



İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

İKİ FAZLI AKIŞLARIN GİRDAP YÖNTEMİ
İLE MODELLENMESİ

Mak. Y. Müh. Mutlu TUNÇ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman
Prof. Dr. Ş. Ergin KISAKÜREK

97931

Nisan 2000

İSTANBUL

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bu çalışma 08/05/2000 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı Makine programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

E. Kusakurek *C. Ruhi Kaykayoglu*

İMZA

İMZA

İMZA

Prof.Dr.
Ş.Ergin KISAKÜREK

Prof.Dr.
C.Ruhi KAYKAYOĞLU

Doç.Dr.
Nurkan YAĞIZ

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, “İki Fazlı Akışların Ayırık Girdap Yöntemi ile Modellenmesi” başlığı altında, katı-akışkan fazlı, düzlemsel jet akışı ele alınarak, serbest ve sınırlı jet durumları için akış alanı, katı faz dağılımları, katı fazın akış üzerine etkileri, jet-cisim etkileşimi, katı faz ve akışkan sıcaklık dağılımları ayrı ayrı incelenmiştir.

Tez çalışmam boyunca bana engin bilgi birikimi ile rehberlik eden, çalışma ufuklarımı genişleten, bilimsel çalışma zevkini tattıran ve her zorluğu aşmam için cesaret veren değerli hocam Prof. Dr. C. Ruhi Kaykayoglu’na sonsuz minnettarlık duygularımı sunarım.

Nümerik uygulamalarda ve bilgisayar programlama konusundaki engin bilgisi ile tezin her aşamasında bana destek olan ve programcılığın inceliklerini sabırla öğreten ve tezin her satırında emeği bulunan sayın Y. Doç. Dr. Orhan Gökçöl’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sayın Prof. Dr. C. Ruhi Kaykayoglu’nun İstanbul Üniversitesi’nden ayrılmasından sonra resmi danışmanlığımı üstlenen ve beni destekleyen sayın Prof. Dr. Ş. Ergin Kısakürek’e de ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bilimsel çalışma ortamı içinde bulunmanın zevkini bana tanıtan, çalışmalarımda örnek aldığım ve alacağım sevgili annem Prof. Dr. İnci Oktay’a ve bu tezin hazırlanması süresince sonsuz bir özveri ile beni destekleyen ve cesaretlendiren sevgili eşim Mak. Y. Müh. Devrim Melek Tunç’a bitmeyen minnet duygularıyla teşekkür ederim.

Mutlu Tunç

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
SEMBOL LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÖZET	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1. İKİ FAZLI AKIŞLAR	1
1.1 İki Fazlı Akışların Doğası	1
1.2 Temel Tanımlar	1
1.3 İki Fazlı Akışların Önemi	3
1.4 İki Fazlı Akışların Analiz Yöntemleri	5
1.5 Geçmiş Çalışmalar	9
1.6 Çalışmada Kapsanan Alanlar	14
BÖLÜM 2 . İKİ FAZLI AKIŞLAR ve TÜRBÜLANS MODELLERİ	17
2.1 Türbülansın Doğası	17
2.2 İki Fazlı Türbülanslı Akışların Modellenmesi	20
BÖLÜM 3. MATEMATİK MODEL	23
3.1 Akış Alanı Temel Denklemleri	23

3.2 Jet Akışının Ayırık Girdap Yaklaşımı ile Modellenmesi	26
3.3 İki Fazlı Akışın Modellenmesinde İzlenen Yaklaşım	28
3.3.1 Pasif Etkileşim Yaklaşımı (One Way Coupling Approach)	29
3.3.2 Aktif Etkileşim Yaklaşımı (Two way Coupling Approach)	30
BÖLÜM 4. BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODEL	31
4.1 Problemin Doğası	31
4.2 Geometrik ve Fiziksel Tanımlar	31
4.2.1 Kanal Geometrisi	31
4.2.2 Girdap Bırakma Modeli	35
4.2.3 Katı Partikül Fazı	36
4.2.4 Cisim Modellemesi	43
4.2.5 Girdap Çekirdeği Modeli	43
4.2.6 Vizkoz Etkiler Modeli	44
4.3 Sıcaklık Alanının Hesaplanması	45
4.3.1 Akış Alanı	45
4.3.2 Katı Faz Alanı	46
4.4 Bilgisayar Programı	47
BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	50
5.1 Tek Fazlı Jet Akışı	50
5.1.1 Serbest Jet	51
5.1.2 Sınırlı Jet Sonuçları	55
5.2 İki Fazlı Jet Akışı	57
5.2.1 Serbest Jet	57
5.2.2 Serbest Jet Akışı ve Partikül Büyüklüğünün Etkisi	60
5.2.3 Parçacık Büyüklüğü ve Akış Alanı İçindeki Katı Faz Yoğunluğunun Akışın Çalkantı Alanına Etkisi	66
5.3 İki Fazlı Türbülanslı Jet Sonuçları	69
5.3.1 Sınırlı Jet	69
5.4 İki Fazlı Türbülanslı Jet – Cisim Etkileşimi Sonuçları	72

5.4.1 Serbest Jet – Cisim Etkileşimi	72
5.4.2 Sınırlı Jet – Cisim Etkileşimi	74
5.5 Sınırlı Jet ve Isıl Etkiler	81
BÖLÜM 6. GELECEK ÇALIŞMALAR	84
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91



