16, 17]. Tasarımı zor olan problemlerin çözümünde, zaman ve masrafların azaltılmasında, problemin mümkün olabilecek çözümlerinin tahmininde CFD yöntemleri büyük yararlar sağlar. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kodları, geometrisi bilgisayara girilmiş ve belli özelliklere göre "mesh" lere ayrılmış olan problemin sınır şartları girilerek çözümünün yapılmasını sağlar. Bunu meshlerin her bir düğüm noktası için süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini çözerek ve sonuçları grafikler, sıcaklık-basınç-hız vektör ve kontürleri olarak ekrana vererek yapar.

Levy ve Mason tarafından, üç düz boru ve iki dirsekten oluşan bir sistem için üç boyutlu gaz – parçacık akışının simülasyonu yapılmıştır. Pnömatik taşınım sistemlerinde segregasyon ve çapraz kesitte parçacık konsantrasyonu üzerine dirseğin etkisi araştırılmıştır. Nümerik çalışmalar boru çapının dirsek çap oranının, farklı katı özelliklerinin ve yerçekimi doğrultusunun akış üzerine etkileri incelenerek yapılmıştır. Dirseğin varlığının boru duvarı iç çevresinde dirsekten sonra parçacıkların yoğunlaşmasına sebep olduğu bulunmuştur [16].

Yılmaz ve Levy tarafından, pnömatik taşınım sistemlerindeki birikimlerin hidrodinamiğini incelemek için yapılan deneylerde deneysel bir pnömatik taşınım sistemi kurulmuştur. Sonuç olarak da birikimlerin dirsek ve akımdaki türbülans ile ortaya çıkan ikincil akışlar nedeniyle dağıldığı, bu birikimlerin ilk olarak dış duvarlara doğru hareket ettiği ve ikincil akımlar ile borunun orta kesitinde oluşmaya başladığı bulunmuştur [24].

Bilirgen et al. tarafından, önceden yapılan bazı deneysel çalışmalara ait deneysel veriler kullanılarak, bunların CFD modellemeleri yapılmıştır. Sonuç olarak ticari Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kodlarının pnömatik taşınım sistemlerinin geliştirilmesi için etkin bir şekilde kullanılabileceği bulunmuştur [6].

Yılmaz ve Levy tarafından, deneysel olarak kurulan pnömatik taşınım sistemi kullanılarak 90° dirseği takip eden hat üzerinde parçacık birikimlerine ait dinamikler incelenmiştir. Sonuçlar birikimlere ait akımların stabil olmadığını, akım koşullarıyla değiştiğini göstermiştir [25].

Yılmaz ve Levy tarafından, deneysel olarak kurulan pnömatik taşınım sistemi kullanılarak bu birikimlerin oluşumları ve dağılımları incelenmiştir. Deneysel çalışmanın yanında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri de kullanılarak parçacık birikmelerinin oluşum ve dağılımlarının kuvvetli bir şekilde boru eğimlerinin çapına ve daha az derecede de taşıyıcı havanın hızı ve katı beslemesine bağlı olduğu bulunmuştur [26].

Akilli et al. tarafından, yine aynı deneysel pnömatik taşınım sistemi kullanılarak dikeyden yataya bir 90° dirsekten sonraki yatay bir boruda gaz–katı akımının davranışı incelenmiştir. Çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemleri de kullanılmıştır. Boruda oluşan birikimlere ait dağılım karakteristikleri, yüksek taşıyıcı hava hızları için tam gelişmiş seyreltik gaz–parçacık akışını kapsayarak detaylı olarak çalışılmıştır [1].

Bilirgen ve Levy tarafından, deneysel olarak kurulan pnömatik taşınım sistemi kullanılarak oluşan birikimleri dağıtmak için nozzle, yandan jet enjeksiyonu (iç ve dış duvardan), küresel vana ve akım düzeltici gibi aygıtlar kullanılmıştır. Akım düzelticinin varlığında iç duvara doğru radyal doğrultuda önemli bir parçacık birikimi gözlenmemiştir. Diğer yöntemlerde ise, $\beta = 0.83$ olan nozzle hariç diğer tüm karıştırma teknikleri parçacık birikimlerini dirsek çıkış düzleminden dokuz boru çapı ilerisinde dağıtabilmişlerdir. Bununla beraber pratik uygulamalar için bu dizaynların bazı dezavantajları vardır (yüksek basınç düşüşleri gibi). Deneysel çalışmalarla paralel olarak yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) tahminleri fiber optik proba yapılan ölçümlerle çok iyi bir uyum sağlamıştır [5].

Levy et al. tarafından, deneysel olarak kurulan pnömatik taşınım sistemi kullanılarak iki, üç ve dört kollu akım ayırıcılara ait akış karakteristikleri incelenmiştir. Her bir ayırıcı için akım dengeleme testleri yapılmış ve sonuçları verilmiştir [17].

Konu ile ilgili pek çok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ancak çalışmaların geneli borularda ve boru elemanlarında (dirsek, eğim, vb.) pnömatik taşınım işleminde ortaya çıkan birikim problemlerinin aydınlatılması ve giderilmesi ile ilgilidir. İki, üç ve dört kollu akım ayırıcılar ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda ise akımın etkin bir şekilde ayrılmasını sağlayacak bir dizayn geliştirmeye veya sorunu gidermeye yönelik

bir çalışma yapılmış ancak net bir sonuç alınamamıştır. Bu durum akım ayırıcılar ile ilgili "tam bir ayırma nasıl sağlanabilir?" sorusuna bir cevap verilmesi gerekliliğini beraberinde getirmektedir. Günümüzde çevre kirliliği hususunda artan hassasiyet dolayısıyla bu konunun önemi de artmaktadır.

Burada sunulan çalışmada, herhangi bir termik santralde kullanılan bir bifurcatörün bulunduğu sistem bilgisayarda modellenmiştir. Modelleme için Fluent adlı CFD kodunun 6.1 versiyonu kullanılmıştır. Modellenen geometri tüm sistemi temsil edecek bir parça olacak şekilde seçilmiştir. Modelleme esnasında hesaplamalardaki güçlüklerin ortadan kaldırılması ve işlemlerin basitleştirilmesi için parçacıklar arası etkileşimlerin olmadığı, boru cidarlarının pürüzsüz olduğu varsayımı yapılmasının gerekliliği görülmüştür. Bununla birlikte yerçekimi etkisinin varlığı hesaba katılmıştır. Sırasıyla; parçacık çapı ve hızı, sistemin etkinliği üzerinde olumsuz etki yapabilecek kritik parçacık çapı, parçacık besleme noktası, parçacık yoğunluğunun sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak da bifurkatörde kollar arası eşit bir ayırmayı sağlayacak bir dizayn geliştirilmiştir. Bu dizaynın kullanımı ile ilgili deneyler yapılmış ve deney sonuçları modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sisteme dahil edilen inversör vananın etkin bir ayırma sağladığı, değişik parçacık boyutları için optimum inversör vana açısının ne olduğu bulunmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Akışkan ve Akışkanlar Mekaniği

Çok küçük olsa bile bir kayma kuvvetine sürekli olarak direnç gösteremeyen maddelere "akışkan" denir. Bir kayma kuvvetinin etkisinde kaldıklarında, akışkanlar hareket etmeye başlarlar ve kayma kuvveti etki ettiği sürece akışkanların hareketi de devam eder.

Akışkanlar birbiri üzerinde kayan tabakalar halindedirler. Viskozite nedeniyle akışkan içinde katmanlar arasında aktarılan, x-yönlü momentumun y-yönündeki değişimine "kayma gerilimi" denir.

$$\tau_{xy}g_c = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho V_x)}{dy} \quad (2.1)$$

Akışkanlar mekaniğinde dört temel prensip vardır:

1. Kütle korunumu prensibi.
2. Termodinamiğin I. Yasası (enerjinin korunumu).
3. Termodinamiğin II. Yasası ($\Delta S \geq 0$).
4. Newton'un hareket yasası ($F = (1/g_c) ma$).

Bazı basit uygulamalarda, sadece bu dört temel prensibi ve akışkanın özelliklerini kullanarak, matematiksel – analitik çözüm ile akışkanın hareketi, akışkanın hızı, etki eden kuvvetler gibi hususlar hakkında bilgi edinmek mümkündür. Ancak çoğu uygulamalarda problemler daha karmaşık olduklarından, bu prensiplere ilave olarak deneysel bulgulardan da yararlanmak gerekebilir. Ayrıca kompleks problemlerin çözümünde günümüzde artık bilgisayarlardan da yararlanılmaktadır. Akış problemlerinin teorik modellenmesi yapıldıktan sonra, sayısal teknikler kullanılarak bilgisayarlarla çözüm elde etmek ve akış hakkında her türlü bilgiyi hesaplamak mümkün olmaktadır [21].

2.2. Akışkanların Akımını Tanımlayan Denklemler

Akışkan akımının tanımlayıcı denklemleri, fiziğin korunum yasalarının matematiksel durumda temsil edilmiş halidir. Burada göz önüne alınan yasalar [22]:

1. Akışkan kütlesi korunmaktadır.
2. Momentumun değişim hızı, akışkan parçacığı üzerine etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir (Newton'un II. Yasası).
3. Enerjinin değişim hızı, akışkan parçacığı üzerine yapılan işin hızı ve ısı ekleme hızının toplamına eşittir (Termodinamiğin I. Yasası)

2.2.1. Üç Boyutta Kütle Korunumu

Akışkan için kütle denklığı yazılarak kütle korunumu denklemi buradan türetilir.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Akışkan elemanında kütle} \\ \text{artış hızı} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Akışkan elemanına kütle} \\ \text{akışımın net hızı} \end{array} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (2.3)$$

(2.3) denklemi bastırılabilir bir akışkan içerisinde herhangi bir noktada, kararsız, üç boyutlu kütle korunumu veya süreklilik denklemdir [22].

2.2.2. Üç Boyutta Momentum Denklemi

Bir akışkan parçacığının momentum değişim hızını belirten Newton'un ikinci yasasına göre hız, parçacık üzerine etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Akışkan parçacığının} \\ \text{momentum değişim hızı} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Akışkan parçacığı üzerine} \\ \text{etkiyen kuvvetlerin toplamı} \end{array} \right) \quad (2.4)$$

Akışkan parçacığının birim hacim başına x-y-z momentum akış hızı

$$\frac{\rho DV_x}{Dt}, \frac{\rho DV_y}{Dt}, \frac{\rho DV_z}{Dt}$$

ile verilir. Akışkan parçacığı üzerine etki eden kuvvetleri iki tipe ayırabiliriz:

1. Yüzey kuvvetleri
 - a. Basınç kuvvetleri
 - b. Viskoz kuvvetler
2. Hacim kuvvetleri
 - a. Yerçekimi kuvveti
 - b. Santrifüj kuvveti
 - c. Elektromanyetik kuvvet

Santrifüj kuvvetleri ve elektromanyetik kuvvetlerin ihmal edildiği bir durum için, momentum denkleminin x-bileşeni:

$$\frac{\rho DV_x}{Dt} = -\frac{dP_x}{dx} + \frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} + \rho g_x \quad (2.5)$$

Momentum denkleminin y-bileşeni:

$$\frac{\rho DV_y}{Dt} = -\frac{dP_y}{dy} + \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\tau_{yy}}{dy} + \frac{d\tau_{zy}}{dz} + \rho g_y \quad (2.6)$$

Momentum denkleminin z-bileşeni:

$$\frac{\rho DV_z}{Dt} = -\frac{dP_z}{dz} + \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \frac{d\tau_{zz}}{dz} + \rho g_z \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Her üç bileşen bir arada yazılacak olursa momentum denkleği

$$\frac{\rho DV}{Dt} = -\nabla \underline{\underline{\tau}} - \nabla P + \rho g \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir [22]. Sıkıştırılmayan ve sabit μ değerli Newton yasasına uyan akışkanlar için Denklem (2.8) basitleştirilebilir ve "Navier–Stokes Denklemi" olarak bilinen aşağıdaki ifade elde edilir [21]:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \mu \nabla^2 V - \nabla P + \rho g \quad (2.9)$$

2.2.3. Üç Boyutta Enerji Denklemi

Enerji denklemi, akışkan parçacığının enerji değişim hızının parçacık üzerine yapılan işin hızı artı akışkan parçacığa ısı ekleme hızına eşit olduğu termodinamiğin birinci yasasından türetilmiştir [22].

$$\begin{array}{l} \text{Akışkan parçacığın} \quad \text{Akışkan parçacığa} \quad \text{Akışkan parçacık üzerine} \\ \text{enerjisinin artış hızı} = \text{eklenen ısıнын net hızı} + \text{yapılan işin net hızı} \end{array} \quad (2.10)$$

$$\frac{\rho DE}{Dt} = -\text{div}(\rho V) + \left(\begin{array}{l} \frac{d(V_x \tau_{xx})}{dx} + \frac{d(V_x \tau_{yx})}{dy} + \frac{d(V_x \tau_{zx})}{dz} \\ + \frac{d(V_y \tau_{xy})}{dx} + \frac{d(V_y \tau_{yy})}{dy} + \frac{d(V_y \tau_{zy})}{dz} \\ + \frac{d(V_z \tau_{xz})}{dx} + \frac{d(V_z \tau_{yz})}{dy} + \frac{d(V_z \tau_{zz})}{dz} \end{array} \right) + \text{div} k \text{grad} T + S_E \quad (2.11)$$

2.3. Akışkan Akımı

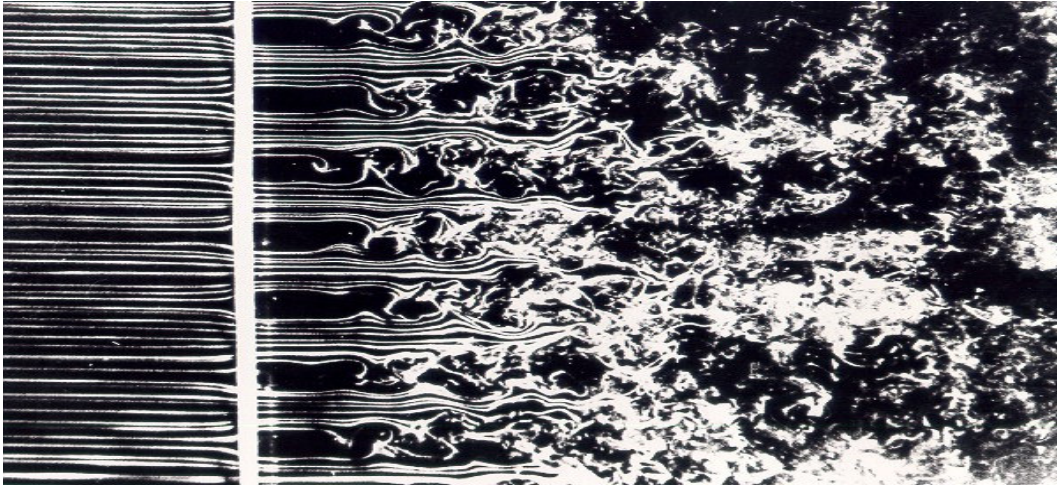
Akışkanların ve içerisinde akışkanın da bulunduğu çok fazlı sistemlerin ortamları madde alışverişine karşı yalıtılmış boru veya kanal gibi sınırlı bölgeler içindeki hareketine "akışkan akımı" denir.

Bir akışkanın içinden aktığı borunun herhangi bir kesitindeki özellikleri zamanla değişmiyorsa bu tür akıma "kararlı akım" denir. Eğer bu özellikler zamanla değişiyorsa "kararsız akım"dan söz edilir. Akışkan birbirinin üzerinden kayan tabakalar halinde girdaplar ve karışmalar olmadan ve Newton'un viskozite kanununa uygun olarak akar.

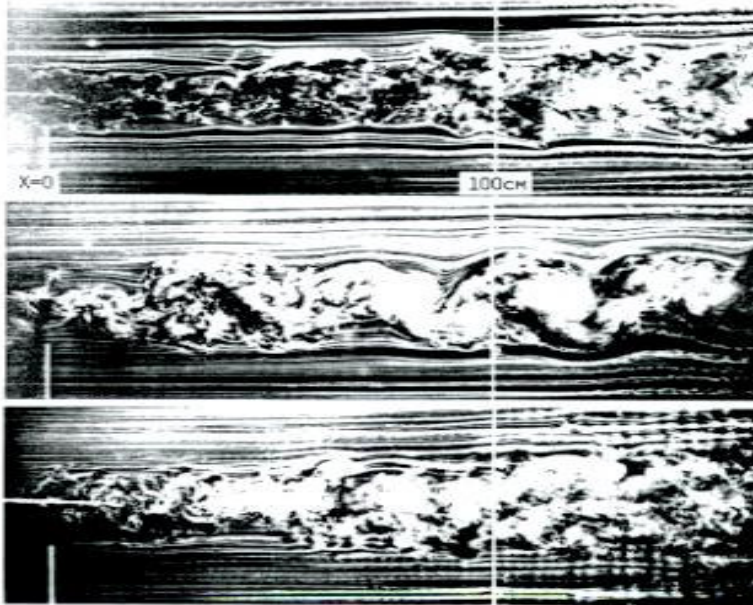
Bir akışın Reynolds sayısı, atalet kuvvetleri (konvektif etkiler ile birlikte) ve viskoz kuvvetlerin oranının bir ölçüsünü verir. Kritik Reynolds sayısının (Re_{crit}) altındaki değerlerde (akışkan sistemleri üzerine yapılan deneylerde) akışın düzgün olduğu ve komşu akışkan tabakalarının birbiri üzerinden düzgünce kaydığı

gözlemlenmiştir. Eğer sınır koşulları zamanla değişmezse akım kararlıdır. Bu rejim "laminer akış" olarak adlandırılır.

Reynolds sayısının Re_{crit} 'in üzerindeki değerlerinde, akış karakterinin köklü bir şekilde değişimine yol açan bir dizi karmaşık olay ortaya çıkar. Sonuçta ise akımın davranışı gelişigüzel ve karmaşık bir şekilde değişir. Bu rejim "türbülent akış" olarak adlandırılır [22]. Bu durum türbülent şartlarda akışkan içinde ediler, küçük akışkan paketçiklerinin oluşması ile açıklanabilir. Edilerin karakteristik özellikleri ise her yöne hareket edebilme kabiliyetleri, ve hareketlerinin hızlı ve gelişigüzel olmasıdır. Akış rejiminin türbülent olmasını sağlayan, edilerin bu hareketidir.

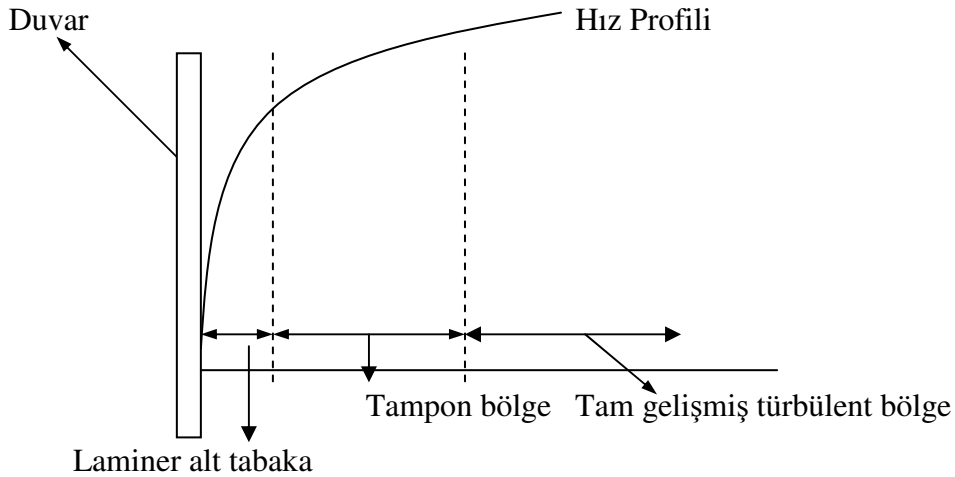


Şekil 2.1. Türbülent akışın görüntülenmesi [9]



Şekil 2.2. Akım içerisine verilen bir jetin görüntülenmesi [9]

Duvar sınırlı olarak tanımlanan akışlarda duvarın varlığı edilerin hareketini de kısıtlayacaktır. Bunun sonucu olarak da edilerin hareketinin duvara dik yönde pozisyonundan etkileneceği açıktır.



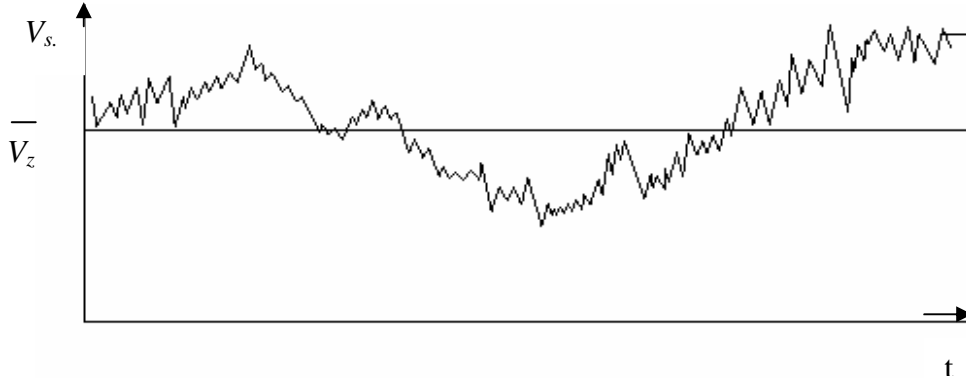
Şekil 2.3. Türbülent akım içindeki bölgeler [21]

Şekil 2.3.'de gösterilen boru içinde akışta olduğu gibi duvara yakın bir bölge incelendiğinde duvardan uzakta yığın akış içinde edilerin hareketinin tamamen rastgele olduğu söylenebilir. Duvara yaklaşıldıkça edilerin radyal yöndeki hareketleri sınırlanacak ve radyal yöndeki dalgalanma eksenel yöndeki dalgalanmalardan daha küçük olacaktır. Duvara yaklaşıldıkça, bu dalgalanmalar giderek küçülecek ve sonunda duvara ulaşıldıkında, tamamen yok olacaktır. Türbülans akım içerisinde bu doğrultuda  bölgenin varlığı kabul edilir. Bunlardan birincisi, duvara hemen bitişik ince bir film gibi düşünülen laminer alt tabakadır. Burada hiç edi olmadıkı kabul edilir. İkinici olarak, bir tampon bölge (geçiş bölgesi) vardır. Bu bölgede hem laminer hem de türbülent etkiler önemlidir. Sayıca az da olsa bu bölgede ediler vardır. Daha sonra yığın akış içinde tam gelişmiş türbülent bölge vardır. Burada artık türbülent etkiler baskındır. Edilerin hareketi tamamen serbest, her yöne ve rastgeledir [21].

2.3.1. Türbülansın Doğası

Tam gelişmiş bir türbülent akım içinde belirli bir noktada bir t_0 süresi boyunca anlık lokal hız (V_z) ölçümleri yapılırsa, hızın bir ortalama değer etrafında dalgalandığı görülür (Şekil 2.4.). Zamana göre ortalaması alınan lokal hız şu şekilde ifade edilebilir;

$$\overline{V_z} = \left(\frac{1}{t_0} \right) \int_t^{t+t_0} V_z dt \quad (2.12)$$



Şekil 2.4. Anlık hızdaki dalgalanmalar [21].

Anlık hızdaki dalgalanmaların nedeni edilerin hareketidir. Edilerin hareketinden dolayı olan sapma hızı V_z' ile gösterilirse, anlık hız için;

$$V_z = \overline{V_z} + V_z' \quad (2.13)$$

yazılabilir. Dikkat edileceği gibi, lokal sapma hızları pozitif ve negatif değerler alabileceğinden bunların zamana göre ortalaması sıfır olmalıdır.

$$\overline{V_z'} = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} V_z' dt = 0 \quad (2.14)$$

Fakat sapma hızlarının karesinin ortalaması sıfırdan farklı olacaktır.

$$\overline{V_z'^2} \neq 0 \quad (2.15)$$

Bundan yararlanılarak, türbülansın derecesini belirlemek için kullanılacak türbülans şiddeti tanımlanabilir;

$$I = \frac{\sqrt{\overline{V_z'^2}}}{\langle V_z \rangle} \quad (2.16)$$

Boru içinde akış için türbülans şiddeti %1–10 arasındadır. Denklem (2.16) tek yönlü akışlar için yazılmıştır. Üç yönü de dikkate alan daha genel bir türbülans şiddeti ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{V_x'^2} + \overline{V_y'^2} + \overline{V_z'^2})}}{\langle V \rangle} \quad (2.17)$$

Bir türbülent akım içinde türbülans şiddeti her yönde aynı ise türbülansın "isotropic" olduğu söylenir. İsootropic türbülans sadece akım içinde hız gradyanı olmadığı zaman görülür. Türbülans şiddeti her yönde farklı ise bu "anisotropic" türbülanstır.

Edilerin serbest hareketinden kaynaklanan ve hız için açıklanan bu durum diğer akış özellikleri için de geçerlidir, örneğin basınç, sıcaklık, konsantrasyon vb [21].

2.3.2. Boruda Akış İçin Logaritmik Hız Profili Yasası

Şekil 2.3. ve bununla ilgili olarak verilen açıklamalar hatırlanırsa, boru içinde akış için de üç bölgenin, yani duvara bitişik bölgede laminer alt tabakanın, geçiş bölgesinin ve tam gelişmiş türbülent bölgenin varlığı dikkate alınarak ve bu bölgeler tek tek incelenerek, türbülent akış için hız ifadeleri çıkartılabilir [21].

Laminer alt tabaka; burada katı yüzeyinde akışkan durağandır. Viskoz etkiler tarafından, duvar yanındaki akışkanda türbülent kayma gerilmelerinin varlığı bastırılmıştır. Bu tabaka pratikte son derece incedir ($y^+ < 5$) ve tabaka boyunca kayma

gerilmesinin yaklaşık sabit ve duvar kayma gerilmesi τ_w 'ne eşit olduğu kabul edilebilir. Böylece;

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial V}{\partial y} \cong \tau_w \quad (2.18)$$

$y=0 \Rightarrow V=0$ sınır şartını uygulayarak y' ye göre integrasyon yapılırsa, duvara olan uzaklık ile ortalama hız arasında lineer bir ilişki bulunur;

$$V = \frac{\tau_w y}{\mu} \quad (2.19)$$

$$V^+ = \frac{V}{V^*}; V^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}; y^+ = \frac{y V^* \rho}{\mu}$$

$V^+ - y^+$ tanımlamalarının kullanılmasından sonra ve biraz cebir kullanılarak laminar alt tabaka için hız profili ifadesi elde edilir[22].

$$V^+ = y^+ \quad (2.20)$$

Tampon bölge; viskoz alt tabakanın dışında viskoz ve türbülent etkilerin her ikisinin de önemli olduğu bir bölge vardır ($30 < y^+ < 500$). τ kayma gerilmesi, duvardan uzaklıkla yavaşça değişir ve bu iç bölgede sabit ve duvar kayma gerilmesine eşit olarak kabul edilmektedir. V^+ ve y^+ arasındaki fonksiyonel ilişki;

$$V^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.21)$$

ile verilmektedir. Bu ifade Prandtl Karışım Mesafesi teorisinden elde edilmiştir [21, 22].

Türbülent akım bölgesi; bu bölgede sadece türbülent etkiler önemlidir. Hız profili olarak da Denklem (2.21) kullanılır, sadece κ ve B sabitleri farklıdır.

2.4. Türbülans Modelleri

Türbülansı karakterize eden edilerin hareketinin tam olarak anlaşılması çok zor olmasına rağmen, türbülansın akım içinde momentum transferine katkısını belirleyebilmek için bazı teorik türbülans modelleri geliştirilmiştir [22].

Bastırılabilen akış için türbülent akım denklemleri;

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (2.3)$$

Reynolds denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho \bar{V}_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_x V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{V}_x) + \left(-\frac{\partial(\rho \overline{V_x'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{V_y' V_x'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{V_z' V_x'})}{\partial z} \right) \quad (2.22-a)$$

+ ρg_x

$$\frac{\partial(\rho \bar{V}_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_y V) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{V}_y) + \left(-\frac{\partial(\rho \overline{V_x' V_y'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{V_y'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{V_z' V_y'})}{\partial z} \right) \quad (2.22-b)$$

+ ρg_y

$$\frac{\partial(\rho \bar{V}_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}_z V) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{V}_z) + \left(-\frac{\partial(\rho \overline{V_x' V_z'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{V_y' V_z'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{V_z'^2})}{\partial z} \right) \quad (2.22-c)$$

+ ρg_z

Skaler taşınım denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi V) = \text{div}(\Gamma_\Phi \text{grad} \Phi) + \left(-\frac{\partial(\rho \overline{V_x' \Phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{V_y' \Phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{V_z' \Phi'})}{\partial z} \right) \quad (2.23)$$

+ ρg_Φ

Φ herhangi bir akım özelliği olmakla beraber ortalama Φ ;

$$\Phi = \left(\frac{1}{\Delta t} \right) \int_0^{\Delta t} \phi(t) dt = 0 \quad (2.24)$$

ile tanımlanır.

En genel türbülans modelleri aşağıda sınıflandırılmıştır:

1. Klasik modeller

- a. Sıfır denklemlili model– karışım mesafesi modeli.
- b. İki denklemlili model– k–ε modeli
- c. Reynolds gerilim denklemlili modeli.
- d. Cebirsel gerilim modeli.

2. Large Eddy Simulation [22].

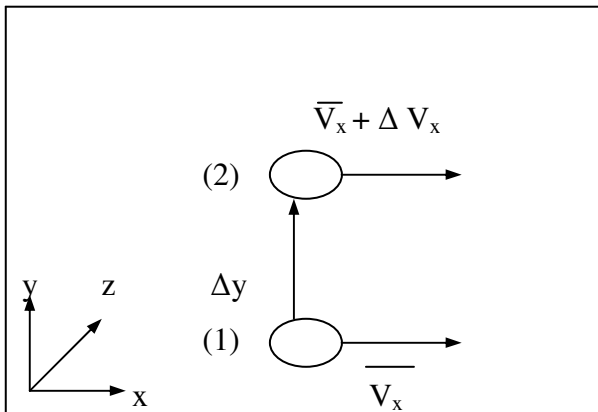
2.4.1. Sıfır Denklemlili Modeller - Karışım Mesafesi Modeli

En basit ve en hızlı sonuç veren modeldir. Dolayısıyla diğer modellerle karşılaştırıldığında sonuç açısından en fazla hataya sebep olacak modeldir [13].

Reynolds gerilim ifadesi;

$$\tau_{yx} g_c = \rho \overline{V'_y V'_x} \quad (2.25)$$

şeklindedir.



Şekil 2.5. Türbülent akım içinde edilerin hareketi [21].

Şekil 2.5.'te gösterilen bir edi (1) numaralı konumdan (2) numaralı konuma gittiğine göre, bu Δy mesafesi edinin kimliğini kaybetmeden hareket edebileceği bir mesafe olmalıdır. Bu uzunluğa "Prandtl Karışım Mesafesi" denir ve "l" ile gösterilir. Böylece $\Delta y = l$ alınabilir. Ayrıca bu yeni konumdaki ortalama hızın eski konumdakine göre farkı;

$$\Delta V_x = \frac{d\overline{V}_x}{dy} \ell \quad (2.26)$$

olarak yazılabilir. Türbülansın izotropik olduğu ve ΔV_x 'in edinin hareketi nedeniyle oluşan hızdaki sapma kadar olduğu kabul edilirse Denklem (2.26) kullanılarak;

$$V'_x = V'_y = \Delta V_x = \ell \frac{d\overline{V}_x}{dy} \quad (2.27)$$

yazılabilir. Denklem (2.25) ve (2.27) birleştirilirse;

$$\tau_{yx}^{(t)} g_c = \rho \ell^2 \left(\frac{d\overline{V}_x}{dy} \right)^2 \quad (2.28)$$

elde edilir. Bu Reynolds geriliminin Prandtl Karışım Mesafesi Modeli'ne göre ifadesidir. Boru içinde akış için Denklem (2.28) aşağıdaki gibi yazılabilir [21];

$$\tau_{yx}^{(t)} g_c = -\rho \ell^2 \left| \frac{d\overline{V}_x}{dy} \right| \left(\frac{d\overline{V}_x}{dy} \right) \quad (2.29)$$

2.4.2. İki Denklemlili Modeller - k-ε Modeli

Eğer konveksiyon ve türbülans özelliklerin difüzyonu ihmal edilebilirse, karışım mesafesi modeline göre ana akım üzerine türbülans etkisini ifade etmek mümkündür. Eğer konveksiyon ve difüzyon ihmal edilmezse -geri döngülü akımlarda olduğu gibi -, karışım mesafesi modeli için uygun bir cebirsel çözüm çok mümkün olmaz. Karışım mesafesi modeli bu tür durumlarda çok eksik kalır.

k-ε modeli türbülent kinetik enerjinin etkilediği mekanizma üzerine yoğunlaşmıştır. İlk olarak konu ile ilgili bazı tanımlamaları yapmak gerekmektedir. Bir türbülent akımın anlık kinetik enerjisi k(t), ortalama kinetik enerji (K) ve türbülent kinetik enerjinin (k) toplamıdır:

$$K = \frac{1}{2} (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) \quad (2.30)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{V_x'^2} + \overline{V_y'^2} + \overline{V_z'^2}) \quad (2.31)$$

$$k(t) = K + k \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \text{div}(\rho K V) = \text{div}(-P V + 2\mu V E_{xy} - \rho V \overline{V_x' V_y'}) - 2\mu \overline{E_{xy} E_{xy}} + \rho \overline{V_x' V_y' E_{xy}} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k V) = \text{div}\left(-\overline{p' v'} + 2\mu \overline{e'_{xy}} - \rho \left(\frac{1}{2}\right) \overline{v_x' v_x' v_y'}\right) - 2\mu \overline{e'_{xy} e'_{xy}} + \rho \overline{V_x' V_y' E_{xy}} \quad (2.34)$$

Denklem (2.33) ortalama kinetik enerjinin, Denklem (2.34) türbülent kinetik enerjiyi tanımlayan denklemlerdir[22].

"Viskoz dissipasyon" terimi:

$$-2\mu \overline{e'_{xy} e'_{xy}} = -2\mu (\overline{e_{11}^{\prime 2}} + \overline{e_{22}^{\prime 2}} + \overline{e_{33}^{\prime 2}} + 2\overline{e_{12}^{\prime 2}} + 2\overline{e_{13}^{\prime 2}} + 2\overline{e_{23}^{\prime 2}}) \quad (2.35)$$

dalgalandan deformasyon hızlarının (e_{xy}') karelerinin toplamı yüzünden Denklem (2.34)'e katılan negatif bir terimle verilir. Türbülent kinetik enerjinin dissipasyonu viskoz kuvvetlere karşı iş yapan çok küçük ediler yüzünden ortaya çıkar. Türbülans dinamiğinin çalışılmasında hayati bir önem taşır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{e'_{xy} e'_{xy}} \quad (2.36)$$

Standart k – ε modeli iki model denkleminde sahiptir, bunların birisi k, birisi ε içindir. Eki viskozitesi:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.37)$$

denklemleri ile tanımlanır. Burada C_μ boyutsuz bir sabittir. Standart model k ve ε için aşağıdaki taşıyım denklemlerini kullanır.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k V) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k\right) + 2\mu_t E_{xy} E_{xy} - \rho \varepsilon \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon V) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon\right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{xy} E_{xy} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.39)$$

Denklemler ayarlanabilir beş sabit içermektedir; C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$. Standart k - ε modeli birçok türbülent akış için uygun olan verilerle karşılaştırılarak elde edilen değerler ile çalışır;

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (2.40)$$

Eğer k ve ε 'a ait mevcut bilgi yoksa iç akımda k ve ε için giriş dağılımlarının kaba yaklaşımları, türbülans yoğunluğu T_i ve karakteristik uzunluk L (eş değer boru çapı) ile elde edilebilir. Bunlar da:

$$k = \frac{3}{2} (V_{ref} T_i)^2;$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell};$$

$$\ell = 0.07L$$

formülleri vasıtasıyla bulunur.

Yüksek Reynolds sayılarında standart k - ε modeli, duvar yanındaki akımın genel davranışını kullanarak duvar boyunca model denklemlerini integre etmeye gereksinim duymaktan kaçınır. Eğer y katı duvara normal koordinat doğrultusunda y_p noktasında ortalama hız $30 < y_p^+ < 500$ değeri ile logaritmik hız profili yasasını sağlar ve türbülent kinetik enerjinin ölçümleri türbülans üretim hızının dissipasyon hızına eşit

olduğunu gösterir. Bu kabulleri ve edî viskozite formülü (2.37) kullanılarak aşağıdaki duvar fonksiyonlarının geliştirilmesi mümkündür;

$$V^+ = \frac{V}{\kappa} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey_p^+) \quad (2.41)$$

$$k = \frac{V_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}; \varepsilon = \frac{V_\tau^3}{\kappa y}$$

Burada, Von Karman sabiti; $\kappa = 0.41$ ve düzgün duvarlar için duvar pürüzlülük sabiti; $E = 9,8$ 'dir.

Düşük Reynolds sayılarında logaritmik hız profili yasası geçerli değildir, bu yüzden yukarıda bahsedilen sınır koşulları kullanılamaz. Düşük Reynolds sayılarında k - ε modelinin denklemleri (2.38) – (2.40) yerine aşağıda verilenler yazılır.

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k V) = \text{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad} k\right) + 2\mu_t E_{xy} E_{xy} - \rho \varepsilon \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon V) = \text{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \text{grad} \varepsilon\right) + C_{1\varepsilon} f_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{xy} E_{xy} - C_{2\varepsilon} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.44)$$

f_μ , f_1 , f_2 türbülans Reynolds sayısı ($Re_t = k^2/(\varepsilon \nu)$) ve/veya benzer parametrelerin fonksiyonudurlar. Bu fonksiyonlar:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0,0165 Re_t \nu)]^2 \left(1 + \frac{20,5}{Re_t}\right)$$

$$f_1 = \left(1 + \frac{0,05}{\mu}\right)^3 \quad (2.45)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-Re_t^2)$$

şeklinde tanımlıdır. f_μ fonksiyonundaki Re_y parametresi $k^{(1/2)} y/v$ ile tanımlanır. Sınır koşulu olarak da $\delta\varepsilon/\delta y=0$ kullanılmıştır [21].

2.4.3. Reynolds Gerilim Denklemi Modeli

En karmaşık klasik türbülans modelidir, ikinci derece kapalı model olarak da adlandırılır. Karmaşık gerilim alanları ile önemli hacim kuvvetleri varlığında akım ile ilgili tahminler yapılırken k - ε modelinin birkaç büyük problemi ortaya çıkar. Bu şartlar altında Reynolds gerilimi son derece doğru bir şekilde hesaplanırsa bile aşağıdaki denklemle ifade edilmesi yetersiz kalır:

$$-\rho \overline{V_x'V_y'} = \mu_t \left(\frac{\partial V_x}{\partial x_y} + \frac{\partial V_y}{\partial x_x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \sigma_{xy} = 2\mu_t E_{xy} - \frac{2}{3} \rho k \sigma_{xy} \quad (2.46)$$

Diğer taraftan doğru Reynolds gerilimi taşınım denklemi Reynolds gerilim alanının yöne bağlı etkileri ile açıklanabilir.

Modelleme stratejisi Launder ve arkadaşları tarafından sunulan çalışma ile başlamıştır [15]. $R_{xy}(= -\tau_{xy}/\rho = \overline{V_x'V_y'})$ 'nin taşınımını için doğru denklem aşağıdaki formda verilmiştir:

$$\frac{DR_{xy}}{Dt} = P_{xy} + D_{xy} - \varepsilon_{xy} + \Pi_{xy} + \Omega_{xy} \quad (2.47)$$

Reynolds gerilimi taşınım denkleminde R_{xy} 'nin oluşum hızı P_{xy} ile verilmiştir:

$$P_{xy} = R_{xm} \frac{\partial V_y}{\partial x_m} + R_{ym} \frac{\partial V_x}{\partial x_m} \quad (2.48)$$

D_{xy} difüzyon terimi, difüzyon Reynolds gerilimlerini gradyanlarıyla orantılı olduğu durumda Reynolds gerilimlerinin taşınım hızı kabulüyle modellenmiştir. D_{xy} aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$D_{.xy} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial R_{.xy}}{\partial x_m} \right) = \text{div} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \text{grad}(R_{.xy}) \right) \quad (2.49)$$

E_{xy} dissipasyon hızı küçük dissipatif edilerin izotropisi kabulüyle modellenmiştir. ε türbülent kinetik enerjinin dissipation hızıdır ve Denklem (2.36) ile tanımlanmıştır. Kronecker deltası, δ_{xy} , $x=y$ ise $\delta_{xy}=1$ ve $x \neq y$ ise $\delta_{xy}=0$ olarak verilmiştir. Bunların toplamı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\varepsilon_{.xy} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{.xy} \quad (2.50)$$

Basınç – gerilim etkileşimleri, oluşturulması model doğruluğu için en önemli ve aynı zamanda oluşturulması en zor terimdir. Reynolds gerilimleri üzerine bunların etkileri iki farklı fiziksel proses tarafından ortaya çıkar: iki edinin birbiriyle etkileşimi sonucu basınçtaki dalgalanma ve farklı ortalama hızlardaki akışın akış bölgesiyle bir edi arasındaki etkileşim yüzünden oluşan basınç dalgalanması. Bunun yanında basınç–gerilim terimleri üzerine duvara olan yakınlığın etkisini açıklamak için düzeltmeler gerekmektedir. Bu düzeltmeler k – ε modelinde karşılaşılan duvar fonksiyonlarından farklıdır. Bütün bu etkileri kapsayan karşılaştırmalı bir model Launder ve arkadaşları tarafından sunulmuştur [17]. $C_1=1.8$, $C_2=0.6$ sabitleri ile birlikte Π_{xy} denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\Pi_{.xy} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(R_{.xy} - \frac{2}{3} k \delta_{.xy} \right) - C_2 \left(P_{.xy} - \frac{2}{3} P \delta_{.xy} \right) \quad (2.51)$$

Döngüsel terim ise aşağıda tanımlanmıştır:

$$\Omega_{.xy} = -2 \omega_k \left(R_{.jm} e_{.xkm} + R_{.xm} e_{.ykm} \right) \quad (2.52)$$

Burada ω_k döngü vektörüdür ve e_{xyk} değişimli bir semboldür; eğer x , y ve k farklı ve döngüsel sırada ise $e_{xyk}=1$ 'dir; x , y , k farklı ve döngüsel olmayan sırada ise $e_{xyk}=-1$ ve eğer herhangi iki indis aynı ise $e_{xyk}=0$ 'dir.

Reynolds gerilim modelleri kesinlikle çok karmaşıktır ama genel olarak tüm akım özellikleri ve Reynolds gerilimlerini tanımlayan potansiyeli ile model türü çok

basit olarak kabul edilmiştir. Reynolds gerilim modeli her ne şekilde olursa olsun $k-\epsilon$ modeli kadar geçerlidir ve hesaplamaların yüksek maliyeti yüzünden endüstriyel akım hesaplamalarında geniş ölçekte kullanılmaz. Bu modellerin büyüme ve gelişmesi çok aktif bir araştırma alanıdır [22].