SEMBOL LİSTESİ

Γ	Girdap şiddeti
i,j	Grid yapısı koordinatları
σ	Kaynak şiddeti ve serbest düzlemsel jet hız profili sabiti
ε	Girdap çekirdeği yarıçapı
x,y	Konum
ψ	Akım Fonksiyonu
Φ	Hız potansiyeli
N	Girdap, bağlı girdap ve kaynak sayıları
V_r	Radyal hız
V_θ	Teğetsel hız
$\vec{V}$	Hız vektörü
$\vec{U}$	Partikül hız vektörü
$\bar{u}, \bar{v}$	Zaman ortalama hızlar
$\sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}$	Karekök ortalama hız çalkantılar
ρ	Yoğunluk
$\tilde{g}$	Yerçekimi ivmesi
b	Hız profili katsayısı
W	Girdaplılık
F	Cisim Kuvveti
F_x	Cisim kuvvetinin x bileşeni
F_y	Cisim kuvvetinin y bileşeni
F_1	Sürüklenme katsayısı
r	Yarıçap
T	Sıcaklık
η	Rastgele sayı
ν	Kinematik viskozite
μ	Dinamik viskozite
t	Zaman
Δt	Zaman adımı

c	Isıl kapasite
$\forall$	Partikül hacmi
h	Isı taşınım katsayısı
A	Partikül kesit alanı
Re	Reynolds sayısı
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı

İndisler

i.	i.nciye ait
BAG	Bağlı girdap
BIG	Bırakılan girdap
CISG	Cisim bağlı girdapları
CISBIG	Cisim üzerinden bırakılan girdaplar
K	Kaynak tekilliklere ait
P	Partiküle ait
g	Gaz faza ait
∞	Ortam
ek	ilave terimlere ait
maks	Maksimum

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.1 Akış alanının geometrisi
- Şekil 1.2 İki fazlı akış alanlarının görüldüğü uygulamalar
- Şekil 3.1 Akış geometrisi ve tanımlar
- Şekil 4.1 Jet akışının oluşturulduğu kanal geometrisi
- Şekil 4.2 Sınırlandırılmış jet uygulamaları için kanal geometrisi
- Şekil 4.3 Girdap tekillik için akım çizgileri (çizgiler) ve eşpotansiyel çizgileri ile radyal ve açısal hız profilleri
- Şekil 4.4 Kaynak tekillik için akım çizgileri (çizgiler) ve eşpotansiyel çizgileri ile radyal ve açısal hız profilleri
- Şekil 4.5 Partikül başlangıç konumları için iki model
- Şekil 4.6 Ağırlıklı alan yönteminin partikül kuvvetlerine uygulanması
- Şekil 4.7 Ağırlıklı alan yönteminin girdap kuvvetlerine uygulanması
- Şekil 4.8 Girdap çekirdeği yönteminde uygulanan teğetsel hız profili
- Şekil 4.9 Isı kaynakları ve kanal geometrisi
- Şekil 4.10 Bilgisayar destekli matematiksel model çalışma şeması
- Şekil 5.1. İki boyutlu jet akışına ait deneysel ve hesaplamalı yöntemlerin karşılaştırılması
- Şekil 5.2 Tek fazlı jetin zamana bağlı gelişimi $Re=5.78 \times 10^4$
- Şekil 5.3 Tek fazlı sınırlı jet akışının zamana bağlı girdap dağılımları ve hız vektörleri
- Şekil 5.4 Pasif Etkileşim yaklaşımı ile hesaplanmış serbest jet
- Şekil 5.5 Referans nokta hız grafiği
- Şekil 5.6 Partikül dağılımı, gerinme alanı bileşenleri e_{11} , e_{12} , e_{22} ve girdaplılık konturları
- Şekil 5.7 Sırasıyla 50μ , 75μ , 100μ ve 125μ 'luk partiküllerin akış alanı içindeki konumları ve düşey konsantrasyon dağılımları
- Şekil 5.8 Partikül çapı ve kanal düzlemindeki parçacık yüzdesi
- Şekil 5.9 a) Pasif Etkileşim, b) Aktif Etkileşim 50 mikron, c) Aktif Etkileşim 75 mikron, d) Aktif Etkileşim 100 mikron, e) Aktif Etkileşim 125 mikron, girdap dağılımları.

- Şekil 5.10 Değişik çaptaki partiküllerin aktif ve pasif etkileşim hesaplamalarındaki dağılımları
- Şekil 5.11 Değişik yükleme oranları için üç yükseklikte u_{rms} , v_{rms}
- Şekil 5.13 Kanal çıkış bölgesi partikül yoğunlukları
- Şekil 5.14 Pasif Etkileşim yaklaşımı ile hesaplanmış, (a) 50μ , (b) 75μ , (c) 100μ ve (d) 125μ 'luk partikül dağılımları ve düşey konsantrasyon yüzdeleri
- Şekil 5.15 (a) Pasif Etkileşim jet profili, $Re=6.78 \times 10^4$, $T=50$, (b) Aktif Etkileşim $d_p=50\mu$, (c) Aktif Etkileşim $d_p=75\mu$, (d) Aktif Etkileşim $d_p=100\mu$ jet profilleri
- Şekil 5.16 Cisim konumuna bağlı iki fazlı serbest jet-cisim etkileşimi, $Re=7.2 \times 10^4$, $T=50$
- Şekil 5.17 50 mikronluk katı fazlı jet – cisim etkileşimi, aktif etkileşim
- Şekil 5.18 50 mikronluk katı fazlı jet – cisim etkileşimi, pasif etkileşim
- Şekil 5.19 Değişik cisim yüksekliği için 50 mikronluk katı fazlı jet – cisim etkileşimi, aktif etkileşim
- Şekil 5.20 İki fazlı sınırlı jet – ince küt cisim etkileşimi, $Re = 3 \times 10^4$, $T=50$
- Şekil 5.21 Sıcaklık hesabı parametreleri
- Şekil 5.22 Anlık sıcaklık, akış ve partikül sıcaklık alanları
- Şekil 5.23 50 ve 75 mikronluk parçacıklı jetlerin $T_{sınır}=500^\circ C$, $T_{giriş}=200^\circ C$ şartlarında ortamın sıcaklık alanına etkileri