2.4.4. Cebirsel Gerilim Denklemi Modelleri

Cebirsel gerilim modeli Reynolds gerilimi taşınım denklemlerinin çözümünün büyük hesaplama maliyeti konvektif ve difüzyon taşınım terimlerinde görülen R_{xy} gibi Reynolds gerilimlerinin gradyanları tarafından ortaya çıkar. Rodi, eğer konvektif ve difüzyon taşınım terimleri kaldırılır veya modellenirse Reynolds gerilim denklemlerinin cebirsel denklemlerden oluşan bir sete indirgeneceği fikrini önermiştir [19].

En basit yöntem konveksiyon ve difüzyon terimlerinin her ikisini birden göz ardı etmektir. Bazı durumlarda bunun yeterli doğrulukta olduğu görülür. Daha genel uygulanabilir metod Reynolds geriliminin konveksiyon ve difüzyon terimlerinin toplamı türbülent kinetik enerjinin konveksiyon ve difüzyon terimlerinin toplamına oranlandığı kabulüdür. Böylece:

$$\frac{D\overline{V'_x V'_y}}{Dt} - D_{xy} \approx \frac{\overline{V'_x V'_y}}{k} \left(-\overline{V'_x V'_y} E_{xy} - \epsilon \right) \quad (2.53)$$

Reynolds gerilimi taşınım denklemi içerisinde, Denklem (2.53) yaklaşımı ile üretim terimi P_{xy} Denklem (2.48), modellenmiş dissipasyon hızı terimi Denklem (2.50) ve basınç-gerilim ilişkisi terimi Denklem (2.51) bazı düzenlemelerle aşağıdaki cebirsel gerilim modelini verir:

$$R_{xy} = \overline{V'_x V'_y} = \frac{2}{3} k \delta_{xy} + \left(\frac{C_D}{C_1 - 1 + \frac{P}{\epsilon}} \right) \left(P_{xy} - \frac{2}{3} P \delta_{xy} \right) \frac{k}{\epsilon} \quad (2.54)$$

Döngülü akışlar için sabitler $C_D=0.55$, $C_1=2.2$ olarak kullanılmaktadır.

Cebirsel gerilim modeli Reynolds gerilimlerinin hesaplanmasında anizotropi etkilerinin birleşimi sonucu oluşan ekonomik bir yöntemdir. Bu model $k-\epsilon$ modeli kadar geçerli değildir ama uygulamasının kötü olduğu bilinen akışlar için kullanılabilir [22].

2.4. Çok Fazlı Akışlar

Çok fazlı akışlar karışımdaki fazlara göre sınıflandırılır, yani, gaz-sıvı, gaz-katı ve sıvı-katı akışları gibi. Bu karışımlar genellikle iki fazlı olarak isimlendirilir. Gaz, sıvı ve katı karışımının eşzamanlı akışı üç fazlı akışı oluşturur. Tek bileşenli iki fazlı akışın genel bir örneği nükleer elektrik santralleri veya diğer güç sistemlerinde bulunan buhar-su akışıdır. Tozun pnömatik taşınımı gaz-katı akışının iyi bir örneğidir. Bununla birlikte gözenekli bir katıda buharın akışı da bir gaz-katı akışı oluşturur. Askıdaki katı ile sıvının akışı katı-sıvı akışına bir örnektir. Bu tür karışımlar genellikle "slurry" olarak adlandırılır. Katı-sıvı akımına bir diğer örnek çamurun akışıdır. Gözenekli bir katının kurutulmasında karşılaşıldığı gibi katıda sıvının hareketi de katı-sıvı akışıdır [20].

2.4.1. Gaz-Katı Akışları ve Pnömatik Taşınım

İki fazlı türbülent süspansiyon akışları ile birçok mühendislik uygulamalarında karşılaşılır. Buna siklon ayırıcılar, püskürtmeli yanma, pnömatik taşınım, toz kömür gazlaştırma ve yakma gibi prosesler dâhildir.

Pnömatik taşınım, kuru tozlaştırılmış, granüle edilmiş ve pellet haline getirilmiş materyallerin büyük miktarlarının taşınması için en pratik yöntemdir. Pnömatik taşınım ya süspansiyon olarak ya da dikey veya yatay borulardan bir gaz akımı ile geçirilerek bahsedilen materyallerin taşınmasıdır.

Prensipde, pnömatik taşınım basitçe; toz veya granüler haldeki katının akışkan akımı içerisinde dağılmış halde, bir borudan geçerek istenilen yere gönderilmesi ve daha sonra da akışkandan katının ayrılmasıdır.

Yığın katı materyaller endüstriyel ölçekte yirminci yüzyılın başından beri pnömatik olarak taşınmaktadır. Pnömatik olarak taşınabilen parçacıkların boyutları $10\mu\text{m}$ – 10cm arasında değişmektedir. Bu çok yönlülük sayesinde pnömatik taşınımın kullanım alanları kimyasal, farmasetik, gıda, mineral üretimi, plastik, kauçuk ve elektrik güç üretimi dâhil geniş bir yelpazeye sahiptir. Pnömatik taşınımı uygulamalarına bağlı olarak iki kategoriye ayrılabilir: seyreltik (veya zayıf) faz ve yoğun faz taşınım.

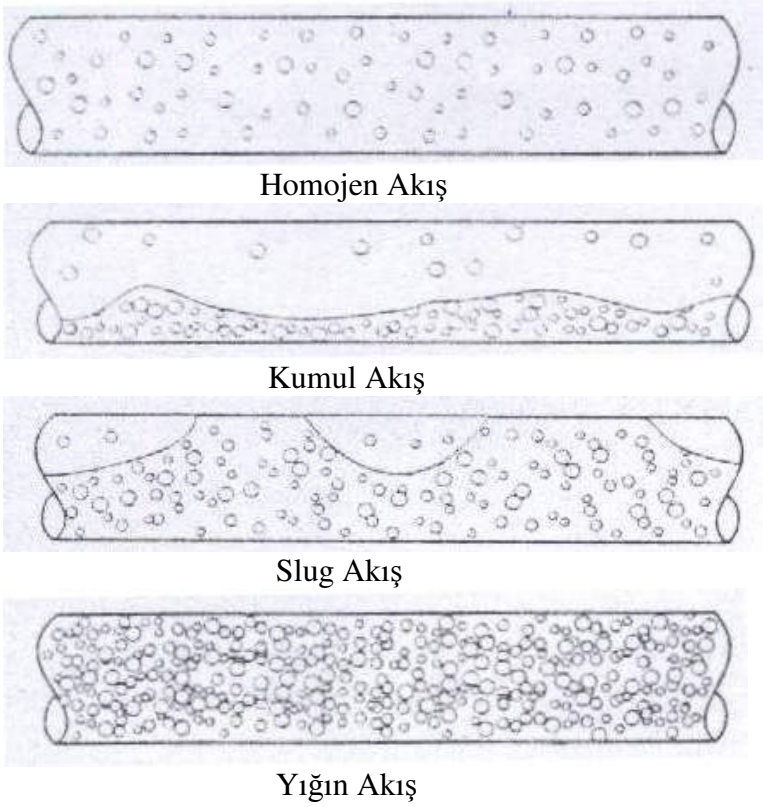
Seyreltik faz un, şeker, nişasta, kimyasallar, granüler ve pellet halindeki ürünler için en etkili maliyete sahiptir. Seyreltik akış şartları altında katı parçacıklar bireysel olarak hareket ederler, hareketlerini yöneten yerel aerodinamik kuvvetler ile gaz içerisinde tümüyle asılı haldedirler. Bunun karşısında yoğun faz akışı vardır. Yoğun faz taşınımında, parçacıklar tümüyle asılı halde değildir ve parçacıkların hareketinde parçacık-parçacık çarpışmaları baskındır. Bu nedenle özellikle gıdaların, mandıra ürünlerinin, farmasetik ürünlerin, yüksek yığın yoğunluğa sahip ürünlerin, aşındırıcı malzemelerin (çimento, kum, metaller, v.b.) ve kavrulabilen malzemelerin (şeker, v.b.) yüksek hızda taşınması için uygundur [12].

Gaz ve sıvı akışkan yataklarda yeteri kadar yüksek bir akışkan hızında katıların terminal hızı aşılır. Bu durumda yatağın üst yüzeyi kaybolur ve katılar akışkan akımı ile yatağın dışına taşınmaya başlar. Oluşan olay katıların pnömatik taşınımı olarak adlandırılır [14].

Pnömatik taşınımında akım modelleri, katı beslemesi, Reynolds sayısı ve parçacık özellikleri gibi faktörlere bağlıdır [9].

Gaz–katı karışımlarının yatay ve dikey borularda akımı için farklı akım modelleri mevcuttur.

Katıların cam bir boruda hareketlerinin gözlemleri akım modellerinin kompleks ve katı–gaz oranına bağlı olduğunu açığa çıkarmıştır. Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi çok düşük katı–gaz oranlarında katı parçacıklar boru boyunca tamamıyla düzenli bir şekilde dağılmıştır. Bu, hareketleri süresince parçacıkların bir kısmının boru duvarlarıyla çarpıştığının bir kanıtıdır. Katı–gaz oranı arttırıldığında parçacıklar borunun altında çökme eğilimindedir ve diğer parçacıkların üstünden kayar. Parçacık segregasyonu belirli bir genişliğe ulaştığında, katılar değişimli olarak azalarak ve artarak bir birikintiden diğerine hareket eder. Ek olarak katı–gaz oranındaki artış, gaz ve katının değişen sluglarda aralıklı akışıyla karakterize edilen slug akımla sonuçlanabilir. Daha yüksek gaz–katı oranlarında, borudaki boşluğun hatırı sayılır bir kısmının katıyla dolmasına sebep olabilir. Gaz–katı yüksek bir hızla beslendiğinde katının büyük bir kısmının durağan olarak kaldığı dalgalı bir akım şekli ortaya çıkar. Nispeten yüksek bir katı–gaz oranında akımlar büyük basınç düşüşü dalgalanmalarıyla genellikle sabit değildir. Şekil 2.6.'da akım modelleri şematik olarak gösterilmiştir [10].



Şekil 2.6. Yatay gaz-katı akımı için akış modelleri [4].

Gaz hızı yeteri kadar düşük ise veya katı besleme hızı yeteri kadar yüksek yapılırsa, parçacıklar süspansiyondan ayrılır ve kısmen boruyu tıkar. Bu durum sınırlı boru yatay kesitinde birikim hızı ile biriken parçacıkların süspansiyona katılma hızının denk olduğu kadar yüksek bir gaz hızına ulaşana dek sürer. Bu olgu saltation olarak bilinir. Saltation pnömatik taşınım sistemlerinde istenmeyen bir durumdur [8].

Dikey taşınımında ise, parçacıklarla ilişkili gazın hızı parçacıkların terminal düşme hızlarına yakındır. Ek olarak parçacıkların varlığı yüzünden oluşan basınç düşmesi, boru hattında var olan parçacıkların kütlesi ile belirlenen basınç düşmesine yakındır. Yüksek gaz hızlarında, parçacıklar gaz içerisinde üniform bir şekilde dağılır. Fakat hız azaldığında, farklı madde miktarı içeren değişimli sluglar ortaya çıkar. Bunlar birbiri ardından ilerler [4]. Gaz hızı düşürüldüğünde veya katı besleme hızı çok yüksek olduğunda süspansiyon kabarıp ve düzgün haldeki akım slug akım koşullarına dönüşür [8].

2.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Hakkında Genel Bilgiler

2.5.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

CFD, akışkanların dinamiğinin çalışıldığı bilgisayar destekli bir hesaplama teknolojisidir [12]. Bu teknoloji tümüyle deneysel veya tümüyle teorik olan akışkanlar dinamiğine üçüncü bir yaklaşım olarak girmiştir [2].

CFD kullanırken, çalışılmak istenen sistem veya aygıt tanıtarak bir hesaplamalı model kurulur. Daha sonra bu sanal prototipe akışkan akış karakteristikleri –özellikleri– uygulanır ve yazılım çıktıları akışkan dinamiğinin bir öngörüsüdür. CFD sofistike bir analiz tekniğidir. Sadece akışkan akım davranışlarını öngörmez; bunun yanında, ısı ve kütle transferi, faz değişimi, kimyasal reaksiyon, mekanik hareket ve katı yapılarla ilişkili gerilim ve deformasyon ile de ilgilenir [11].

2.5.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (CFD) Tarihçesi

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği, ya da kısaca CFD'nin, tarihçesi 1970'lerin ilk yarılarında başlar. Bu yıllarda CFD; fizik, nümerik matematik ve bazı akışkan akımının simüle etmek için kullanılan bilgisayar bilimlerinin bir kombinasyonu ile eşanlı hale geldi. CFD gittikçe daha güçlü ana bilgisayar sistemlerinin elde edilebilmesiyle güç kazanmıştır ve halen bilgisayar teknolojisindeki gelişim ile sıkı sıkıya ilişkilidir. CFD yöntemlerinin ilk uygulamaları arasında lineer olmayan potansiyel denklem çözümüne dayanan transonik akışın simülasyonu vardır. 1980'lerin başlangıcı ile ilk iki boyutlu (2D) ve daha sonra da üç boyutlu (3D) denklemlerin çözümü mümkün oldu. Süper bilgisayarların gittikçe artan hızı sayesinde ve multigrad gibi nümerik hızlandırma teknikleri türlerinin gelişimi yüzünden, turbomakinelerin içinde veya tüm uçak konfigürasyonlarında inviscid (viskoz olmayan) akışların hesaplanması mümkün oldu. 1980'lerin ortalarında, odak, Navier–Stokes denklemleri ile yönetilen viskoz akışın simülasyonuna kaydı. Türbülans modellemede baş yöntem Direkt Nümerik Simülasyon (DNS) ve Large Eddy Simülasyon (LES) olarak temsil edildi. Bununla birlikte her iki yöntem de mühendislik uygulamalarında uygulanabilir olmaktan halen çok uzaktı.

Nümerik yöntemlerin gelişmesiyle - özellikle implicit formulasyon - gerçek gaz modellemesi gerektiren akış problemlerinin çözümü 1980'lerin sonunda mümkün oldu. İlk geniş ölçek uygulamalar arasında, Avrupa HERMES uzay mekiği gibi araçlarda 3D

hipersonik akışın dengede ve dengede olmayan kimyasal modeller kullanılarak hesaplanması vardır. Çoğu araştırma faaliyetleri yanma ve özellikle alev modellemesinin nümerik simülasyonuna adandı ve hâlâ adanmaktadır. Bu çalışmalar düşük emisyonlu gaz türbinlerinin ve makinelerinin gelişmesi için önemlidir.

Akış simülasyonlarının karmaşıklığı ve gerçeğe uygunluğu üzerine talebin gittikçe artması sebebiyle, grid oluşturma yöntemleri gittikçe sofistike olmak zorunda kaldı. Gelişme ilk olarak ya cebirsel yöntemler ya da kısmî diferansiyel denklemler kullanılarak oluşturulan kısmen basit yapıları meshler ile başladı. Ama, konfigürasyonların geometrik karmaşıklığının artması ile gridler birçok topolojik basit bloğa ayrılmak zorunda kaldı (çoklu blok yaklaşımı). Sonraki adım bir tek blokta grid oluşumu üzerine eklenen baskının rahatlaması için grid blokları arasına birbirini karşılamayan ara yüzeyler tanımlanmasıdır. Son olarak, çözüm yöntemleri birbiri üzerine binen gridlerle ilgilenebilen yöntemler olarak tanımlandı (chimera tekniği). Bununla beraber, karmaşık bir geometri için yapısal ve çoklu blok bir gridin oluşturulması haftalar alabiliyordu. Bu yüzden araştırmacılar yapısal olmayan grid oluşturucuların (ve akış çözücülerin) geliştirilmesi üzerine yoğunlaştı. Yapısal olmayan yöntemlerin bir başka çok önemli özelliği grid adaptasyonuna dayanan çözümün mümkün olmasıdır. İlk yapısal olmayan gridler Euler denklemleri tarafından yönetilen viskoz olmayan akışlar için tümüyle yeterli olan isotropik tetrahedranın dışında oluşturuldu. Bununla birlikte Navier–Stokes denklemlerinin çözümü yüksek Reynolds sayıları için kayan tabakada son derece gergin gridler gerekmektedir. Her ne kadar bu gridler tetrahedral elemanlardan oluşmuş olsa da, tetrahedra dışında ve viskoz akış bölgesinde hegzahedra veya prizma kullanmak tavsiye edilir. Bu sadece çözümün doğruluğunu geliştirmekle kalmaz, elemanların, yüzeylerin ve kenarların sayısını da korur. Böylece, hafıza ve simülasyonun gerektirdiği çalışma zamanı azalır. Gerçekten, günümüzde yapısal olmayan karmaşık elemanlı gridler ile ilişkili akış çözücülere çok güçlü bir ilgi vardır.

Son günlerde, CFD yöntemleri rutin olarak uçak, turbomakine, araba ve gemi dizayn alanlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, CFD yöntemleri meteoroloji, oşinografi, astrofizik, petrol geri kazanımı ve mimarlıkta da uygulanmaktadır. CFD için geliştirilen çoğu nümerik teknikler Maxwell denklemlerinin çözümünde kullanıldı. Bu yüzden, CFD mühendislikte oldukça önemli bir tasarım aygıtı ve fizik bilimlerinde de temel bir araştırma aygıtı oldu. Nümerik çözüm yöntemleri ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, turbomakinelerde sık sık karşılaşıldığı gibi geometrik olarak

karmaşık durumlar çözülebildi. Viskoz akışın geniş ölçek simülasyonunda, grid hücrelerinin milyonlarca düzinesinden oluşan gridler için bile, günümüz süper bilgisayarlarında sadece birkaç saat içinde çözülebilmektedir [7].

2.5.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (CFD) Kullanım Alanları

CFD, endüstriyel ve endüstriyel olmayan birçok uygulama alanında güçlü ve güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır. Birkaç örnek verilecek olursa;

- a. Uçak ve hava taşıtlarının aerodinamiği: kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri.
- b. Gemilerin hidrodinamiği.
- c. Güç istasyonları: gaz türbinleri.
- d. Turbomakineler: dönen parçaların içerisindeki akış, difüzörler vb.
- e. Elektrik ve elektronik mühendisliği: mikro devreleri kapsayan ekipmanların soğutulması.
- f. Kimyasal proses mühendisliği: karıştırma ve ayırma vb.
- g. Binaların iç ve dış çevreleri: rüzgâr etkisi ve ısıtma–havalandırma.
- h. Deniz mühendisliği.
- i. Çevre mühendisliği: atık su ve kirleticilerin dağılımı.
- j. Hidroloji ve oşinografi: nehir, koy ve okyanuslarda akış.
- k. Meteoroloji: hava tahmini.
- l. Biomedikal mühendisliği: arterlerde ve damarlarda kan akışı.

Günümüzde de CFD, endüstriyel ürün ve proseslerin tasarımında hayati bir bileşen olmuştur [22].

2.5.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Kodlarının Çalışma Prosedürü

CFD kodları akışkan akımı problemlerini çözebilen nümerik algoritmalara dayalı olarak kurulmuştur. Bütün kodlar üç ana eleman içerir:

- Bir ön işlemci.
- Bir çözücü.
- Bir son işlemci.

Önişlem, bir CFD programına bir akış probleminin girilmesi ve çözücü tarafından kullanılmak için uygun bir forma dönüştürülmesinden oluşur. Kullanıcı aşağıdakileri kapsayan önişlem basamaklarını uygular;

- a. İlgilenilen bölge ile ilgili geometrinin tanımlanması (sayısal domainin oluşturulması).
- b. Grid oluşturulması (domainin mesh adı verilen birçok küçük alt domainlere ayrılması).
- c. Modellemede ihtiyaç duyulan fiziksel veya kimyasal olguların seçilmesi.
- d. Akışkan özelliklerinin tanımlanması.
- e. Hücrelerde uygun sınır koşullarının tanımlanması.

CFD çözücüleri üç farklı nümerik çözüm tekniğinden herhangi birini kullanarak çalışır: sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacim yöntemleri. Çözücü çalışma basamakları şunlardır:

- a. Domain, kontrol hacimlerinin sonlu bir setine diskretize edilir.
- b. Navier–Stokes denklemleri cebirsel eşitliklere diskretize edilir.
- c. Tüm denklemler akış alanında çözülür.

Elde edilen sonuçların yorumlanması ile ilgili kısım Sonişlemcinin kapsamındadır. Sonişlem için birçok donanımı vardır. Bunlardan birkaçı:

- a. Alan geometrisi ve hücrelerin gösterilmesi.
- b. Vektör grafikleri.
- c. Çizgi ve dolgu kontürü grafikleri.
- d. 2D ve 3D grafikler [9, 22].

2.7. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizinde Temel Adımlar

Bir CFD analizinin yapılması sırasında izlenen prosedür yedi temel basamağı takip eder [9, 18].

- Problem tanımlanması ve önişlemler=ÖNİŞLEMÇİ
 - a. Modelin amaçları belirlenir.
 - b. Modellenecek alan (domain) tanımlanır.
 - c. Grid tasarlanır ve oluşturulur.
- Çözücü uygulaması=ÇÖZÜCÜ
 - a. Nümerik model kurulur.
 - b. Çözüm hesaplanır ve görüntülenir.

- Son işlemler=SONİŞLEMCİ
 - a. Sonuçlar tartışılır.
 - b. Modelde yapılacak revizyonlar gözden geçirilir.