ÖZET

İKİ FAZLI AKIŞLARIN GİRDAP YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Bu çalışmada iki fazlı akışlardan, doğada ve endüstriyel uygulamalarda çok sık karşılaşılan, katı-akışkan iki fazlı, türbülanslı jet problemi bilgisayar desteğinde incelenmiştir. İnceleme yöntemi olarak son yıllarda akışkanlar mekaniği ve özellikle iki fazlı akış konularındaki çalışmalarda çok sık karşılaşılan, Lagranjiyan bir yaklaşımla uygulanan Yüzey Tekillik Yöntemi ile birleştirilmiş Ayrık Girdap Yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada, tek fazlı jet akışı oluşumu ve özellikleri, serbest ve sınırlı haller için incelendikten sonra iki fazlı durum için, Aktif ve Pasif Yaklaşım metodları kullanılarak katı faz ile akışkan faz etkileşimi, değişik partikül çapları ve yükleme miktarları için incelenmiş ve katı fazın jet türbülans özelliklerine etkisi detaylı olarak araştırılmıştır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, alt akış alanına yerleştirilen küt bir cisim ile akış etkileşimi incelenerek değişik cisim konumlarında akış alanı ve partikül dağılımları incelenmiştir.

Çalışmanın son kısmında ise sınırlı jet akışı halinde, akışkan giriş sıcaklığı ve yan duvarlardan ısıtma durumunda ortam sıcaklık dağılımı, partikül sıcaklık değişimleri ve katı fazın sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

SUMMARY

MODELING of TWO-PHASE FLOWS by USING VORTEX METHOD

In this study, computer aided simulation of two-phase, turbulent jet flow, which is a very common two-phase flow both in nature and industrial applications, was made. A well known computational fluid dynamics technique so called Discrete Vortex Method combined Surface Singularity Method was used.

Evaluation of free and confined single phase jet flow and its properties were investigated. The particles are injected to the jet flow and particle – flow interaction were investigated for different particle diameters by using One-way and Two-way Coupling Approaches. Particle loading ratio was monitored in order to understand the effect of solid phase on turbulent jet properties.

The interaction between jet vortices and the bluff body was examined and it was shown that the jet-body interaction exhibits different flow field characteristics depending on the orientation of the incident vortices.

The temperature distributions and particle temperatures in confined jet simulations are also examined and are shown at the end of results chapter.

BÖLÜM I

İKİ FAZLI AKIŞLAR

1.1 İki Fazlı Akışların Doğası

Akışkanlar mekaniği, maddenin önemli iki hali olan sıvı ve gaz fazlarının iç ve dış kuvvetler altında davranışını analiz eden, mekanik bilim dalının önemli bir alanıdır. Son yıllarda, bilgisayar teknolojisinin de önemli bir problem çözücü olarak devreye girmesi ile, özellikle endüstri tabanlı akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümü sağlanabilmektedir. Temelde 1800'lü yılların ortasından itibaren gelişen teorik altyapı, günümüz deney ve bilgisayar imkanları ile daha anlaşılır hale gelmiştir. Ancak analitik yaklaşımlar problemleri çözmeye yeterli olmamış, bu safhada hesaplamalı, sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Bu rekabetin en önemli olduğu akış alanlarının başında iki fazlı akışlar gelmektedir. Bu bölümde, iki fazlı akışların doğası tanıtılmıştır. Yeni yüzyılın en önemli problem alanlarından birisi olan iki fazlı akışlar, araştırmacılar için ilgi alanı olmaya devam edecektir. Bu tez çalışmasında özellikle iki fazlı akışların problem alanı olarak seçilmesinde bu konunun gelecekteki önemi de yatmaktadır.

1.2 Temel Tanımlar

Faz, maddenin katı, sıvı ve gaz olarak tanımlanabilen halidir [1]. Akışkanlar mekaniğinde, bu fazların birarada bulunduğu akış tipi “Çok Fazlı Akış” olarak adlandırılmaktadır. İçinde iki faz bulunduran çok fazlı akışlar ise “İki Fazlı Akışlar” olarak tanımlanır.

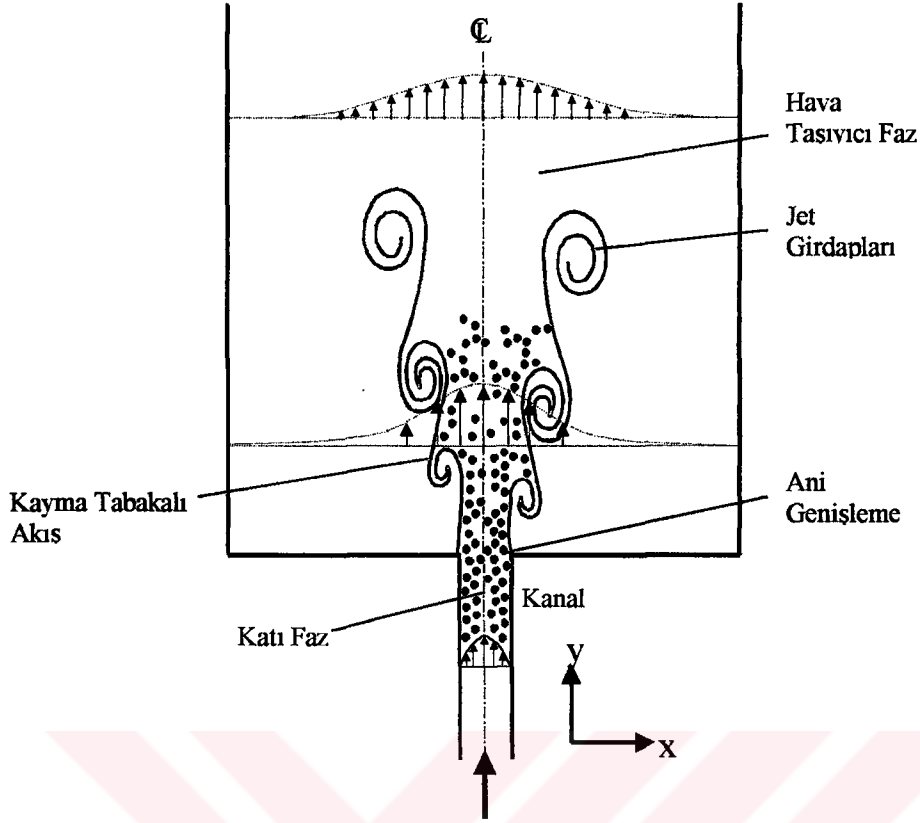
Bazı kaynaklar farklı maddelerin bir arada bulunduğu akış şekline iki bileşenli akış, aynı maddenin iki halinin bir arada bulunduğu akış şekillerine ise iki fazlı akış tanımlamasını getirmektedir [1]. Örneğin su buharı ve suyun beraber akışı iki fazlı, havanın, içindeki tozla hareketi ise iki bileşenli akış olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte özellikle iki farklı sıvı maddenin bir arada bulundukları iki bileşenli akışlar da aynı haldeki maddeleri içerdikleri halde iki fazlı akış olarak tanımlanmaktadır. Değişik