2.7.1. Model Amaçlarının Tanımlanması

Bütün sistem mi yoksa sistemi temsil eden bir parçası mı modellenecek bunun belirlenmesi gerekmektedir. Eğer hassas bir çalışma olacaksa mümkün olduğunca küçük ve ayrıntılı modeller seçilmelidir. Ama ne kadar fazla ayrıntı olursa çözüm süresi o kadar uzar. Ayrıca model büyüdükçe ince bir sayısal ağ kullanılmamış ise hassasiyet azalır. Kısaca sistemi çok iyi temsil eden bir geometride, en ideal boyutlarda ve mümkün olduğunca ince bir sayısal ağa sahip bir modelleme yapılmalıdır [9]

2.7.2. Modelleneyecek Domainin Tanımlanması

Domain çalışılacak ortam anlamına gelmektedir. Domainin yanlış ve yetersiz seçilmesi, bizi modelleme sonucunda yanlış sonuçlara götürecektir. Diyelim ki bir uçak kanadı optimize edilecek. Bu durumda uçak kanadını değil uçak kanadının etrafındaki havayı domain alırız. Ancak öyle bir genişlik seçmeliyiz ki kanadın yaymış olduğu havanın şok dalgalarının etkisi sönmüş olsun. Eğer bir oda gibi sınırlı bir ortam optimize edilecekse, domain odanın sınırları olmalıdır.

Bunun yanı sıra, eğer yapılabiliyorsa problemin iki boyutlu duruma basitleştirilmesinde fayda vardır. Bu tarz çözüm hassas değildir ancak zamandan tasarruf sağlar ve çözümü kolaydır [9].

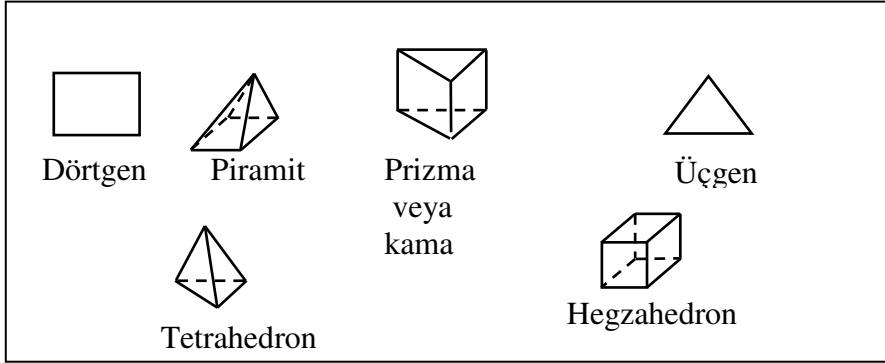
2.7.3. Grid Dizayını ve Oluşturulması

Grid veya diğer adıyla mesh, modellenecek geometrinin ağ benzeri bir yapıya dönüştürülmesi için kullanılır. Gride ait topoloji;

- **üç boyutlu:** tetrahedron, hegzahedron, piramit, prizma–kama
- **iki boyutlu:** üçgen, dörtgen

olabilir. Ayrıca model gridlere ayrılırken yukarıdaki topolojilerin karışımı yani hibrit mesh kullanılabilir. Üç boyutlu durumda en kolay mesh atma yolu tetrahedron elemanlar kullanmaktır. Ancak bunlar bozuk elemanlardır. Hacim içerisinde daha fazla

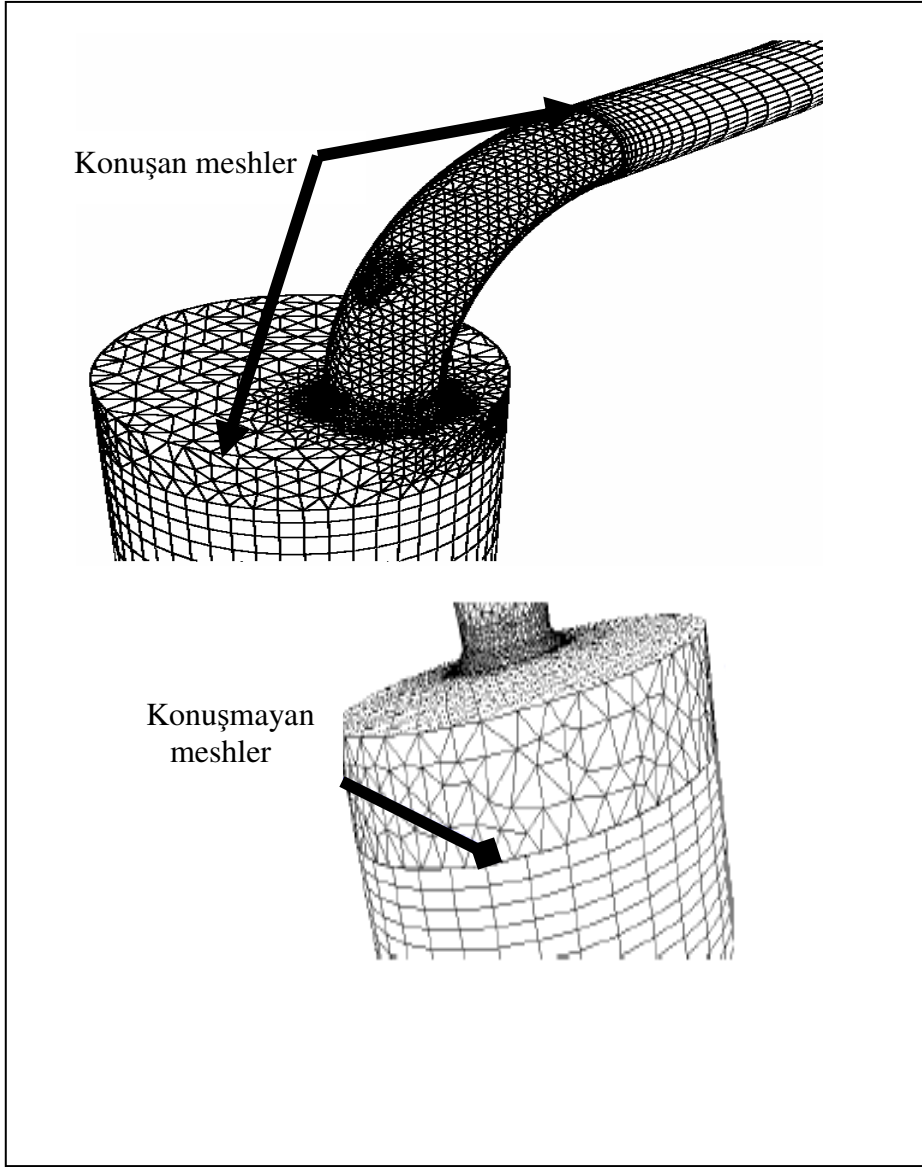
sayıda olacaklarından hegzahedronlara göre çözüm süresi daha uzun, kalitesi daha kötüdür. Hegzahedronlar genellikle mesh atmada seçilmesi en iyi olan elemanlardır. Çözüm kalitesi çok iyi, süresi de kısadır. Ancak çok fazla girinti-çıkıntı ve ayrıntı olan elemanlarda bu tip grid kullanılması çok uzun zaman alır. Bu nedenle müsait olan tüm geometrilerde mümkün olduğu kadar bu tip grid kullanılmalıdır. Mesh atma işlemi sonucunda mümkün olan en az sayıyı içeren mesh ağı seçilmelidir. Şekil 2.7.'de grid oluşturulurken kullanılan topolojiler gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Grid oluşturulurken kullanılan topolojiler [9]

Hibrit mesh kullanılırken "meshlerin konuşulabilmesi" gerekir. Bu şu demektir: Eğer tetrahedron meshler ile hegzahedron meshler bir arada kullanılacaksa, arada mutlaka piramit veya prizma eleman kullanılmalıdır. Çünkü iki meshin köşe noktaları bir araya gelmezse iki farklı alan gibi davranır ve bir bölgeden diğerine data transferi sağlanamaz. Şekil 2.8.'de konuşan ve konuşmayan meshlere örnek verilmiştir.

Grid dizaynında hacim içerisine elemanlar sığdırılmaya çalışılırken şekli bozulan elemanlar da olur. Bu elemanlar kontrol edilerek çözüm aşamasına geçmeden önce düzeltilmelidir [9].



Şekil 2.8. Konuşan ve konuşmayan meshler [9]

2.7.4. Nümerik Modelin Seçilmesi

Akımın ve geometrinin bilinen özelliklerine göre çözücü tipi, çözüm formülasyon tekniği, geometrinin iki veya üç boyutlu oluşu, kararlılık, akımın türbülent veya laminar oluşu vb. gibi fiziksel modelle ilgili olan özellikler tanımlanır. Daha sonra problemdeki materyaller bütün özellikleriyle (yoğunluk, viskozite, ısı kapasitesi, termal iletkenlik katsayısı vb.) tek tek tanımlanır. Bütün bu özelliklerin çözücüye yüklenmesinin ardından önışlemciden alınan geometri ile ilgili sınır şartları düzenlenir. Burada:

- Akışkan/katı,
- Hız, basınç vb. giriş/çıkışları,
- Duvarlar ve gereken tüm sınır koşulları

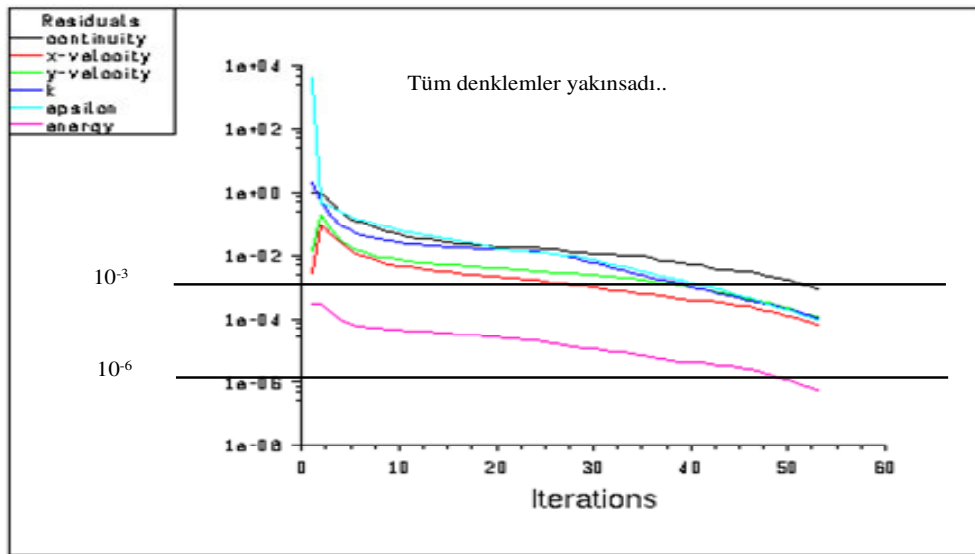
Girilir. Bu işlemin sonunda problem için verilen çalışma şartlarının girişi yapılır. Son olarak çözüm için ilk değer verilir ve iterasyonların nasıl ilerlediğini görebilmek için monitör ayarı yapılır [9].

2.7.5. Çözümün Hesaplanması

Çözüm, nümerik analiz teknikleriyle yapıldığından, verilen ilk değere göre birçok iterasyon yapılır ve yakınsama sağlanana kadar bu iterasyonlar sürdürülür. İterasyonların nasıl ilerlediği ekrandan rahatlıkla izlenebilir. Diskretizasyonun derecesine bağlı olarak yakınsama çabuk veya geç olabilir, hatta modelde uygunsuzluk varsa hiç olmayabilir.

Yakınsanmış çözümün doğruluğu ise aşağıdakilere bağlıdır:

- Fiziksel modelin uygunluğu ve doğruluğu.
- Grid kararlılığı ve bağımsızlığı: bu mesh sayısına bağlı olmayan sonuçları ifade eder. Mesh sayısı değiştikçe alınan sonuç değişmiyorsa bu durum oluşmamış demektir.
- Problemin düzenlenmesi [9].



Şekil 2.9. İterasyon izleme monitörü [9]

2.7.6. Sonuçların Tartışılması

Çözümün değerlendirilmesi ve kullanışlı mühendislik bilgilerinin elde edilmesi için sonuçlar tartışılmalıdır. Bu işlem yapılırken görüntüleme teknikleri (Şekil 2.9.'daki gibi) ve nümerik raporlar kullanılır. Bu sayede cevaplanan sorulara göre akım ve sistem ile ilgili birçok yorum yapılabilir [9].

2.5.5.7. Modele Revizyon Yapılması

Eğer model ile ilgili sorun varsa (yakınsama sağlanmıyorsa, sonuç beklendiği gibi çıkmıyorsa vb.) geriye dönüp şu soruların tamamına cevap aranmalıdır:

a. Fiziksel model uygun mu?

- Akış tipi türbülent mi laminar mi kontrol edilmelidir. Ayrıca zamana bağlı olup olmadığına bakılmalıdır. Sıkıştırılabilir bir akışkan olup olmadığı ve yoğunluğun etkileri de dikkate alınmalıdır. Problemden üç boyutlu etkiler var ise iki boyutlu çözümde sorun çıkar, bu da kontrol edilmelidir.

b. Sınır şartları doğru verilmiş mi?

- Domain yeteri kadar geniş mi değil mi bunun kontrolü yapılmalıdır. Ayrıca sınır koşullarının uygun ve sınır değerlerinin makul olduğundan emin olunmalıdır.

c. Grid yeterli mi?

- Gelişmiş sonuçlar için geri adapte edilebilir mi? Çözüm grid adaptasyonu ile önemli derecede değişti mi? Yoksa griden bağımsız mı? Sınır çözümü geliştirmeye ihtiyaç duyuyor mu?

Bu soruların cevaplarına göre gereken düzeltmeler yapılarak yeniden hesaplamalara başlanır [9].

2.8. Fluent Nedir?

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımıdır.

Fluent, genel amaçlı bir CFD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler vb.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı birçok

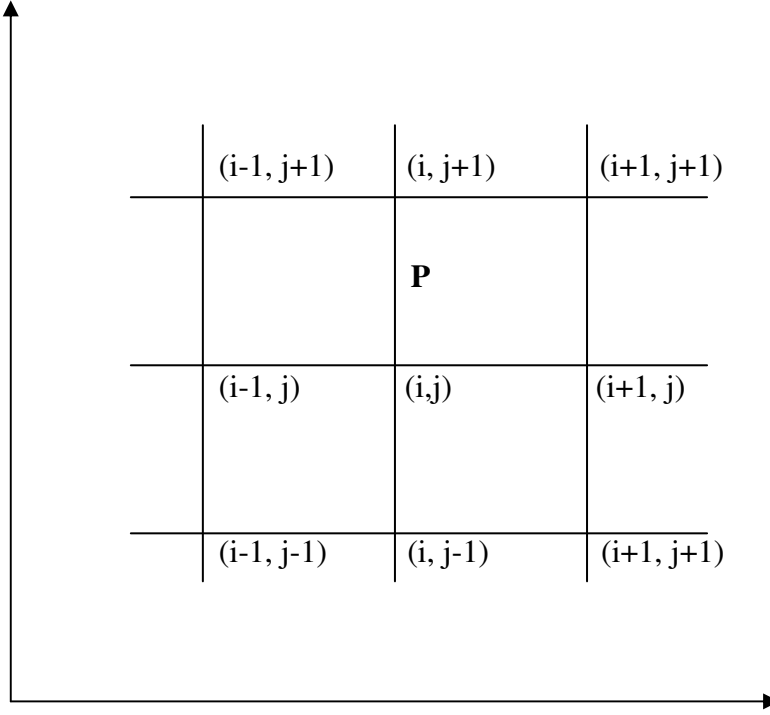
endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir.

Fluent, bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde

- a. Laminer, geçişsel ve türbülanslı akışlara,
- b. İletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere,
- c. Kimyasal tepkimeleri içeren problemlere,
- d. Yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere, hızlı ve güvenilir bir şekilde çözümler sağlar [3].

2.8.1. Diskretizasyon Nedir?

Kısmî diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri, domain boyunca bağımlı değişkenlerin sürekliliğinin değişimini veren kapalı form ifadeleri kapsar. Aksine nümerik çözümler, domainde mesh noktaları olarak adlandırılan, sadece belirli noktalarda cevaplar verebilir. Örneğin xy düzleminde bir gridin belirli bir kısmını gösteren Şekil 2.10.'u göz önüne alalım. Uygunluk için, x doğrultusundaki meshler arasındaki boşluğun üniform olduğu ve Δx olarak verildiği, y doğrultusundaki gridler arasındaki boşluğun üniform olduğu ve Δy olarak verildiği kabulü yapılmalıdır. Genelde Δx ve Δy farklıdır. Gerçekte Δx ve Δy nin üniform olduğu genellikle kesin değildir; her iki doğrultuda da grid toplamda eşit olmayan boşluklar ile bölünebilir, grid noktalarının her bir çifti arasında Δx ve benzer olarak Δy için farklı bir değerdedir. Bununla birlikte CFD uygulamalarının çoğu, her bir doğrultuda üniform boşlukları içeren bir grid üzerinde nümerik çözümleri kapsar. Çünkü bu çözümün programlanmasını oldukça basitleştirir, ve genellikle daha iyi bir doğrulukla sonuçlanır. Bu üniform boşluklar fiziksel xy düzleminde olmak zorunda değildir; CFD'de sık sık olduğu gibi, nümerik hesaplamalar, fiziksel düzlemde üniform olmayan boşluklara karşılık gelen ama bağımsız değişkenler dönüştürüldüğünde üniform boşluklara sahip olan sayısal boşlukların dönüşümünde uygulanmaktadır.

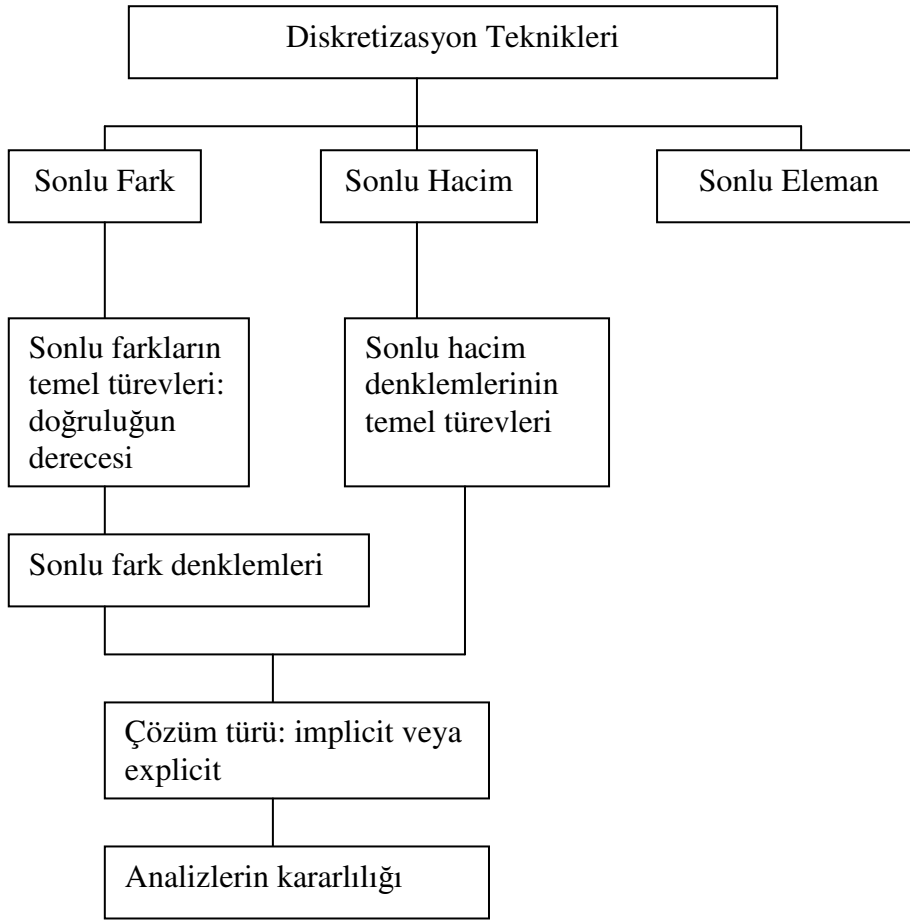


Şekil 2.10. Grid noktaları [2]

Şekil 2.10.'a dönüldüğünde x doğrultusundaki grid noktaları i indisi ile, y doğrultusundaki grid noktaları j indisi ile tanımlanmıştır. Böylece eğer (i, j) P noktası için indis ise, P noktasının hemen sağında kalan nokta $(i+1, j)$ olarak, aşağıdaki nokta ise $(i, j-1)$ olarak tanımlanır.

Navier-Stokes veya Euler denklemi ile tanımlanan iki boyutlu bir akım alanının var olduğu göz önüne alınsın. Bu denklemler kısmî diferansiyel denklemlerdir. Prensipde akışkanda seçilen herhangi bir noktada (domainde sınırsız sayıda (x, y) noktasının herhangi birinde) akım alanı için kullanılabilen, x ve y nin fonksiyonu olarak u, v, p, ρ, ν . için kapalı form ifadeler bu denklemlerin analitik bir çözümünü sağlayacaktır. Diğer taraftan tanımlayıcı denklemlerdeki kısmî türevler, Şekil 2.10.'de gösterilen belirli grid noktalarının iki veya daha fazlasında akım alanı değişkenlerine göre kesinlikle tanımlanmış olan cebirik fark bölümleriyle yer değiştirirse, daha sonra kısmî diferansiyel denklemler tümüyle sadece belirli grid noktalarında akım alanı değişkenlerinin değerleri için çözümü olan cebirik denklem sistemiyle yer değiştirir. Bu anlamda orijinal kısmî diferansiyel denklemler diskretize edilmiştir. Bu diskretizasyon metodu da sonlu farklar metodu olarak tanımlanır. Diskretizasyon teknikleri Tablo 2.1.'de verilmiştir [2].