isimlendirmeler olabilmesine karşın, bilgisayar destekli hesaplama yöntemlerinde bir fark bulunmamaktadır.

İki fazlı akışların teknolojiadaki en çok karşılaşılan akış türlerinden birisi olması, konu üzerindeki akademik ilginin yoğunlaşmasına neden olmuştur. Akış alanının tanımı ve ikinci fazın akış üzerindeki etkileri, iki fazlı akışların karşılaşıldığı uygulamalardaki önemli bir inceleme alanını oluşturmaktadır.

İki fazlı akışların endüstride ve doğada geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Yoğuşma, buharlaşma, pnömatik taşıma, akışkan yatak uygulamaları, çevre kirliliği problemleri, duman, sis, bulutlar, buz dağları, kum fırtınaları uygulama alanlarından bazılarıdır.

Bu çalışmada iki fazlı akış alanı olarak akışkan (sıvı veya gaz) ve katı fazların bulunduğu akış alanı seçilmiştir. Özellikle seçilen akış tipi ise, yine endüstriyel uygulamalarda sıkça rastlanan yüksek hıza sahip düzlemsel, iki boyutlu jet akışıdır. Bu akışın seçilmesindeki temel nedenlerden en önemlisi, uyumlu girdap yapılarına sahip olmasıdır. İki fazlı bu akış, bir kanal içinde harekete başlayan katı partikül ve akışkanın, kanalın çıkışında ani genişlemesi sonucu oluşmaktadır (Bkz. Şekil 1). Akıştaki taşıyıcı faz hava, katı faz ise küresel partiküllerden oluşmaktadır. Oluşturulan modelde değişik gaz akışkanlar ve katı partiküller için inceleme yapılması mümkündür. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde aksi belirtilmedikçe partiküller için “katı faz”, hava için ise “taşıyıcı faz” terimleri kullanılacaktır.



Şekil 1.1 Akış alanı geometrisi

1.3 İki Fazlı Akışların Önemi

Akışkanlar mekaniğinin geniş yelpazedeki uygulamaları genellikle tek fazlı akış hali için incelenmiş ve literatürdeki bilgi birikimi tek fazlı akışların tanımlanması için oluşturulmuştur. Çok fazlı akışların bir alt grubu olan iki fazlı akışlar, akışkanlar mekaniğinin özel bir konusu olarak incelenmektedir. Teknikte ve doğada karşılaşılan akışların pek çoğu iki fazlı akışlardır. Teknolojik uygulamaların gelişmesi ile iki fazlı akışlar bazı proseslerin temelini oluşturmaya başlamış (akışkan yatak uygulamaları gibi) ve konunun önemi artmıştır [2].

İki fazlı akışların incelemeye açtığı önemli konulardan bir tanesi, fazların birbirini üzerindeki etkisidir. Fazlar arası etkileşim, özellikle katı-akışkan iki fazlı akışlarda, taşıyıcı fazın hareket özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Akışkan yatak örneğinde olduğu gibi katı fazın akış içindeki varlığından, ortamın türbülans seviyesini

artırmak ve ortama ait sıcaklık, katkı konsantrasyonu dağılımı ve temas miktarının artması gibi faydalar, yani taşıyıcı fazın hareketinin olumlu yönde değiştirilmesi beklenmektedir [3, 4, 5].