Tablo 2.1. Diskretizasyon Teknikleri [2]



2.8.2. Fluent'te Çok Fazlı Akımlar İçin Modelleme Yaklaşımları

Fluent' te iki tip çok fazlı model vardır. Bunlar Euler - Euler ve Euler - Lagrange yaklaşımlarıdır.

Euler - Lagrange yaklaşımında, dispers faz birçok parçacık, kabarcık veya damlacığın hesaplamalı akış alanı boyunca izlenmesiyle çözüldüğünde zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin çözümü vasıtasıyla akışkan faz bir süreklilik gibi muamele görür. Dispers faz akışkan, fazla momentum, kütle ve enerji alışverişi yapabilir.

Bu modelde temel bir kabul yapılır; yüksek kütle beslemeleri ($m_{\text{parçacık}} \geq m_{\text{akışkan}}$) makul olsa bile, dispers ikinci faz düşük bir hacim kesrini işgal eder. Parçacık veya damlacık yörüngeleri akışkan faz hesaplamaları boyunca özelleştirilmiş aralıklarda teker teker çözülmektedir. Bu sprey kurutucular, kömür ve sıvı yakıtların yanması ve bazı parçacık yüklü akışların modellenmesi için uygun bir model oluşturur ama sıvı - sıvı

karışımları, akışkan yataklar veya ikincil fazın hacim kesrinin ihmal edilmediği herhangi bir uygulamanın modellenmesi için uygun değildir [9].

Euler – Euler yaklaşımında ise, farklı fazlar matematiksel olarak birbirinin içine işleyen bir süreklilik gibi muamele görmektedir. Bir fazın hacmi diğer faz tarafından işgal edilemez. Bu hacim kesirleri yer ve zamanın sürekli fonksiyonları olarak kabul edilir ve bunların toplamı bire eşittir. Her bir faz için korunum denklemleri her faz için benzer yapıya sahip denklemlerin bir grubunun elde edilmesinden elde edilmektedir.

Fluent'te üç farklı Euler–Euler çok fazlı modeli bulunmaktadır. Birisi akışkanın hacmi modeli (VOF), karışım modeli ve Eulerian modeldir [9].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kömür ve Kül numunesinin Temini ve Hazırlanması

Deneyleerde kullanılan kömür ve kül numuneleri Türkiye Kömür İşletmeleri'ne bağılı Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesindeki Afşin-Elbistan Kömür İşletmeleri ve Termik Santralinden temin edildi. Tesisten alındığında nemli olan kömür numunesi önce, kuruması için bir müddet plastik tepsiler içerisinde bırakıldı. Daha sonra kuruyan numunenin topaklaşan kısımların parçalanması amacı ile numune havanda öğütüldü. Öğütülen numune +150, -150+106, +106-75, +75-53 şeklinde bir elek serisi hazırlanarak boyutlandırıldı. Aynı elek serisi kül numunesinin boyutlandırılması amacı ile de kullanıldı. Kömür numunesine ait yoğunluk değeri 1150 kg/m³ kül numunesine ait yoğunluk değeri ise 700 kg/m³ olarak belirlendi.

Boyutlandırılan numuneler plastik torbalar içerisinde alınarak üzerlerine boyutları yazıldı. Pnömatik taşınım sistemine eklenecek olan yeni dizayn ile ilgili deneyleerde bu numuneler kullanıldı.

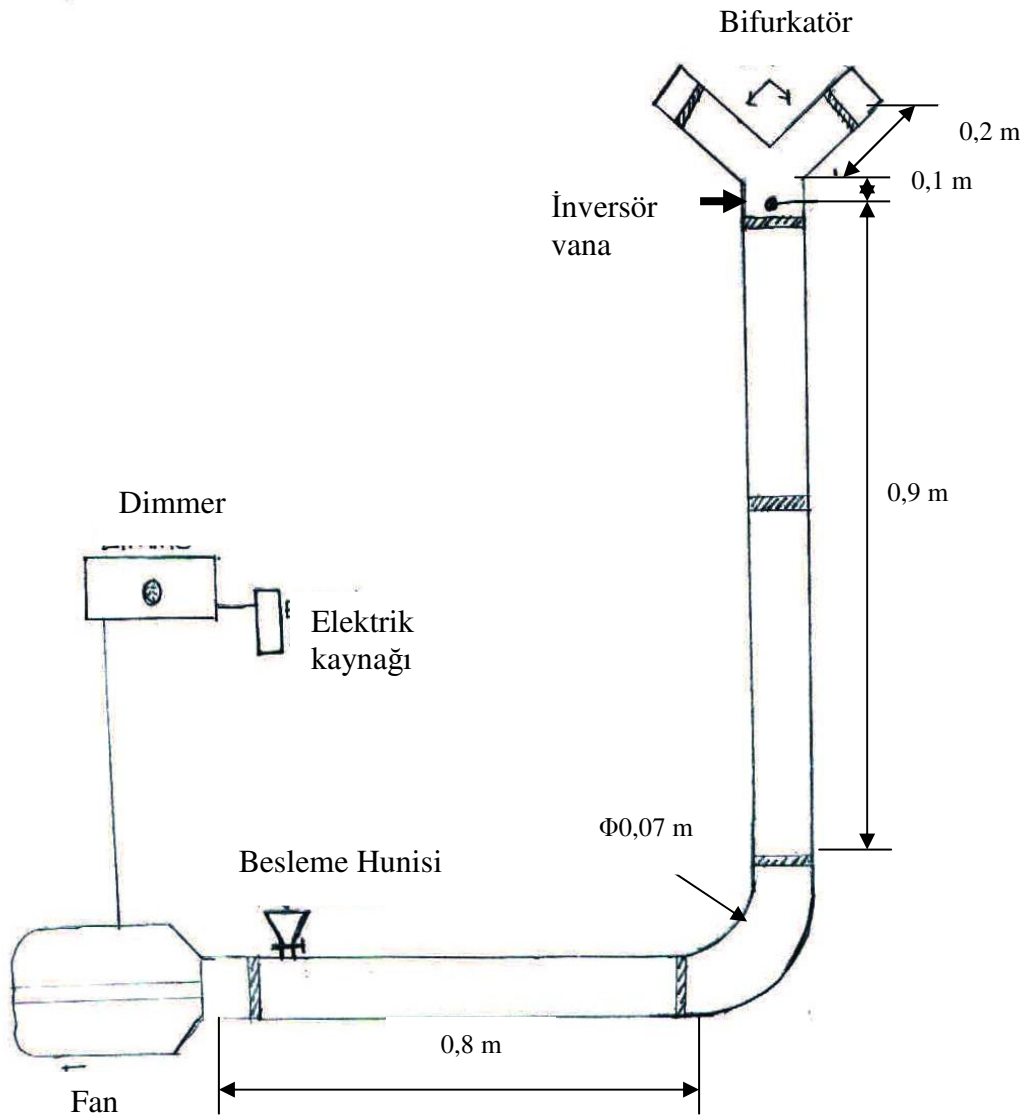
3.2. CFD Çözücüsünün Temini

Modelleme amacı ile kullanılan FLUENT çözücüsü ve GAMBIT katı modelleme önışlemcisi, TUBITAK desteğı ile Anova Ltd.Şti.'nden temin edildi. Programın kullanımı ile ilgili eğitim 26-28 Ocak 2005 tarihinde Ankara'da firma yetkilileri tarafından verildi.

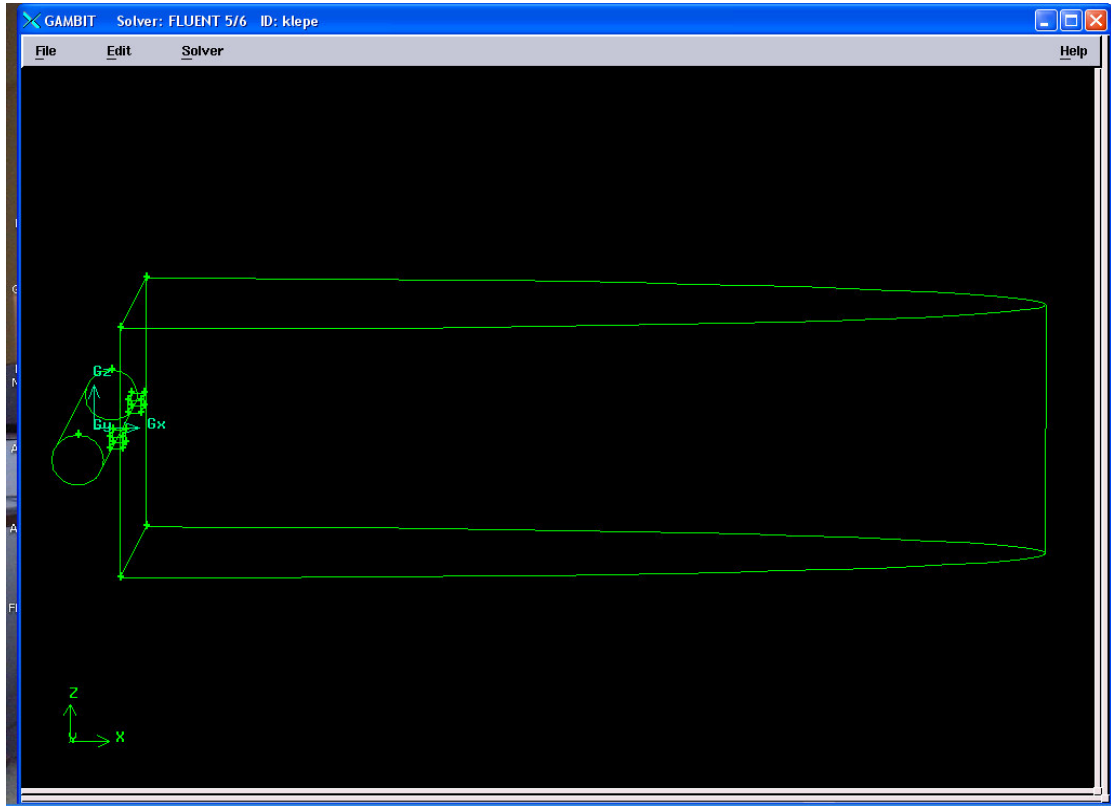
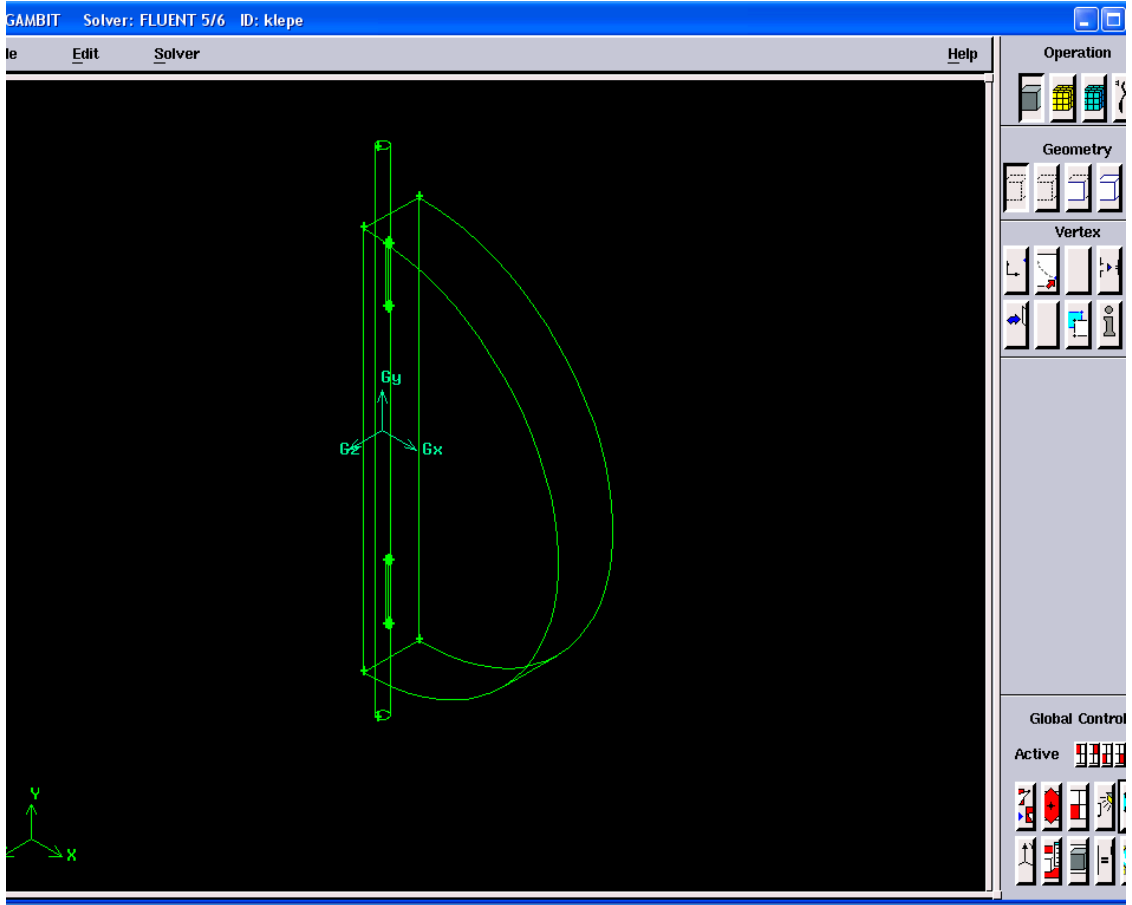
3.3. Deneyleerde Kullanılan Düzenek

Modelleme sonuçlarının doğrulanması ve sisteme eklenecek dizayn için yapılan deneyleerde aşağıda şekli görülen sistem kullanıldı (Şekil 3.1.). Sistemi oluşturan borular ve ek parçaları plastik gri borular olup kullanılan boru çapı ise 0,07 m dir. Yatay boru uzunluğu 0,8 m, dikey boru uzunluğu ise 0,9 m dir. İki kollu akım ayırıcınının her bir kolunun çapı 0,5 m ve kol uzunlukları 0,2 m dir. Sistemin girişinde bir adet fan bulunmaktadır. Y şeklindeki kısımda ise parçacıklar ile havayı ayırmak ve kollar arası ayrılmanın derecesini belirlemek amacıyla elektrik süpürgelerinde kullanılan toz torbalarından faydalanıldı. Tartım işlemi için ±0,01 g hassasiyete sahip bir terazi

kullanıldı. Sistemde oluşacak elektriklenmenin önüne geçmek için de topraklama işlemi yapıldı. Böylelikle boruların cidarında parçacık elektriklenmesinden doğan birikmeler engellenmiş oldu ve daha doğru bir ölçüm yapılması sağlandı. Kollar arası eşit bir ayırma sağlanması amacıyla tasarlanan eleman bir tür inversör vana olmakla beraber tam olarak Y şeklindeki parçanın girişine takıldı. Yarım daire şeklindeki parça borunun yarısını kaplayacak şekilde yani 0,035 m çapında olduğundan sağa kapalı iken akımı sola, sola kapalı iken akımı sağa iletmektedir (Şekil 3.2.). Bu eleman için optimum açı değeri belirlenerek her iki kola da eşit miktarda bir ayırma sağlandı.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan düzenek

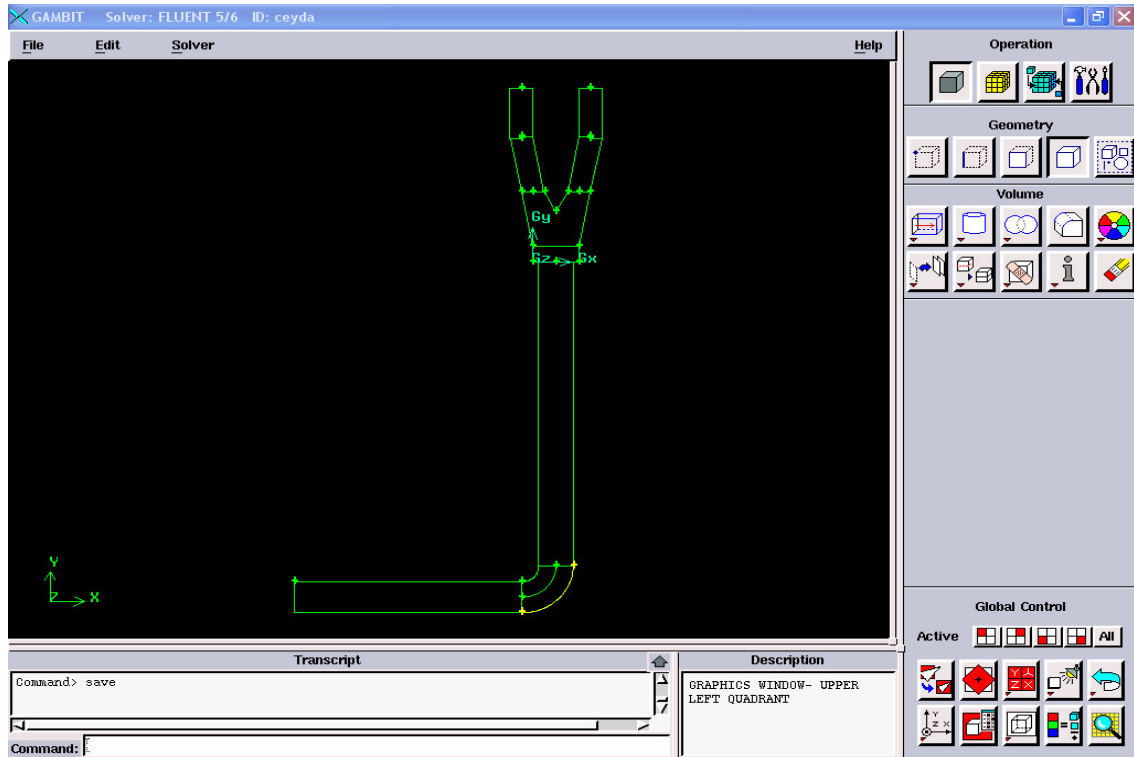


Şekil 3.2. Sisteme eklenen inversör vananın şekli

3.4. GAMBIT 'te Katı Modelin Oluşturulması

Modellenecek olan sistemin ilk modelleme aşaması bilgisayar ortamına sistem geometrisinin girilmesidir. Kullanmış olduğumuz FLUENT çözücüsü tüm CAD programlarından geometri alabilme özelliğine sahiptir. Ancak bu çalışmada hem hacim hem de mesh oluşturulabilen, FLUENT'e ait önışlemci olan GAMBIT kullanılarak geometrinin bilgisayar ortamına aktarılması ve sonraki adım olan mesh atma işlemi gerçekleştirildi.