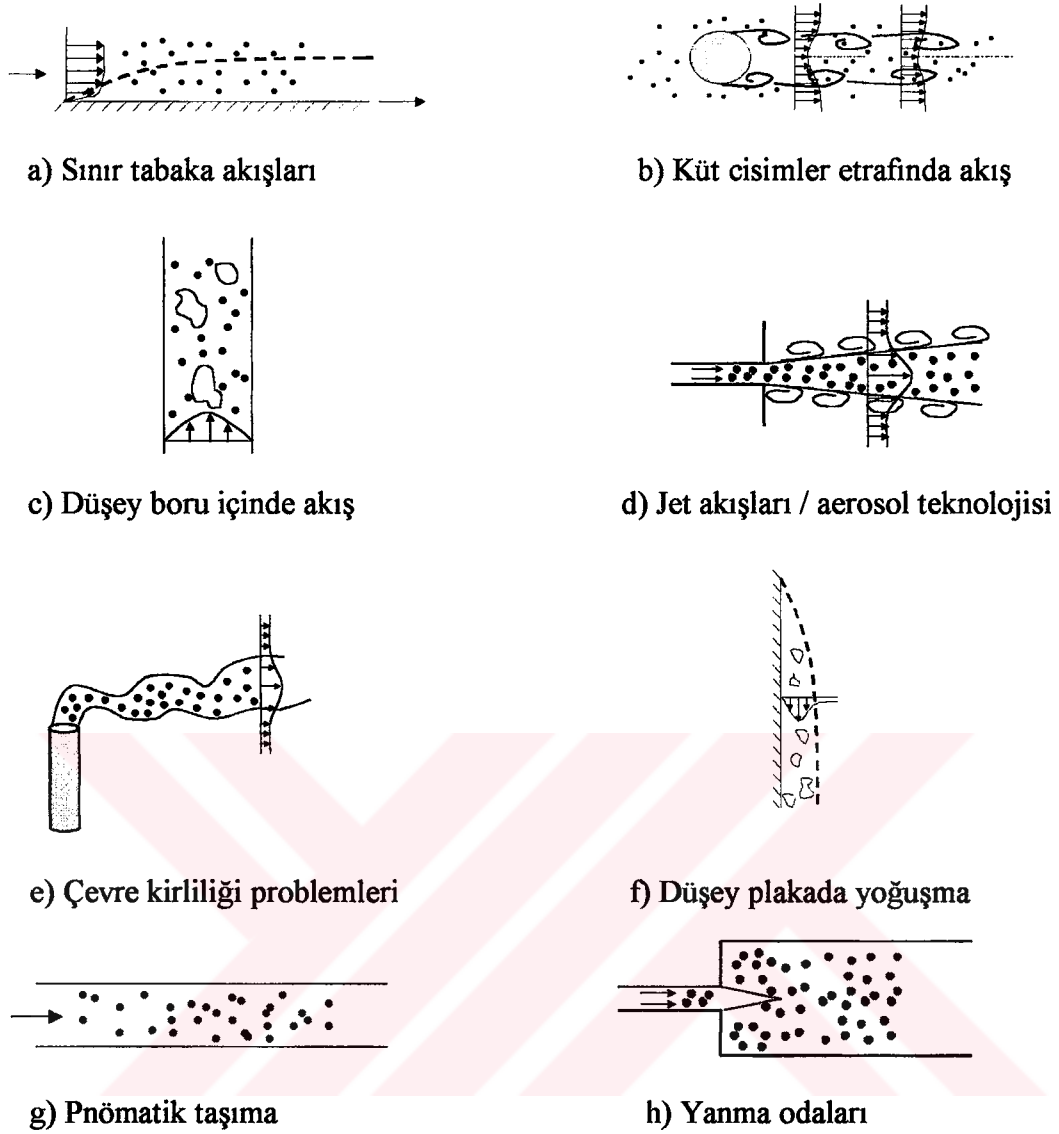
Bazı uygulamalarda ise ikinci faz olan toz kömür veya benzeri katı partiküllerin akış alanı içinde yakılması söz konusudur. Bu tür uygulamalarda akış alanı içindeki sıcaklık alanı ve partiküllerin en yüksek verimle yakılması için gerekli olan hareket miktarı, diğer bir deyişle akışkanlaşma önem kazanmaktadır.

Fabrika bacalarından çıkan ve içinde katı fazda partiküller içeren baca gazlarının hareketi de iki fazlı akışlara güncel bir örnek oluşturmaktadır. Çevre kirliliği konusunda önemli bir etken olan bacalardan yayılan kirleticilerin hava koşulları etkisi ile yaptıkları hareket ve konsantrasyon dağılımları, çökme mesafesi ve miktarları, bu tür iki fazlı akışlarda incelenebilecek bazı parametrelerdir.

İki fazlı akışlara verilebilecek bir başka örnek ise, tane yapılı katıların (özellikle tahıl ürünleri gibi) taşınması için kullanılan pnömatik taşıma yöntemidir. Bu tür uygulamalarda tıkanmadan taşıma için gerekli hava debisi ve taneler arası etkileşim incelenen konulardan bazılarıdır.

Sıvı-gaz iki fazlı akışlar söz konusu olduğunda ise, en çok incelenen konuların başında, teknolojik uygulamalarda son derece sık karşılaşılan yoğuşma ve buharlaşma problemleri gelmektedir.

Verilen örnekler teknolojinin ve günlük hayatın çok değişik konularında karşılaşılan akışlarla çoğaltılabilir. Yukarıda belirtilen iki fazlı akışlar, değişik hallerde gözlenmektedir. Şekil 1.2, değişik iki fazlı akışların gözlemlendiği geometrileri ve problemlerin doğasını göstermektedir.



Şekil 1.2 İki fazlı akış alanlarının görüldüğü uygulamalar

1.4 İki Fazlı Akışların Analiz Yöntemleri

Akışkanlar mekaniğinin önemli konu başlıklarından bir tanesi olan iki fazlı akışların, uygulama alanlarının genişliği, konu üzerinde yapılan çalışmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur. Problem yapısı gereği oldukça zor sonuç alınan bir konudur. Fazların ikisinin de akışkan olması, çözüm algoritmalarını zorlaştıran bir faktör olmaktadır. DeneySEL çalışma sonucunda iki fazlı akıştaki faz konsantrasyonları, taşıyıcı faz karakteristikleri ve akışın akustik özellikleri konularında bilgi birikimi elde edilmektedir.

Deneysel çalışmaların dışında, iki fazlı akışların diğer inceleme yöntemleri ise analitik analiz ve bilgisayar destekli sayısal simülasyonlar olarak sayılabilir [6, 7]. İki yöntem araştırmacılar tarafından değişik amaçlarla kullanılmaktadır. Özellikle son on yılda mühendislik problemlerinde karşılaşılan iki fazlı akışların çözümü için yeni modeller tanımlanmaktadır.

Tezin konusu olan katı-akışkan fazlı akışlar için çeşitli çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. İki fazlı akışların incelenmesinde kullanılan en yaygın yöntem deneysel yaklaşımdır [8]. Özellikle türbülanslı iki fazlı akışların doğasındaki karışıklık ve kaotik yapı ile matematiğin bilgi birikiminin bu akışları incelemek için gerekli araçları içermemesi, deneysel çalışmalara olan ilgiyi artırmıştır. Deneysel çalışmaların gerektirdiği yatırım ve değişik koşullar altında oluşturulan senaryoların denenmesinin güçlüğü, laboratuvar çalışmalarını zorlaştıran etkenlerdir. Bununla birlikte laboratuvar ortamından elde edilen veriler kullanılarak akışın genel karakteristikleri belirlenerek incelenebilir.