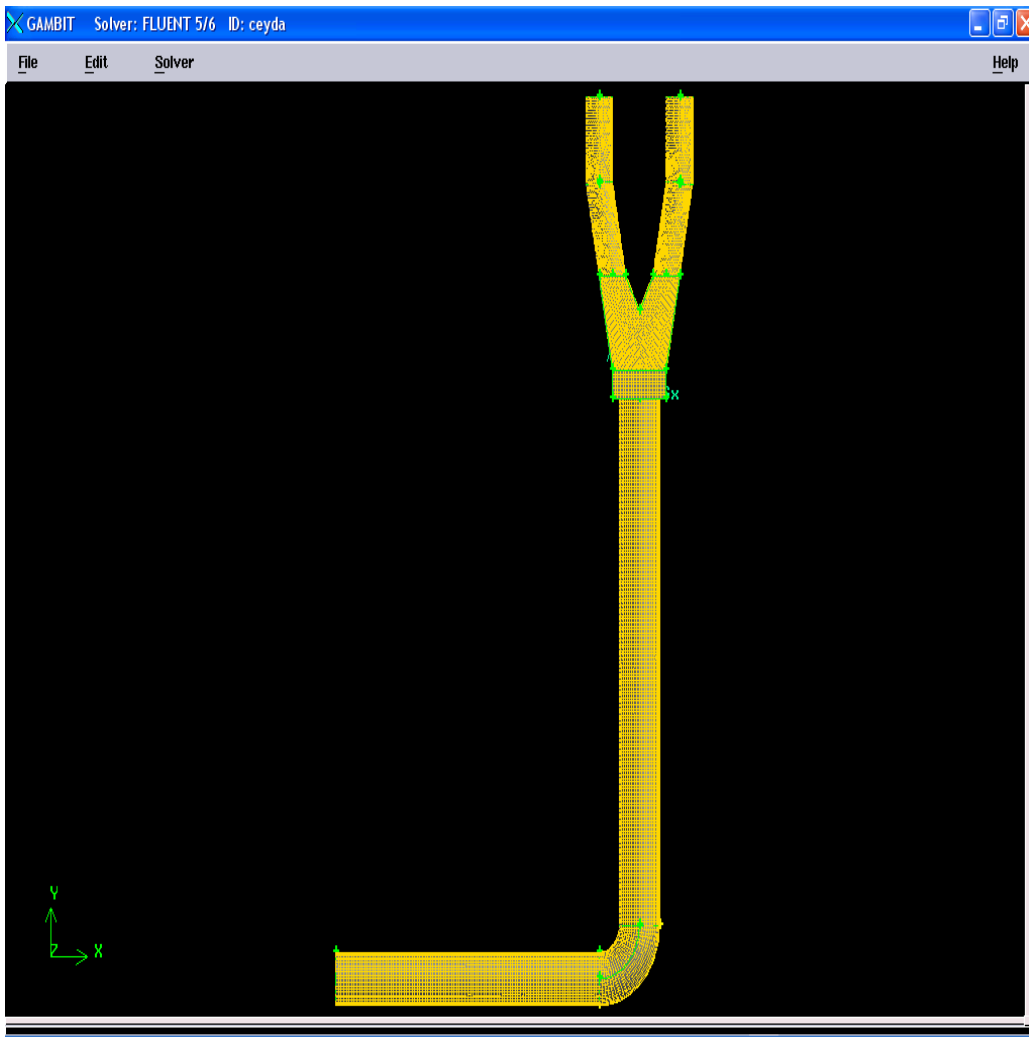
Şekil 3.1.'de verilmiş olan deney düzeneğini çizmek için GAMBIT önışlemcisinde bulunan hacim oluşturma elemanları kullanıldı. Boru geometrisinin çizilmesi "silindir" alt menüsü ile, dirsek geometrisinin çizilmesi ise "swap face" alt menüsü ile gerçekleştirildi. Çizilen düz borular ile dirsek "unite" alt menüsü kullanılarak birleştirildi. Çatal kısım şu şekilde çizildi: Öncelikle "brick" alt menüsü ile alt parça, bunun üzerine de sistemin ölçülerine göre noktalar belirlenerek Y şeklindeki kısım oluşturuldu ve "sweep" ile uzatıldı. Üst kısım ise "silindir" alt menüsü yardımı ile çizilerek tüm parçalar "unite" alt menüsü ile birleştirildi. Sistem geometrisi böylece toplamda üç parçadan oluşturuldu (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. GAMBIT'e aktarılmış sistem geometrisi

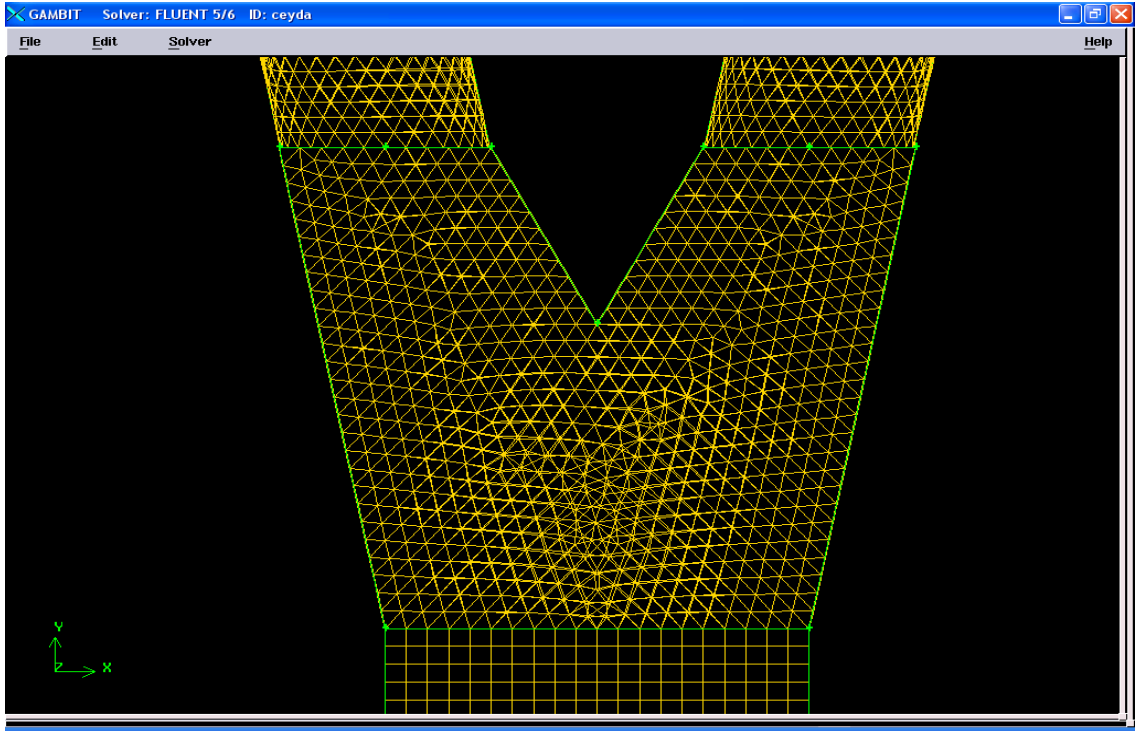
Modellemenin geometri çiziminden sonraki aşaması mesh atma işlemidir. Bu işlem bütün hesaplamaların temelini oluşturduğundan önışlem kısmının en önemli kesimidir. Daha önce de belirtildiği gibi en uygun sayıda ve en uygun topolojide mesh atılmalıdır. Bu çalışmada sistemi oluşturan üç parça için ayrı ayrı mesh atıldı. Mesh atma işlemi için hacim meshleme alt menüsünden yararlanıldı.

Yatay ve dikey borular, dirsek ve Y şeklindeki kısmın alt parçasına "Hex/Wedge – Cooper" mesh tipi ile mesh atıldı. Y şeklindeki parçaya ise "Tet/Hybrid-TGrid" ile mesh atıldı (Şekil 3.4.). Mesh aralığı olarak "1" seçildi. Sistemde toplam 79510 adet mesh bulunmaktadır.

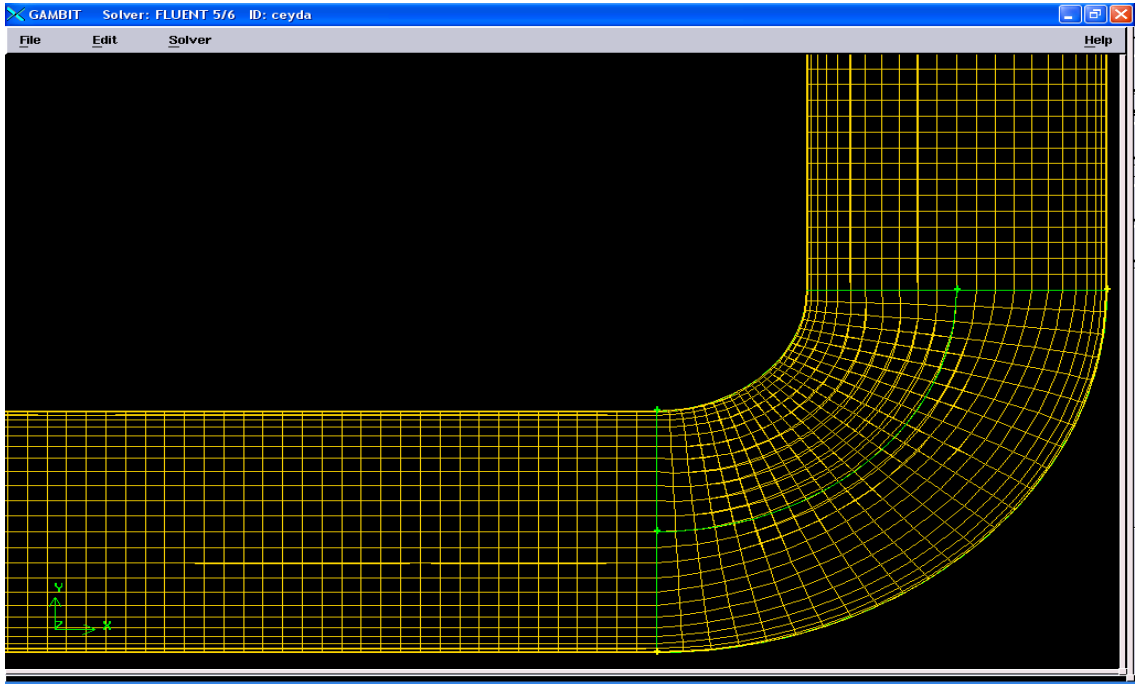


Şekil 3.4. Mesh atılmış sistem geometrisi

Konuşan meshlere örnek olarak Şekil 3.5. verilmiştir. Şekil 3.6. ise dirsek ve düz borularda mesh yapısı görülmektedir.

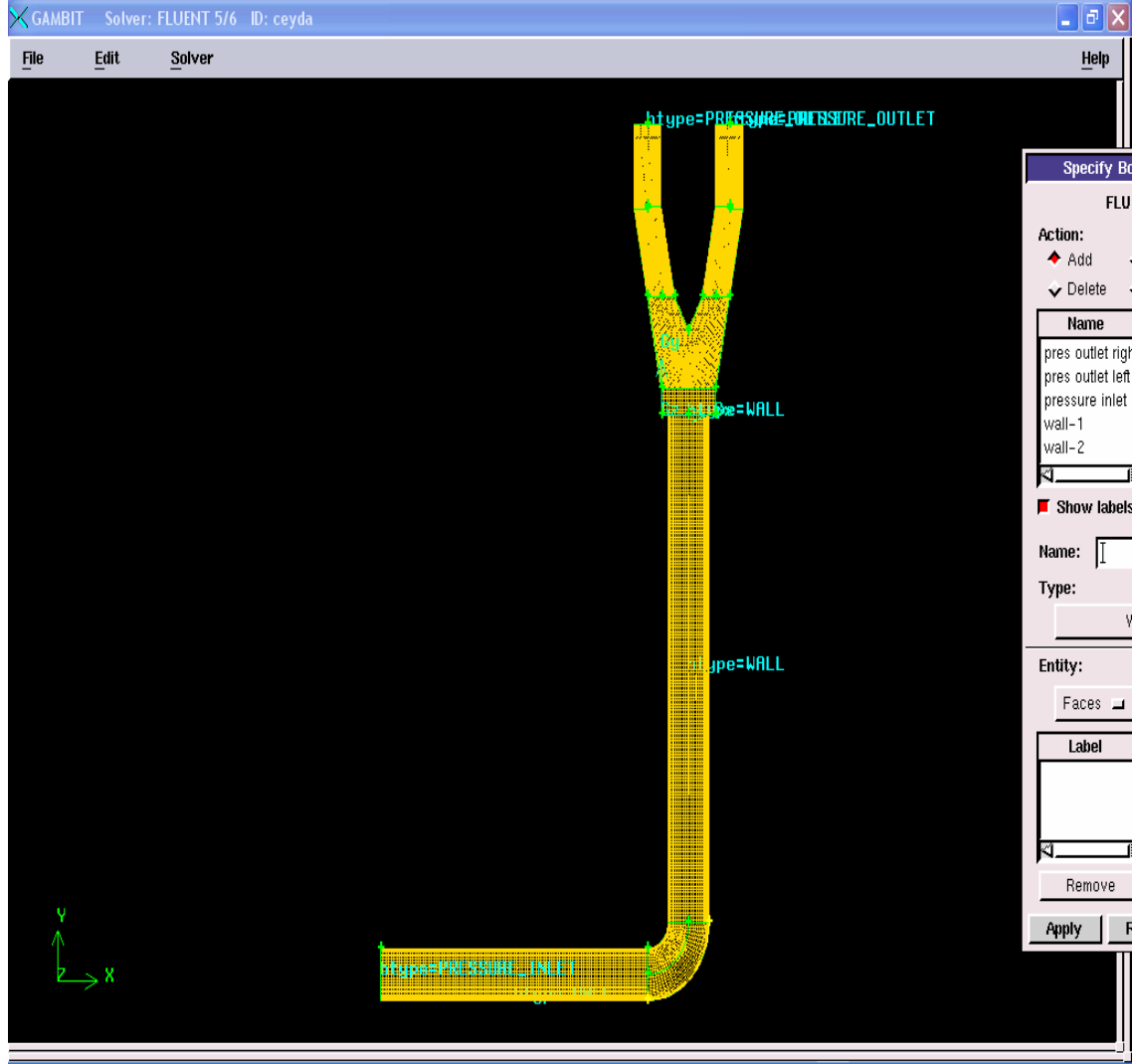


Şekil 3.5. Konuşan meshler



Şekil 3.6. Dirsek ve düz borularda mesh yapısı

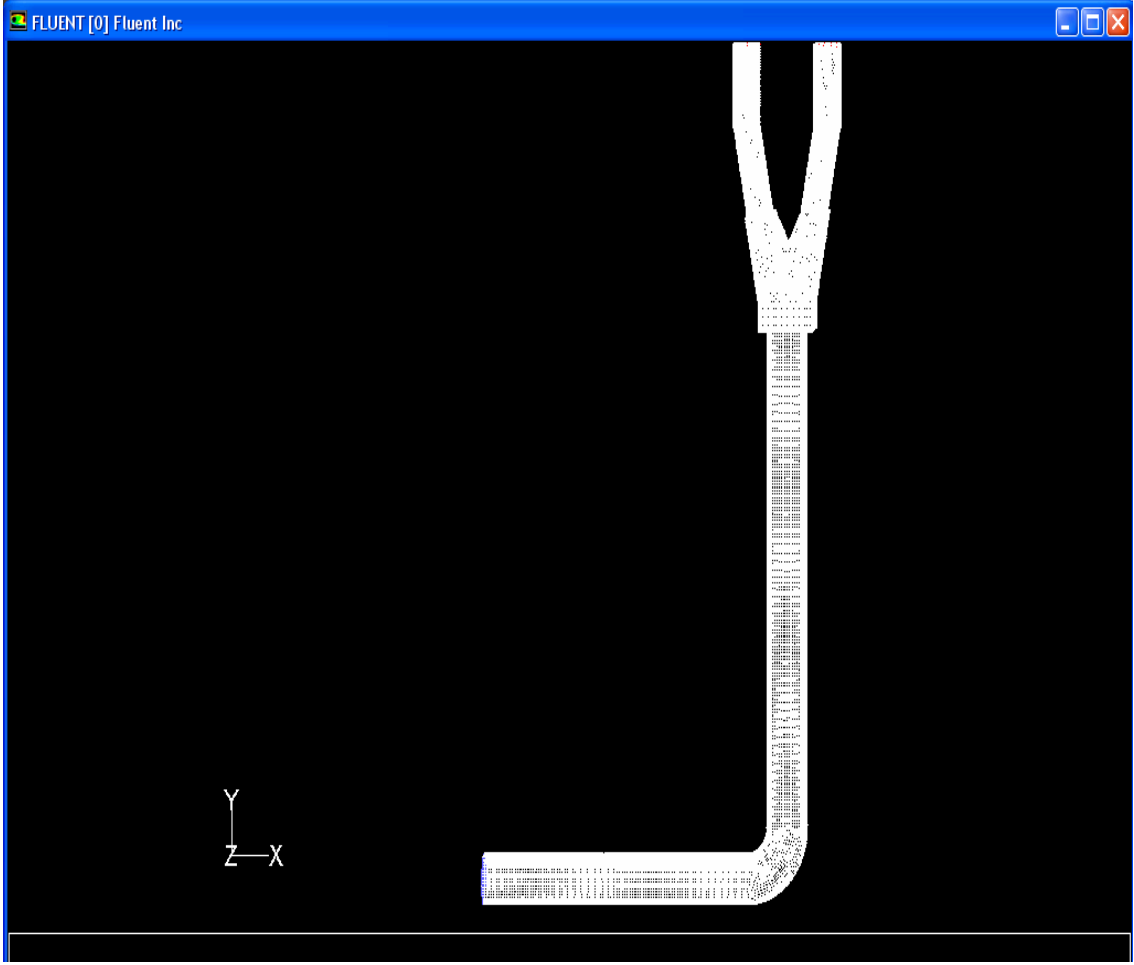
GAMBIT'e ait son işlem sınırların belirlenmesidir. Burada basınç giriş-çıkışları, duvarlar, hız giriş-çıkışları belirlenerek tanımlama işlemi yapıldı (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Sınır koşulları belirlenmiş sistem geometrisinin son hali

3.5. FLUENT'te Çözüm İşlemlerinin Gerçekleştirilmesi

GAMBIT'te FLUENT için hazır hale getirilen sistem geometrisi "File→Read→Case" menüsü kullanılarak çözücüye okutuldu. Okutma işlemi sonrasında "Grid→Check" ile okutulan geometrinin kontrolü yapıldı. "Display Grid" menüsü kullanılarak aktarılan sayısal ağın ekranda görüntülenmesi sağlandı (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Gridin görüntülenmesi

"Define" menüsünde bulunan "Models, Materials, Boundary Conditions ve Operation Conditions" alt menüleri ile modelleme için kullandığımız tüm değerler bilgisayara aktarıldı. Çözücü olarak "Segregated" çözücünün implicit formulasyon tekniği seçildi. Bu çözücü genellikle kararlı akım çalışılırken kullanılmakta ve sadece implicit formulasyon ile çalışmaktadır. Çözücü seçilmesinin ardından sırasıyla; kullandığımız türbülans modeli olarak $k-\epsilon$ modeli seçildi ve enerji denkleminin de hesaplamalara katılması için denklemin seçimi işlemi yapıldı. Çalıştığımız sistem çok fazlı akış olduğundan ilgili düzenlemeler yine "Define" menüsü vasıtasıyla yapıldı. Bu işlemi takiben hesaplamalar için gerekli işlem ve sınır koşulları tanımlandı. Çözüme başlamak için "Solve" menüsü kullanıldı. İterasyonların nasıl ilerlediğini görebilmek için "Monitors→Residual" açıldı. Aynı zamanda buradan istenen yakınsama değeri de belirlendi. Ardından hesaplamaları başlatmak için "Initialize" alt menüsünden ilk

değerler girildi ve "Iterate" alt menüsü açılarak istenen iterasyon sayısı gibi değerler verilerek iterasyonlar başlatıldı.

3.6. Deneysel Çalışma

Modelleme sonucunda elde edilen sonuçların kontrolü, sisteme eklenen elemanın optimum çalışma durumunun belirlenmesi amacı ile Şekil 3.1.'de gösterilen deney düzeneği ve hazırlanan kömür-kül numuneleri ile deneyler yapıldı.

3.6.1. Sisteme Eklenen İversör Vana İle İlgili Deneyler

Sisteme ait bazı verilerin belirlenmesi amacı ile bazı ön deneyler yapıldı. Öncelikle sisteme verilen havanın hızı fana bağlanan dimmer vasıtası ile ayarlandı. Dimmer fanın gücünün ayarlanmasını sağladığından, hava hızı için bir nevi vana olarak kullanıldı. Hızın artırılması ve azaltılması buradan yapıldı. Hava hızı olarak 20 m/s değeri kullanıldı. Bu hızdaki hava için hava/yakıt oranı 3 olarak alındı. Hava/yakıt oranının 3 olduğu durum için ilk olarak besleme hunisinin vana ayarının yapılması amacıyla $\pm 0,01$ g hassasiyetle tartılan 33.11g kül numunesi kullanıldı. Bu amaçla numune huniye boşaltılarak 1s içerisinde sabit hava hızında numunenin havayla taşınabildiği vana açıklığı ayarlandı. Elde edilen vana açıklığı korunarak, kül için, hava/yakıt oranının 3 olduğu durumda sisteme eklenen elemanın eşit ayırma sağladığı açı değerini bulmak amacı ile değişik parçacık boyutları için kullanıldı. Kömür numunesi için de 33.11 g madde miktarı için aynı ön deneyler yapılarak kullanılacak vana açıklığı belirlendi.

Sistematik olarak yapılan deneylerde ise sırasıyla şu işlemler uygulandı: önceden boyutlandırılmış olan kül numunelerinden -150+106 μm boyutlu olanı alındı. Numuneden $\pm 0,01$ g hassasiyetle 33.11 g tartıldı. İki adet toz torbası alınarak bunların da $\pm 0,01$ g hassasiyetle tartımları alındı. Sisteme eklenen eleman tamamen açık konumda iken torbalar Y şeklindeki elemanın iki koluna takılarak parçacık ve hava kaçırmaması için sıkıca bağlandı. Dimmer ile hava hızı ayarlanarak besleme hunisine tartılan parçacık boşaltıldı. Sistem yaklaşık bir dakika çalıştırılarak durduruldu. Her iki koldaki toz torbası çıkarılarak tekrar $\pm 0,01$ g hassasiyetle tartımları alındı. Sisteme verilen parçacık miktarı ile kollardan alınan parçacık miktarı oranlanarak hangi kola ne oranda madde gittiği saptandı. Daha sonra inversör vana için deneylere geçildi. Madde

miktarı fazla olan tarafa doğru inversör vana kapatılarak iki koldaki madde miktarı eşit olana dek aynı işlemler tekrarlandı. İki kolda eşit madde miktarı sağlandığı durumda inversör vana açısı değeri iletkeni ile ölçülerek -y eksenine göre yaptığı açı ölçüldü. Bu açı değeri -150+106 µm boyutlu kül numunesi için kullanılacak optimum açı değeri olarak kaydedildi.

Aynı deneyler -106+75, -75+53, -53 µm boyutlu kül numuneleri ve -150+106, -106+75, -75+53, -53 µm boyutlu kömür numuneleri için tekrarlanarak her bir parçacık boyutu için optimum açı değeri ile kollara ayrılan madde miktarları saptandı.

3.6.2. Modelleme Sonucunda Bulunan Veriler İçin Yapılan Deneyler

Parçacık çapı için yapılan modelleme çalışmalarının sonuçlarının kontrolü amacı ile yapılan deneylerde, 1150kg/m³ yoğunluğa sahip -150+106, -106+75, -75+53, -53 µm şeklinde boyutlandırılmış kömür numuneleri kullanılarak parçacık çapının ayrılmaya etkisi incelendi. Sabit olarak 20 m/s hava hızı ve 33.11 g/s parçacık kütle besleme hızı kullanıldı. Deneyler yapılırken inversör vana tam açık konumda bulunduruldu. Her bir parçacık boyutu için kollara giden miktarlar ölçüldü. Bu sayede parçacık boyutunun artması ile kollar arası ayrılmanın ilişkisi belirlendi ve modellemede bulunan sonuçların kıyaslaması yapıldı.