Deneysel çalışmaların yanı sıra bazı araştırmacılar her iki fazı da analitik yolla incelemekte, bazı araştırmacılar akışkan fazını analitik, katı fazını nümerik yollarla incelemektedir. İki fazlı akışların çözümü için bir üçüncü yol ise bu çalışmada uygulandığı gibi her iki fazın da nümerik yollarla incelenmesidir.

Laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilmesinin zorluğuna karşılık, sayısal modelleme ile gerçekleştirilen çalışmalarda pek çok akış parametresinin kontrolü kolaylaşmakta ve kısa sürede çok sayıda deney senaryosu bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Böylece “Bilgisayar Deneyi” olarak adlandırılabilen bu çalışma yöntemi, kısa sürede pratik bilgi edinilmesini sağlamaktadır.

Akışkanlar mekaniği problemlerinde kullanılan sayısal çözümlerde öne çıkan başlıca iki temel yaklaşım söz konusudur. Bunlar Lagranjiyan (Lagrangian) ve Euleriyan

(Eulerian) yöntemlerdir. Euleriyan yöntemlerde akış alanı bir bütün olarak ele alınmakta ve oluşturulan grid yapılarındaki akışa ve ikinci faza ait, hız, basınç, kaldırma kuvveti, partikül konsantrasyonu gibi büyüklükler hesaplanmaktadır. Euleriyan tip modellemede akış alanı içindeki incelenen alan büyüklüğü ayrık noktalarda hesaplanarak akış özellikleri bu ağ yapısı içinde incelenir. Özellikle türbülanslı akışların sayısal modellemesi için ihtiyaç olan grid yapısı son derece sık ve gridler arası mesafe Kolmogorov uzunluk ölçeği mertebesinde olmak zorundadır. Günümüz teknolojisi ile dahi bu ölçekli bir hesaplama büyük bilgisayar zamanı maliyeti getirmektedir.. Diğer taraftan ikinci yaklaşım olan Lagrangian yöntemlerde ise akış alanını tanımlamakta kullanılan ve birçok fiziksel özelliği taşıdığı kabul edilen (Örneğin girdaplılık, sıcaklık, konsantrasyon vb.) elemanlar zaman içinde takip edilerek hesaplamalar yapılmakta ve böylece çok sık ağ yapısı ve büyük bilgisayar zamanı kavramlarından uzaklaşılarak daha kolay bir modelleme gerçekleştirilebilmektedir. Ancak yapılan modellemenin başarısı çok sayıda elemanın kullanılmasını gerektirmektedir. Eleman sayısı arttıkça, analiz için harcanan bilgisayar zamanı da artacaktır [9, 10].

Diğer taraftan, Hibrid Yöntem olarak bilinen Euleriyan-Lagranjiyan Yöntemler, yeni bir yaklaşım olarak günümüzde yoğun bir şekilde kullanılan üçüncü yöntem olarak kabul edilmektedir [11].

Bu çalışmada kullanılan Lagranjiyan yöntem bilgisayar kapasitelerinin giderek artması sonucu son yıllarda tercih edilen bir girdap yöntemidir. Euleriyan yöntemine göre uygulama kolaylığı bulunan bu yöntem, hesaplamada getirdiği zaman maliyeti, bilgisayar gücü ile karşılandığından daha verimli bir yol olarak ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda belirtildiği gibi, bilgisayar destekli matematiksel modeller yardımı ile iki fazlı akışların incelenmesinin önemli avantajlarının yanı sıra dikkate alınması gereken bazı çalışma şartları mevcuttur. Bu şartlardan en önemlisi kurulan modelin ve oluşturulan

bilgisayar yazılımının, deneysel sonuçları bilinen senaryolar için çalıştırılarak güvenilirliğinin denenmesidir.

Lagranjiyan yaklaşımların en temeli olan Girdap Elemanları Yöntemi [12, 13, 14], akış alanlarının iki veya üç boyutlu girdap elemanlarınca temsili üzerine kurulmuştur. Bilindiği gibi, özellikle türbülanslı akışlar, girdaplı akış bölgelerinin yoğun olduğu ve bu bölgelerin sürekli olarak birbirlerini de etkiledikleri akışlar olarak bilinmektedir. Girdaplı bölgelerin oluşması için girdaplılık üreten kaynaklar gerekmektedir. Örneğin düz duvar üzerindeki türbülanslı sınır tabaka akışında girdaplılık, duvar üzerinden akışın doğal kararlılığı sonucu oluşan at nalı girdapları ve bu girdapların sonrasında oluşturdukları halka girdaplardır. Halka girdapların birbirleri ile etkileşimleri sonucunda türbülanslı akış alanları oluşur. Girdaplı bölgeler birbirleri ile etkileşerek büyük alanların küçük alanlara dönüşmesini sağlarlar. Akışın enerjisi büyük girdaplı alanlardan küçük girdaplı alanlara doğru daimi bir şelale halindedir. O halde girdaplı alanların temsili için geliştirilecek bir yaklaşım, eğer etkileşime de izin veriyorsa, türbülanslı akışların girdap alanlarının temsili ve sürekli takibi üzerine kurulan bir yaklaşımla izlenmesi mümkün olacaktır.

Yukarıda akış fiziğinin anlatıldığı türbülanslı akışlar, Navier-Stokes denklemlerinin çözümü ile incelenebilmektedir. Ancak Navier-Stokes denklemlerinin çözüme uygun türbülans modelleri olduğunda bu tür bir çalışma gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Literatürden görüleceği üzere, en temel girdap elemanları yöntemi olan Ayrık Girdap Yöntemi; iki boyutlu, viskoz olmayan, sıkıştırılamaz akış alanları için tam çözümü verebilmektedir [15, 16]. Aynı şekilde üç boyutlu girdap elemanları yöntemlerinden vorton yaklaşımı, Euler denklemleri için tam çözüm olmaktadır. Yüksek Reynolds sayılı akışların modellenmesi için en uygun yöntem olarak bilinen Girdap Elemanları Yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalara literatürde pek çok örnek vermek mümkündür [17, 18, 19].