Parçacık yoğunluğu için yapılan modelleme çalışmalarının kontrolü amacı ile yapılan deneylerde, 700 ve 1150 kg/m³ yoğunluklu, 1-10-30-53-75-106-150 µm boyutlu kül ve kömür numuneleri kullanılarak parçacık yoğunluğunun ayrılmaya etkisi incelendi. Sabit olarak 20 m/s hava hızı ve 33.11 g/s parçacık kütle besleme hızı kullanıldı. Deneyler yapılırken inversör vana tam açık konumda bulunduruldu. Her bir yoğunluk değeri için kollara giden miktarlar ölçüldü. Elde edilen sonuçlar ile modellemede bulunan sonuçların kıyaslaması yapıldı.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada toz kömürün pnömatik olarak taşındığı boru hatlarında akımın kollara ayrılmasını sağlayan iki kollu bir ayırıcı için kollar arasında eşit bir ayırma sağlamaya yönelik bir araştırma yapılmıştır. Bu amaçla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemlerinden yararlanılmış ve sonuçların doğrulanması adına laboratuvar ölçekli deneyler yapılmıştır.

4.1. Modelleme ve Parametre Çalışmaları

Bu çalışmada sistemin bilgisayarda modellenmesi ve parametre çalışmalarının yapılabilmesi için bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kodu olan FLUENT ve önışlemcisi GAMBIT kullanılmıştır. Sistem geometrisi ve çalışma koşullarına dair tüm veriler çözücüye girilerek parçacık çapı, parçacık besleme açısı ve yeri, parçacık yoğunluğu için sistemin analizi yapılmıştır. Modelleme için kullanılan veriler Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Modellemede Kullanılan Veriler

Hava/yakıt oranı	3 kg/kg
Hava besleme hızı	20 m/s
Yakıt besleme hızı	33.11 g/s
Yakıt yoğunluğu	700-1150kg/m ³
Reynolds sayısı	97621,62

4.1.1. Parçacık Çapı

Parçacık çapının kollar arası ayrılmaya etkisini incelemek amacıyla 1-10-30-53-75-106-150 µm boyutlu parçacık çapları kullanılmıştır. Parçacık çaplarının belirlenmesi laboratuvarında var olan eleklerle göre yapılmıştır. 1-10-30 µm çapları için modelleme, çok küçük boyutlardaki parçacıkların davranışlarının izlenmesi ve herhangi bir elamana gereksinim duyulmadan bir ayrılma olup olmadığını kontrol etmek amacı ile yapılmıştır. Akım hattında dirsek benzeri eğimlerin bulunması halinde parçacıklar eğim doğrultusunda, duvara yakın bir şekilde ve genellikle birikmiş bir halde ilerlerler. Borunun ilerleyen kısımlarında ise bu birikimler dağılır [1]. Ancak boru yeteri kadar

uzun değil ise ve de çoklu kollara ayrılıyor ise parçacıklar eğime yakın tarafa daha fazla miktarda gidecektir. Analiz sonucunda bulunan nümerik değerler Tablo 4.2.' nin ilk satırında bunların yüzde olarak ifadesi ise Tablo 4.2.' nin ikinci satırında verilmiştir. verilmiştir. Elde edilen sonuçlar parçacıkların daha çok sağ kola gitme eğiliminde olduğunu ve parçacık boyutu arttıkça daha fazla miktardaki parçacığın sağ tarafa ayrıldığını göstermiştir. Bu analiz sisteme salınan parçacık sayısı yöntemi yardımıyla yapılmıştır. Parçacıkların sağ tarafa yönelmesinin sebebi olarak sistemde yer alan dirseğin varlığı ve yönü düşünülmüştür. Burada zaten eğim doğrultusunda gitmeye meyilli olan parçacıkların; hareket kabiliyetlerinin azalması, kendilerini sürükleyecek daha büyük sürüklenme kuvvetine ihtiyaç duymaları [23] gibi sebepler dolayısı ile ya akımı takip edememesi (veya çökmesi) ya da eğimi takip eden parçacık birikmesi ile hareket etmesi, durumunu doğrulamaktadır. Model çalışmalarında elde edilen sonuçlarda akımın eşit olarak kollara ayrıldığı durumlar görülmektedir (53 ve 150 µm). Ancak bizim amacımız kollar arasında eşit ayırmayı sağlarken aynı zamanda parçacık besleme noktasında ayarlanan hava/yakıt oranından sapmayacak bir durum sağlamaktır. Bu nedenle bahsedilen durumlarda salınan parçacıkların tamamının eşit ayrılması söz konusu olmadığından ve tam bir ayırma sağlanamadığından dolayı gerçekten de sisteme eklenecek bir elemana veya yeni bir dizayna ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra modelleme sonuçlarına göre sisteme yeni bir eleman eklenmeden kollar arasında ayrılmanın sağlanabildiği maksimum boyut 30 µm olarak bulunmuştur.

Tablo 4.2. Parçacık Büyüklüğüne Bağlı Dağılım İçin Modellemede Elde Edilen Sonuçlar

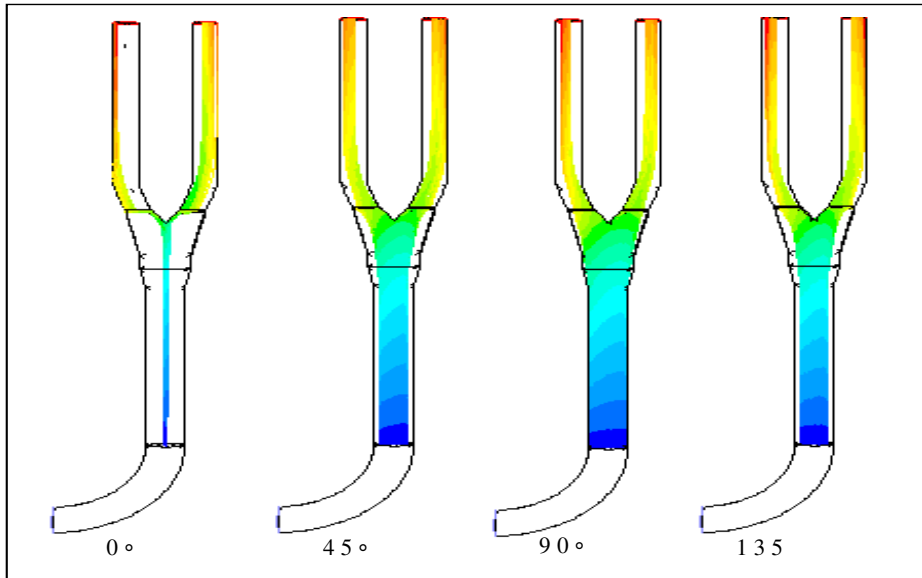
Boru hattına salınan parçacık sayısı	Parçacık çapı (mikron)													
	1		10		30		53		75		106		150	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
5	2	3	2	3	3	2	2	2	3	2	0	5	2	2
5	%40	%60	%40	%60	%60	%40	%40	%40	%60	%40	%0	%100	%40	%40
100	50	48	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
100	%50	%48	%50	%50	%50	%50	%50	%50	%50	%50	%50	%50	%50	%50

Dirseğin varlığı ve yönünün akımın iletilmesi hususunda ne kadar etkili olduğunu belirlemek amacı ile parçacık beslemesi dirsekten sonraki bir noktadan yapılarak bu durum incelenmiştir. Modelleme çalışmasında bulunan sonuçlar kollar

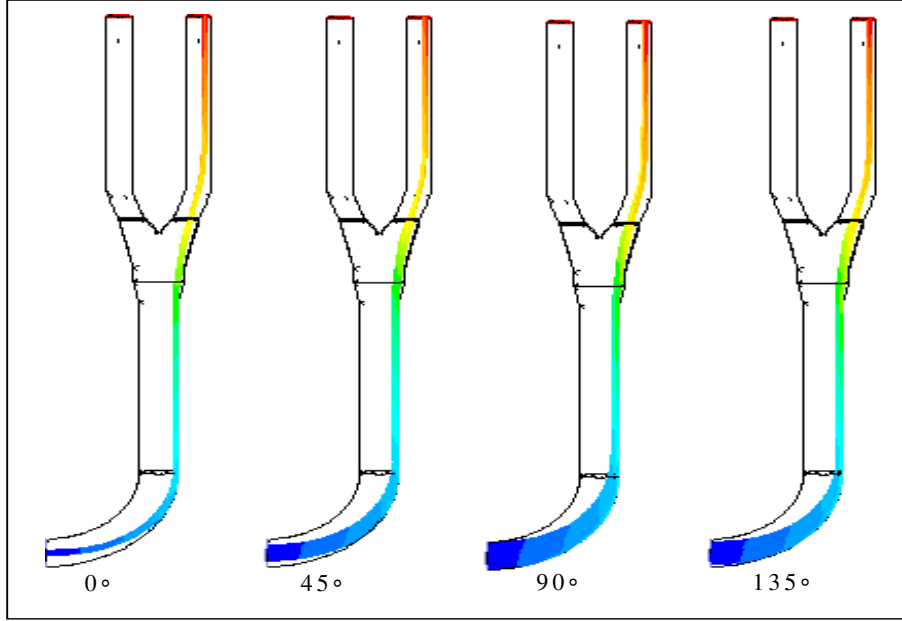
arası % fark cinsinden Tablo 4.3.'te verilmiştir. Burada parçacık boyutu sabit olarak 30 µm olarak kullanılmıştır. Şekil 4.1.'de beslemenin dirsekten önce yapıldığı durum için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi, Şekil 4.2.'de ise beslemenin dirsekten sonra yapıldığı durum için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi verilmiştir.

Tablo 4.3. Dirsek Besleme Açısı ve Şekli ile İlgili Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar

Partikül besleme noktası (derece)	% Fark (dirsekten sonra)	% Fark (dirsekten önce)
0	23	100
45	15	100
90	12	100
135	22	100



Şekil 4.1. Dirsekten sonra yapılan besleme için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi



Şekil 4.2. Dirsekten önce yapılan besleme için modelleme sonuçlarının görüntülenmesi

4.1.2. Parçacık Yoğunluğu

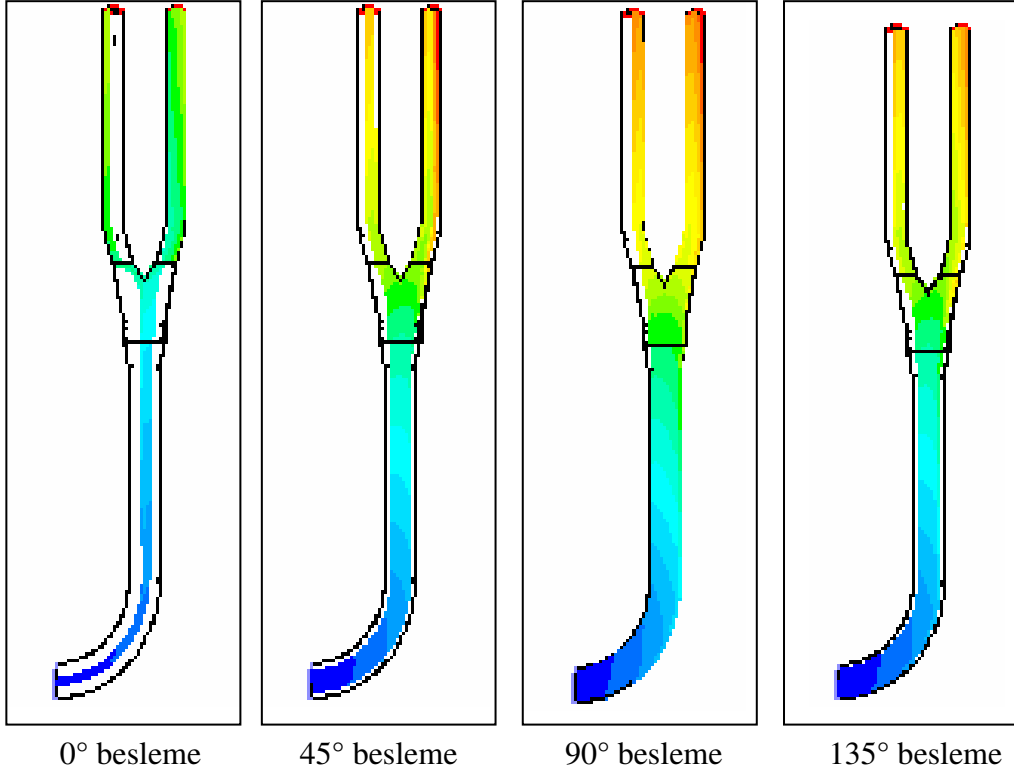
Parçacık yoğunluğunun kollar arası ayrılmaya etkisini incelemek amacıyla 700 ve 1150 kg/m³ yoğunluklu, 1-10-30-53-75-106-150 µm boyutlu parçacıklar kullanılmıştır. Besleme açısı olarak da 90° alınmıştır. Elde edilen nümerik sonuçlar ve bunların kollar arası yüzde fark cinsinden değerleri Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.'de verilmiştir. Burada parçacıkların yoğunluklarının artması ile yerçekimine karşı koyarak akımı takip edebilmeleri için daha büyük bir kuvvete ihtiyaçları olmaktadır. Parçacıklar, boyutun büyümesi ile daha büyük bir sürükleme kuvvetinin yanında yoğunluğun artması ile de daha büyük bir kaldırma kuvvetine ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla bu tür durumlarda akımın kollara ayrılmasından önce parçacıkların akım tarafından taşınmaması sorunu ile karşılaşmaktadır. Bu da sistemde kullanılması gereken parçacıklara ait boyutun ve yoğunluğun çok büyük olmaması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de ise iki farklı yoğunluk değeri için elde edilen modelleme sonuçlarının görüntülenmesi verilmiştir.

Tablo 4.4. Parçacık Yoğunluğuna Bağlı Dağılım İçin Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (100 adet parçacık için)

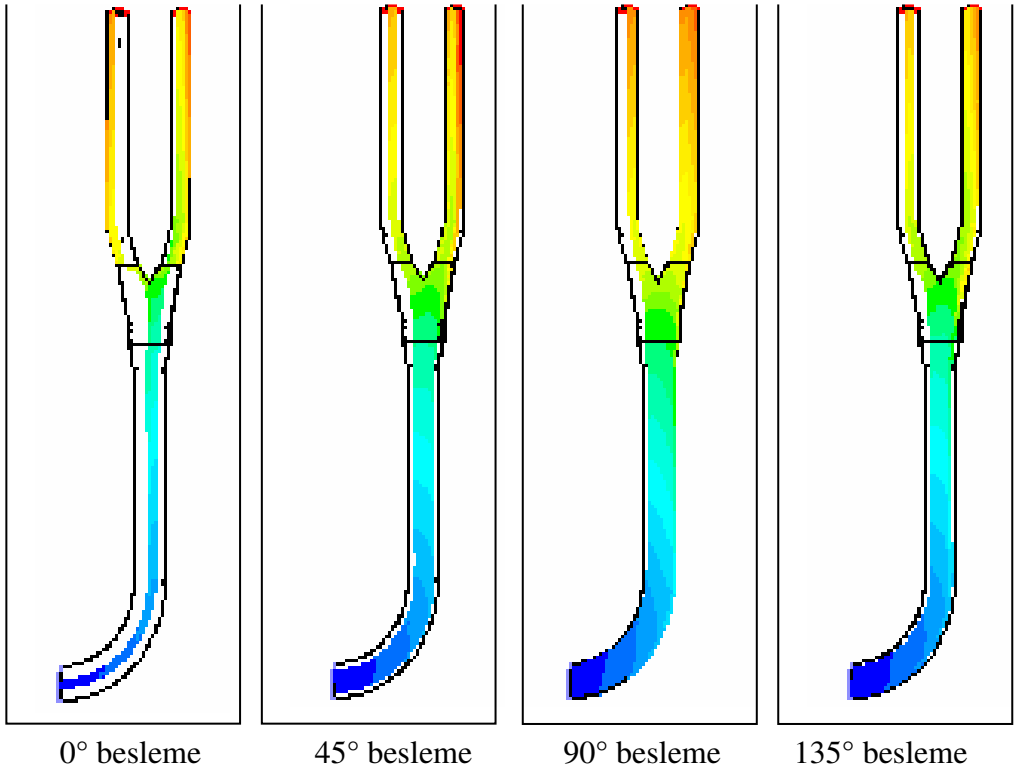
Örnek Cinsi	Parçacık çapı (mikron)													
	1		10		30		53		75		106		150	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
Toz kömür	30	69	27	63	0	99	1	98	1	99	1	99	1	99
Kül	32	67	30	70	1	99	0	100	0	100	0	100	0	100

Tablo 4.5. Parçacık Yoğunluğuna Bağlı Dağılım İçin Modellemede Elde Edilen Sonuçların Kollar Arası Yüzde Fark Cinsinden Değeri (100 adet parçacık için)

Örnek Cinsi	Parçacık çapı (mikron)						
	1	10	30	53	75	106	150
Toz kömür	39	36	99	97	98	98	98
Kül	35	40	98	100	100	100	100



Şekil 4.3. 700 kg/m^3 yoğunluk değeri için parçacık yoğunluğu modelleme sonuçlarının görüntülenmesi



Şekil 4.4. 1150 kg/m^3 yoğunluk değeri için parçacık yoğunluğu modelleme sonuçlarının görüntülenmesi

4.1.3. Parçacık Besleme Açısı

Parçacık besleme açısının kollar arası ayrılmaya etkisini incelemek amacıyla 700 ve 1150 kg/m³ yoğunluklu, 1-10-30-53-75-106-150 µm boyutlu parçacıklar ile besleme açısı olarak 0-45-90-135° değerleri kullanılmıştır. Besleme açısının kollar arası ayrılmada etkisinin olduğu görülmüştür. Burada parçacık beslemesinin 90° olduğu durum en uygun besleme açısı olarak bulunmuştur. Yataydan farklı bir açıyla beslenen parçacıklar havayla taşınırken, dirsekten önce herhangi bir şekilde duvara çarparak enerji kaybedeceğinden akımdan ayrılması ve duvarda dirsekten önceki bir noktada birikmesi-erozyona sebep olması gibi durumları ortaya çıkarır. Bu da zaten istenmemektedir. Modelleme sonucu elde edilen nümerik sonuçlar Tablo 4.6. ve Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Çeşitli Tanecik Boyutundaki Kül Numunesi İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 700 kg/m³)

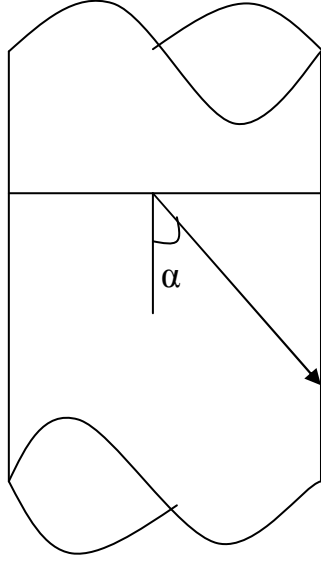
Parçacık besleme açısı	Sol koldaki parçacık sayısı	Sağ koldaki parçacık sayısı	Kollar arası % fark	
1 Mikron Çapındaki Parçacık	0	20	79	59
	45	26	72	46
	90	32	67	35
	135	26	74	84
10 Mikron Çapındaki Parçacık	0	18	81	63
	45	24	74	50
	90	30	70	40
	135	23	75	52
30 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100	100
	45	0	98	98
	90	1	99	98
	135	0	99	99
53 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100	100
	45	0	98	98
	90	0	100	100
	135	0	100	100
75 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100	100
	45	0	98	98
	90	0	100	100
	135	0	100	100
106 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100	100
	45	0	98	98
	90	0	100	100
	135	0	100	100
150 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100	100
	45	0	98	98
	90	0	100	100
	135	0	100	100

Tablo 4.7. Çeşitli Tanecik Boyutundaki Toz Kömür Numunesi İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 1150 kg/m³)

Parçacık besleme açısı	Sol koldaki parçacık sayısı	Sağ koldaki parçacık sayısı	Kollar arası % fark
1 Mikron Çapındaki Parçacık	0	18	63
	45	24	51
	90	30	39
	135	25	49
10 Mikron Çapındaki Parçacık	0	16	67
	45	22	56
	90	27	36
	135	19	61
30 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100
	45	0	97
	90	0	99
	135	1	98
53 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100
	45	0	100
	90	1	98
	135	0	99
75 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	100
	45	0	100
	90	1	99
	135	0	98
106 Mikron Çapındaki Parçacık	0	0	99
	45	0	98
	90	1	99
	135	0	100
150 Mikron Çapındaki Parçacık	0	1	99
	45	1	98
	90	1	99
	135	0	100

4.1.4. Sisteme Eklenen İversör Vana

Bu çalışmada esas olarak sisteme eklenen inversör vananın etkinliğinin analizi en önemli noktadır. Bu inversör vananın analizi için 700 ve 1150 kg/m³ yoğunluklu, 1-10-30-53-75-106-150µm boyutlu parçacıklar kullanılmış olup ayrılmanın analiz edilmesi amacıyla sisteme salınan parçacık sayısı yöntemi kullanılmıştır. Her bir parçacık boyutu için eşit ayırmayı sağlayacak inversör vana açısı bulunmuştur. Toz kömür ve kül numuneleri için farklı parçacık boyutlarında elde edilen nümerik sonuçlar Tablo 4.8. ve Tablo 4.9.' da verilmiştir. İversör vana açısının eksendeki yeri tam olarak -y ekseninden +x eksenine doğru şeklinde tanımlanabilir. İversör vananın konumu ise Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sisteme Eklenen İnvorsör Vananın Boru içerisindeki Açısal Durumu

Tablo 4.8. Uçucu Kül İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (90° besleme için)

1 Mikron Çapındaki parçacık (açı=45 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	48	2
10 Mikron Çapındaki parçacık (açı=45 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
30 Mikron Çapındaki parçacık (açı=45 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
53 Mikron Çapındaki parçacık (açı=53derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
75 Mikron Çapındaki parçacık (açı=53 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
106 Mikron Çapındaki parçacık (açı=55 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
150 Mikron Çapındaki parçacık (açı=60 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0

Tablo 4.9. Toz Kömür İçin Yapılan Modellemede Elde Edilen Sonuçlar (90° besleme için)

1 Mikron Çapındaki parçacık (açı=45 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	48	2
10 Mikron Çapındaki parçacık (açı=45 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
49	51	1
30 Mikron Çapındaki parçacık (açı=45 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
53 Mikron Çapındaki parçacık (açı=55 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
75 Mikron Çapındaki parçacık (açı=65 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	49	1
106 Mikron Çapındaki parçacık (açı=65 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	50	0
150 Mikron Çapındaki parçacık (açı=65 derece)		
sol kol	sağ kol	kollar arası fark %
50	49	1

Parçacık boyutunun büyümesi ile açı değerinin büyüdüğü görülmektedir. Bu durum inversör vananın sağ kola kapanması anlamına gelmektedir. Yani parçacık boyutu arttıkça akımın dirseği takip etme eğilimi artmakta bunun sonucu olarak da inversör vananın o yöne doğru kapatılarak akımı sola doğru yönlendirmek gerekmektedir. Modellemede inversör vananın uygun bir dizayn olduğu sonucuna varılmaktadır.