Girdap Elemanları Yöntemleri temelde, girdaplılık alanlarının takibi üzerine kurulmuştur. Türbülanslı akışlar, türbülanslı bölgelerden oluştuğuna göre, girdap elemanları kullanılarak türbülanslı akışların incelenmesi mümkündür.

Bu çalışmada iki boyutlu girdap elemanı yöntemlerinden bir tanesi olan ayrık girdap yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin temelini yüksek Reynolds sayılı akışları temsil eden potansiyel akış teorisi oluşturmaktadır. Bilindiği gibi potansiyel akış kavramı, gerçek akışlardaki viskozitenin ihmal edilmiş bir şeklidir. Potansiyel akış kavramları ile gerçek akışların modellenmesinde kullanılan bazı araçlar (girdap, kaynak, kuyu, duble) sayesinde gerçek akışlara ait viskozite içeren denklemler kullanılmadan, gerçek akışlara tatmin edici ölçülerde yaklaşılabilmektedir.

Ayrıca Ayrık Girdap Yöntemi (Discrete Vortex Method) kullanılarak akış alanı içindeki cisimlerin modellenmesi de kolaylaşmaktadır. Ayrık girdapların cisim yüzeylerine yerleştirilmesi ile de yüzey tekillik yöntemleri geliştirilmiştir. Panel yöntemler bu grup içinde bulunan en önemli yaklaşımlardır [17, 18, 19].

Bu çalışmada, akış alanı ayrık girdaplar ve yüzey tekillik yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Yöntemlerin ayrıntıları Lewis [12] tarafından verilmiştir. Akış içindeki ikinci faz olan katı partiküller ise uygun denge denklemleri modellenip taşıyıcı faz ile olan etkileşimi geliştirilen yeni bir yaklaşımla modellenmiştir.

1.5 Geçmiş Çalışmalar

Son yıllarda iki fazlı akışlarla ilgili çalışmalar genellikle deneysel bazda gerçekleştirilmekte ve akış-partikül etkileşimi ve partikül dağılımları incelenmektedir [8]. Bazı araştırmacılar ise yarı sayısal yöntemler kullanmakta ve fazlardan birini sayısal yolla çözmektedirler. Bu çalışmada katı-akışkan iki fazlı akış tam sayısal yöntemlerle incelenmiştir.

Yarin ve Hetsroni [3], iki fazlı akışta, katı partikül fazının taşıyıcı faz üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, partiküllerin akışın türbülans karakteristiğinde yaptığı değişimi incelemek olmuştur. Çalışmada partikül Reynolds sayısının (Re_p) belirli bir değerin üzerinde olması halinde girdapsı yapıların partiküller tarafından destabilize edildikleri belirtilmekte ve partikül çaplarının düşürülmesi ile türbülansın sönümlendiğine dikkat çekilmektedir. Ayrıca çalışmada partikül fazı tek çaplı partiküller ve değişik çaplı partiküllerden oluşturularak akışın türbülans özellikleri incelenmiş ve değişik çaplı katı fazının türbülans etkinliğini azalttığı gözlenmiştir. Çalışmada kullanılan temel yöntem karışma uzunluğu yöntemidir.

Yarin ve Hetsroni'nin referans 1'in devamı olan çalışmasında ise iki fazlı akış içindeki sıcaklık dağılımı ile akış ve partiküllerin sıcaklık çalkantıları hesaplanmıştır [4]. Önceki çalışmada olduğu gibi katı partikül çapları iki değişik yaklaşımla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda partikül çapı ve ısı kapasitesi arttıkça, akışkandan partiküle geçen ısı miktarının ve akışkanın sıcaklık çalkantı mertebesinin düştüğü belirtilmiştir. Akışkan sıcaklık çalkantılarının, partikül ve akışkan yoğunlukları oranı ve ısı kapasitenin fonksiyonu olarak değiştiği ve ayrıca Pr sayısı yükseldikçe akışkan sıcaklık çalkantılarının yükseldiği, buna karşılık partikül sıcaklık çalkantılarının düştüğü belirtilmiştir. Yarin ve Hestroni'nin çalışmasının üçüncü bölümünde ise akış alanındaki hız gradyanının ve partikül arkasındaki ard-iz bölgesinin akış özelliklerine olan etkisi incelenmiştir [5].

Lim ve arkadaşları [2], akışkan yatak sistemlerinde hidrodinamik rejimleri ve rejim geçişlerini detaylı olarak incelemiştir.

Chang ve arkadaşları [6], iki boyutlu bir yanma odasında, iki fazlı, sıkıştırılabilir, zamana bağlı ram jet içindeki partiküllerin hareketlerini incelemiş ve partiküllerin kayma tabakası kararlılığını bozduğunu ve girdap yapılarının oluşumunu geciktirdiğini tespit etmiştir. Yüksek hız çalkantılarının alt akış bölgelerinde görülmesi ve partikül

bırakma konumlarının girdap frekanslarını etkilediği çalışmanın diğer önemli sonuçlarıdır.

Lun ve Liu [7], yaptıkları çalışmada katı-gaz iki fazlı akışı incelemek için zaman ortalaması alınmış hareket denklemlerini kullanmışlardır. Çalışmada türbülans modeli olarak k- ϵ yöntemi kullanılmış, Akış Euleryan, partikül fazı ise Lagranjyan yöntemle analiz edilmiştir. Çalışmada, katı fazın duvarlarla etkileşiminde yapışma ve yansıma modelleri kullanılmış ayrıca partiküller arası etkileşim de incelenmiştir.

Kattori, Hetsroni ve Benerjee [9], duvar yakınındaki türbülanslı akışta partiküllerin etkilerini deneysel olarak incelemiş ve partiküllerin akışın türbülans karakteristiğini iki şekilde etkilediğini tespit etmişlerdir. Bunlardan ilki, partiküllerin duvarjeti üzerinde pürüzlü yüzey etkisi yapması, ikincisi ise katı fazın girdapsı yapıların etkileşimini etkiledikleridir.