4.2. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

4.2.1. Parçacık Çapı

Parçacık çapının, pnömatik taşınım sistemindeki Y şeklindeki elemanın iki kolu arasındaki ayrılmada etkisi olup olmadığını belirlemek amacı ile önce FLUENT çözücüsünde modelleme çalışması yapılmış ardından sonuçların doğrulanması için laboratuvar ölçekli sistemde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 1150kg/m^3 yoğunluğa sahip -150+106, -106+75, -75+53, -53 μm şeklinde boyutlandırılmış kömür numuneleri ile sabit olarak 20 m/s hava hızı ve 33.11 g/s parçacık kütle besleme hızı kullanılarak yapılmış olup deneyler yapılırken inversör vana tam açık konumda bulundurulmuştur. Elde edilen veriler ve yüzde cinsinden değerleri Tablo 4.10. 'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Parçacık Büyüklüğüne Bağlı Dağılım İçin Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar ve Yüzde Cinsinden Değerleri

Boru hattına salınan parçacık kütle hızı (g/s)	Parçacık çapı (mikron)							
	-53		-53+75		-75+106		-106+150	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
33.11	13.20	12.38	19.00	13.10	14.50	16.50	12.92	18.31
	39,87	37,39	57,38	39,57	43,79	49,83	39,02	55,30

Parçacıkların başlangıçta sol kola doğru meyilli oldukları ancak parçacık çapının artması ile sağ kola doğru yöneldikleri görülmektedir. Bu durum büyük parçacıkların hareket kabiliyetleri daha az olduğundan gaz akışı ile sürüklenmek yerine, parçacıkların birikerek ilerledikleri bölgelerde sürüklenmeye daha meyilli olduklarını göstermektedir. Parçacıkların birikerek ilerlemesine en büyük sebep olarak ise akım hattındaki dirsek ve eğimler gösterilebilir [16].

4.2.2. Parçacık Yoğunluğu

Parçacık yoğunluğunun, pnömatik taşınım sistemindeki Y şeklindeki elemanın iki kolu arasındaki ayrılmada etkisi olup olmadığını belirlemek amacı ile önce FLUENT

çözücüsünde modelleme çalışması yapılmış ardından sonuçların doğrulanması için laboratuvar ölçekli sistemde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 700 kg/m³ yoğunluğa - 150 +106, -106+ 75, -75 + 53, -53 µm boyutlu kül numunesi, 1150 kg/m³ yoğunluğa sahip - 150 + 106, -106+75, -75+53, -53 µm boyutlu kömür numunesi, sabit 20m/s hava hızı ve 33.11 g/s parçacık kütleli besleme hızı kullanılarak yapılmış olup deneyler yapılırken inversör vana tam açık konumda bulundurulmuştur.

Tablo 4.11. Parçacık Yoğunluğu İçin Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar

Örnek Cinsi	Parçacık çapı (mikron)							
	-53		-53+75		-75+106		-106+150	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
Toz Kömür	13.20	12.38	19.00	13.10	14.50	16.50	12.92	18.31
Kül	1.28	26.33	1.06	28.42	0.93	30.61	0.97	29.49

Tablo 4.12. Parçacık Yoğunluğu İçin Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçların Yüzde Cinsinden Değeri

Örnek Cinsi	Parçacık çapı (mikron)							
	-53		-53+75		-75+106		-106+150	
	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Sağ
Toz Kömür	39,87	37,39	57,38	39,57	43,79	49,83	39,02	55,30
Kül	3.87	79.52	3.20	85.84	2.81	92.45	2.93	89.07

4.2.3. Sisteme Eklenen İversör Vana

Sisteme eklenen inversör vananın kollar arasındaki ayrılma için ne ölçüde etkin olduğunun saptanması amacıyla 700 kg/m³ yoğunluğa - 150 +106, -106+ 75, -75 + 53, -53 µm boyutlu kül numunesi, 1150 kg/m³ yoğunluğa sahip - 150 + 106, -106+75, -75+53, -53 µm boyutlu kömür numunesi, sabit 20 m/s hava hızı ve 33.11 g/s parçacık kütleli besleme hızı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde her bir parçacık çapı için kollar arasında tam bir ayrılmanın sağlandığı açı değerleri bulunmuştur. Elde edilen veriler ise Tablo 4.13 ve Tablo 4.14.' te verilmiştir.

Tablo 4.13.Sisteme Eklenen İversör Vana İçin Uçucu Kül ile Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 700 kg/m³, besleme açısı 90°)

-53 Mikron Çapındaki parçacık (açı=48 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,28→ %49,17	16,42 %49,82	0,65
-75 + 106 Mikron Çapındaki parçacık (açı=50 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,50→%49,83	16,2 %48,92	0,91
-106 + 75 Mikron Çapındaki parçacık (açı=52 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,37→ %49,44	16,55 %49,98	0,54
-150 +106 Mikron Çapındaki parçacık (açı=65 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
15,98 →%48,26	16,12 %48,69	0,43

Tablo 4.14.Sisteme Eklenen İversör Vana İçin Toz Kömür ile Yapılan Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar (Yoğunluk 1150 kg/m³, besleme açısı 90°)

-53 Mikron Çapındaki parçacık (açı=51 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,078→ %48,54	16,15 %48,78	0,24
-75 + 106 Mikron Çapındaki parçacık (açı=51 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,340→%49,35	16,27 %49,14	0,21
-106 + 75 Mikron Çapındaki parçacık (açı=63 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,06 →%48,50	16,11 %48,66	0,16
-150 +106 Mikron Çapındaki parçacık (açı=65 derece)		
Sol Kol	Sağ Kol	Kollar Arası % Fark
16,22→%48,99	16,26 %49,11	0,12

Parçacık boyutu büyüdükçe inversör vananın sağ kola doğru kapandığı görülmektedir. Bu durum diğer deneylerde bulunan sonuçları da desteklemektedir. Yani parçacık boyutu büyüdükçe dirseği takip ederek sağ kola yönelen madde miktarında artış olmaktadır. Dolayısıyla o yöne doğru inversör vana kapatılırsa akım sola doğru yönlendirilmiş olur. İversör vananın açısı ile oynayarak her iki kola da eşit madde

gitmesi sağlanabilir. Deneyler esnasında sağ kol tarafında inversör vana ayarlanmıştır. Sonuçların verildiği tablolardaki değerler kollardaki madde miktarlarının birbirine en yakın olduğu durumlardır. Burada kollar arasında $\pm 1\%$ 'lik bir fark kabul edilebilir hata sınırları içindedir. Bu değer deney sonuçları ile elde edilen ayrılma miktarları arasında var olan maksimum fark (0.91) göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kabul edilebilir hata sınırları içerisinde yer alan ayrılmayı sağlayan açılış değerleri en uygun açılış değerleri olarak alınmıştır. Kollar arasında var olan fark ise az da olsa inversör vanadan kaynaklanan bir basınç düşüşünün göstergesi olabilir.

4.3. Modelleme ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Modellemede kullanılan 1-10-30 μm boyutları laboratuarda bu boyutta elek bulunmadığından deneysel olarak kıyaslanamamıştır. Bu nedenle karşılaştırmalar 53, 75, 106, 150 μm boyutlu parçacıklar için yapılmıştır.

4.3.1. Parçacık Çapı Sonuçlarının Karşılaştırılması

1-10-30 μm dışında kalan parçacık boyutları için bulunan sonuçlar modelleme ve deneysel sonuçların birbirine uyum sağladığını göstermektedir. Modelleme sonuçlarında salınan parçacık sayısı ile iki koldaki parçacık sayısı toplamı arasında fark olduğu durumlar parçacıkların akımdan geri kaldığı, segregasyon veya birikme olduğu anlamına gelmektedir. Sonuçlar arasında en farklı durum 106 μm boyutlu parçacık için söz konusu olmuştur.

Yapılan çalışmada, parçacık çapının artması ile hem deneysel hem de modelleme sonuçlarına göre, parçacıkların sağ kola doğru yöneldikleri görülmektedir.

4.3.2. Parçacık Yoğunluğu Sonuçlarının Karşılaştırılması

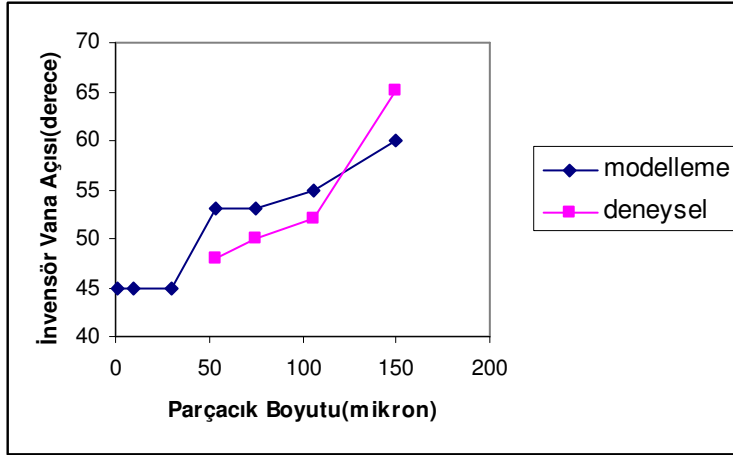
Yapılan çalışmada, sabit parçacık çapı için yoğunluk artırıldığında, büyük yoğunluğa sahip numunenin sağ kola yönelen miktarının arttığı görülmüştür. Bu hem deneysel hem de modelleme sonuçlarında karşımıza çıkmıştır.

Ağır parçacıkların akışkan tarafından taşınabilmesi için, yerçekimi etkisi dolayısıyla, hafif parçacıklara göre daha büyük bir kaldırma ve sürüklenme kuvveti gerekmektedir. Dolayısıyla ağır parçacıklar için hareket etme kabiliyeti daha az

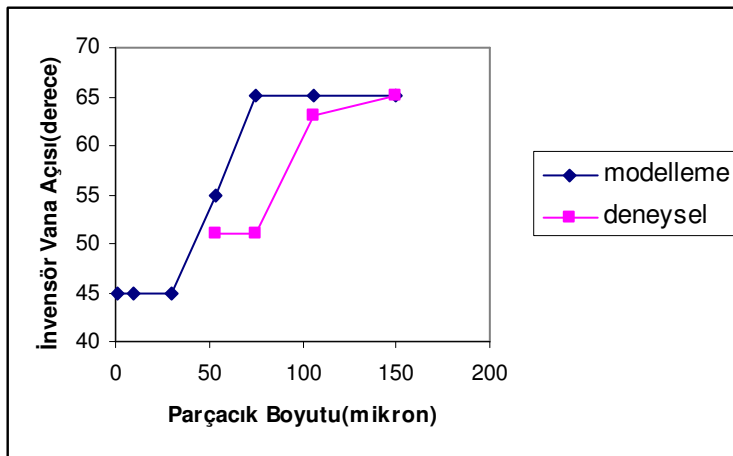
olacaktır. Bu da dirseğe çarpıp eğimi takip eden parçacık miktarının düşük yoğunluklarda daha fazla olması sonucunu verir.

4.3.3. Sisteme Eklenen İversör Vana Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan çalışmada, parçacık boyutu büyüdükçe inversör vananın sağ kola doğru kapandığı görülmektedir. Bu durum hem deneysel hem de modelleme sonuçlarında görülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucu bulunan açı değerleri ile modelleme sonucunda bulunan açı değerleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da karşılaştırmalı olarak grafiğe geçirilmiştir. İlk grafik 700 kg/m^3 , ikinci grafik 1150 kg/m^3 yoğunluğa sahip materyaller için çıkarılmıştır.



Şekil 4.6. Uçucu kül ile yapılan model ve deney çalışmaları ile bulunan inversör vana kapanma açılarının kıyaslanması



Şekil 4.7. Toz kömür ile yapılan model ve deney çalışmaları ile bulunan inversör vana kapanma açılarının kıyaslanması

5. SONUÇLAR

Boru hatlarında toz kömür pnömatik taşınımının, termik santrallerde kullanılan iki kollu akım ayırıcılar için etkin bir ayırma sağlayacak bir dizayn ortaya çıkarmak için incelendiği bu çalışmada bulunan nihai sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği yöntemlerinden faydalanılarak elde edilen modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum sağladığı görülmüştür.
2. Pnömatik taşınım sistemlerinde varolan ve akımın yönünü değiştirebilen dirsek benzeri elemanların akım üzerinde etkili oldukları görülmüştür.
3. Sistemi analiz etmek için çeşitli parametre çalışmaları yapılmıştır. Bunlar:
 - a. Parçacık boyutunun iki kollu akım ayırıcılarda kollar arası ayrılımda etkili olduğu bulunmuştur. Burada parçacık boyutu arttıkça, akımın daha büyük miktarının dirseği takip eden yüksek yoğunluklu bölge ile ilerleyerek sağ tarafa yöneldiği görülmüştür. Sistem için en etkin parçacık boyutu modelleme ile 30µm olarak hesaplanmıştır. Bu parçacık çapından daha büyük parçacık boyutları için akım tek bir kola yönelmektedir.
 - b. Parçacık yoğunluğunun iki kollu akım ayırıcılarda kollar arası ayrılımda etkili olduğu bulunmuştur.
 - c. Parçacık besleme açısının iki kollu akım ayırıcılarda kollar arası ayrılımda etkili olduğu bulunmuştur. En uygun açı değeri modelleme ile 90° olarak hesaplanmıştır.
4. Sisteme eklenecek olan elemanın analizde bulunan sonuçlar da göz önüne alınarak dizayn edilmesi gerektiğinden, akım yolunda ve akımı yönlendirebilecek özellikte bir eleman olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu amaçla inversör vana benzeri bir eleman oluşturularak akım yoluna yerleştirilmiştir. Bu eleman için yapılan model ve deneysel çalışmalar sonucunda beklendiği gibi farklı yoğunluklarda ve farklı parçacık boyutlarında farklı kapanma açıları gerektiği belirlenmiştir. Bu durum tasarlanan elemanın kullanılabilir olup olmadığı ile ilgili bir sorun arz etmektedir. Ancak termik santral çalışma koşulları göz önüne alındığında kararlı akım koşulları için genellikle tek bir yoğunluk ve parçacık boyut aralığı ile çalışıldığı görülmektedir. Parçacık yoğunluğu ve boyutu çok sık değiştirilmediğinden

tasarlanan elemanın kullanımında bununla ilgili bir problem de çıkmayacaktır. Bunun yanı sıra, termik santralde değişen parçacık boyutu ve yoğunluğu kullanılsa bile tüm sistem önceden çalıştırılıp ya da CFD modellemesi yapıp sisteme ait uygun açılar belirlenebilir.

Sonuç olarak toz kömürün pnömatik olarak taşındığı termik santral boru hatlarında kullanılan iki kollu ayırıcılarda kollar arası eşit ayırma sağlayan bir eleman tasarlanmıştır. Bu elemanın eşit ayırma sağlarken hava/yakıt oranından herhangi bir sapma ortaya çıkmadığı modellemede kontrol edilmiş ancak deneysel olarak kontrol edilememiştir. Ancak elde edilen sonuçlar ışığında hava/yakıt oranından ciddi oranda bir sapma olmadığı söylenebilir. Bunun yanı sıra dizayn edilen eleman ile ilgili parçacıkların çarpmasından kaynaklanan korozyonun ortaya çıkıp çıkmayacağı ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Burada inversör vananın yapıldığı malzemenin korozyonda etkili olacağı da göz önüne alınmalıdır. Plastik benzeri korozyona dayanıklı bir malzemedен yapıldığı takdirde yeterli bir elektrik deşarjı sağlanarak inversör vanada korozyonun önüne geçilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Akilli, H., Levy, E.K., Sahin, B., Gas-Solid Behaviour in a Horizontal Pipe After a 90° Vertical-to-Horizontal Elbow, **Powder Technology**, 116:43-52, 2001.
- [2] Anderson, J.D.Jr, **Computational Fluid Dynamics**, McGraw-Hill Inc.,1995,
- [3] Anova Mühendislik Ltd. Şti., 2005, Ürünlerimiz (online), [http:// www.anova.com.tr](http://www.anova.com.tr) den ulaşılabilir.
- [4] Backhurst, J.R., Harker, J.H., **Chemical Engineering–Volume 1**, Pergamon.,1990,
- [5] Bilirgen, H., Levy, E.K., Mixing and Dispersion of Particle Ropes in Lean Phase Pneumatic Conveying, **Powder Technology**, 119: 134-152.,2001.
- [6] Bilirgen, H., Levy, E., Yilmaz, A., Prediction of Pneumatic Conveying Flow Phenomena Using Commercial CFD Software, **Powder Technology**, 95: 37-41.,1998.
- [7] Blazek, J., **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**, Elsevier.,2001.
- [8] Boothroyd, R.G., **Flowing Gas-Solids Suspensions**, 11 New Fetter Lane , Chapman and Hall Ltd., Edinburgh.,1971.
- [9] CFD Fluent 6.1, User Manual, Computational Fluid Dynamics Services, Anova Mühendislik Ltd. Şti., İstanbul.,2005.
- [10] Davidson, J. F., Harrison, D., **Fluidization**, Academic Press Inc. (London) Ltd., London.,1971.
- [11] Fluent Inc., What is CFD (online), [http:// www.fluent.com](http://www.fluent.com) dan ulaşılabilir.,2005.
- [12] Fokeer, S., Kingman,S., Lowndes,I., Reynolds,A., Characterization of the Cross Sectional Particle Concentration Distribution in Horizontal Dilute Flow Conveying-a Review, **Chemical Engineering and Processing**, 43: 677-691,2004.
- [13] Güleren, M. K., Pinarasi, A., İki Boyutlu Geometrik Cisimler Üzerindeki Farklı Türbülans Model Yaklaşımları, **13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Konya,2001.
- [14] Knuii, D., Levenspiel, O., **Fluidization Engineering**, 2nd Ed, Robert E. Kriger Publishing Company, New York,1969.
- [15] Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., Progress in the Developments of a Reynolds Stress Turbulence Closure, **Journal of Fluid. Mechanics**, 68:537-566, 1975.

- [16] Levy, E., Mason, D.J., The Effect of a Bend on the Particle Cross-Section and Segregation in Pneumatic Conveying Systems, **Powder Technology**, 98: 95-103, 1998.
- [17] Levy, E.K, Yilmaz, A., Bilirgen, H., Wang, J., and Shi, X., Balancing of Coal Flow To Burners in Pulverized Coal Boilers, Presented at 26th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, Florida, March 5-8, 2001.
- [18] Lomax, H., Pulliam, T.H., Zingg, D.W., **Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**, Springer, Germany, 2001.
- [19] Rodi, W., Turbulance Models and Their Applications in Hydraulics – A State of the Art Review, **IAHR**, Delft, The Netherlands, 1980.
- [20] Schets, J. A., Fuhs, A. E., **Fundamentals of Fluid Mechanics**, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1999.
- [21] Uysal, B.Z., **Akışkanlar Mekaniği**, Alp Yayınevi, Ankara, 2003.
- [22] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., **An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method**, Longman, England, 1995.
- [23] Yalcin, H., **Sıvı Stokiyometri**, , Ankara, 1987.
- [24] Yilmaz,A., Levy, E.K., Roping Phenomena in Pulverized Coal Conveying Lines, **Powder Technology**, 95:43-48, 1998.
- [25] Yilmaz,A., Levy, E.K., Formation and Dispersion of Ropes in Pneumatic Conveying, **Powder Technology**, 114: 168-185, 2001.
- [26] Yilmaz,A., Levy, E.K., Dynamics of Rope Flow in Lean Phase Pneumatic Conveying, **Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting**, Paper no:FEDSM98-4820, Washington D.C., 1998.

ÖZGEÇMİŞ

25.07.1981 İstanbul doğumlu olan Ceyda Turasay, 1997 yılında başlamış olduğu İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünden 2001 yılında bölüm ikincisi olarak mezun olmuştur. 25.08.2003 tarihinde İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana bilim Dalı' nda yüksek lisansa başlamıştır. 04.10.2003 tarihinde Boyahane İşletme Mühendisi olarak çalışmaya başladığı Karagözlüler Tekstil A.Ş. (Malatya)' den 10.08.2003 tarihinde ayrılmıştır. Halen Beybo Boya San ve Tic. A.Ş. 'de Kimya Mühendisi olarak çalışmaktadır.