Kening ve Crowe [10], iki fazlı akışlarda partiküllerin yayılımı ve türbülans yaratma etkisini yeni bir türbülans modeli oluşturarak incelemişlerdir. Modelde partiküllerin türbülans yaratma mekanizması incelenerek partikül sayısının önemi belirtilmiştir.

Sakakibara ve arkadaşları [8], eksenel jette partikül-akış hız korelasyonlarını deneysel ölçüm yöntemleri ile incelemiştir.

Chang ve Kailasanath [11], yanma odasındaki iki fazlı, sıkıştırılabilir akışı incelemişlerdir. Akışkan faz Eulerian, katı faz ise Lagrangian yöntemle hesaplanmıştır. Değişik partikül yoğunluğu, akışkan yoğunluğu oranları için girdap ve partikül dağılımlarını incelemiştir. Yapılan çalışmada, küçük boyutlu partiküllerin akışı takip ettikleri, büyük partiküllerin ise akışa daha az bağımlı davrandıkları belirlenmiştir.

Mei ve Hu [20], İki fazlı türbülanslı akıslarda partiküller arası etkileşimi incelemişlerdir. Çalışmanın kullanım alanları olarak yağmur damlalarının bulutlardaki hareketi, toz kömür yakılma prosesi, hava filtreleme sistemleri ve akışkan yataklar gösterilmiştir.

Liu, Mosyak ve Hetsroni [21], iki fazlı türbülanslı sınır tabaka akışını DNS (Direct Numerical Simulation) yöntemi ile incelemiş, partikül fazını incelemek için Lagrangian yaklaşımı kullanarak, akışkan-katı fazı etkileşimleri için Aktif Etkileşim Yöntemini (Two-Way Coupling) kullanmışlardır. Mosyak çalışmasında partikül çaplarının artması durumunda hız çalkantılarının arttığını belirtmektedir.

Snider ve arkadaşları [22], iki boyutlu, iki fazlı, sıkıştırılmaz akışı Particle-In-Cell yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Akışkan faz Eulerian, katı partikül fazı ise Lagrangian yöntemle incelenmiştir. Çalışmada dikdörtgen bir alandaki akışkan içinde bulunan partiküllerin, düşey eksene göre değişik eğimler verilmesi hallerinde, zaman içinde çökelmeleri problemi incelenmiştir.

Zhou ve Leschziner [23], çalışmasında iki fazlı akıslarda Eulerian yöntemlerde kullanılan düzgün olmayan grid yapısı içinde partikül konumu bulmak üzere hızlı bir algoritma geliştirmişlerdir.

Nguyen ve Fletcher [24], değişik iki fazlı akış şekillerinde, partiküllerin duvara çarpması sonucunda izledikleri yörüngeleri incelemişlerdir.

Tashiro ve Tomita [25], Yatay bir kanal içinde gaz-katı iki fazlı akışı incelemişlerdir. Bir olasılık yöntemi ile partiküller arası etkileşimi modellemiş ve partiküllerin hesap alanı içindeki dağılımlarını incelemiştir. Katı fazı üniform çapta ve değişik çaplardaki

partiküller topluluğu olarak iki farklı şekilde modelleyen Tashiro, partiküller arası etkileşimin, katı fazın taşınma mesafesini kısalttığını bulmuştur.

McLaughlin [26], DNS (Direct Numerical Simulation) kullanılarak gerçekleştirilen iki fazlı akışlarda partikül hareketlerini incelemiştir. Çalışmada aktif etkileşim ve pasif etkileşim kullanılarak elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılmakta ve iki fazlı, serbest kayma tabakalı akışlarda kullanılabilecek yeni bir yöntem önermektedir. Çalışmada girdaplılık taşınım denklemi çözülmüş ve partiküllerin varlığından doğan tepki kuvvetleri denklemin sağ tarafına kaynak terimi olarak konulmuştur.

Lazaro ve Lasheras [27], Yüksek Reynolds sayılı, türbülanslı, serbest kayma tabakalı akışlardaki partikül dağılımını deneysel olarak incelemişlerdir.

Pan ve Banerjee [28], kanal içindeki türbülanslı akış ile partiküllerin etkileşimini incelemiştir. Partikül etkileri hareket denkleminin sağ tarafında kuvvet terimi olarak hesaba katılmıştır.

Inamura ve arkadaşları [29], cisim etrafından akışta meydana gelen ard-iz bölgesini modellemek üzere girdap bırakma modeli geliştirmişler ve cisim yüzeyini girdap tekillikler ile modellemişlerdir.

Elghobashi ve Truesdell [30] , iki fazlı türbülanslı akışlarda, aktif etkileşim yaklaşımını kullanarak, katı fazı oluşturan partiküllerin çaplarının 500 mikronun üzerinde olması halinde türbülans etkinliğini anlamlı miktarda artırdıklarını, 250 mikronun altında ise azalttıklarını belirtmişlerdir.

Tsuji ve Morikawa [31], yatay bir boru içindeki iki fazlı, türbülanslı taşıma prosesini LDV ölçümleri ile incelemişlerdir.

Vittal ve Tabakoff [32], iki fazlı akışlarda partikül çapının artması ile katı fazın akış doğrultusu dışında hareket etme eğilimini incelemişlerdir.

1.6 Çalışmada Kapsanan Alanlar

Bu çalışma kapsamında iki fazlı akış alanlarının davranışına ışık tutacak önemli alanlarda bilgisayar benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Bu hususların bazıları aşağıda belirtilmiştir. Tez kapsamına destek veren ön çalışmalar, daha önce birçok ulusal ve uluslararası toplantıda rapor edilmiştir [33, 34 ,35 ,36, 37]. Bu tezde yeni bulgulara yer verilmiştir.

Tez çalışmasının kapsadığı temel alanlar şunlardır;

- a) Yüksek Reynolds sayısına sahip, Kelvin-Helmholtz kararsızlığı sonucu yan girdapların oluştuğu, düzlemsel serbest ve sınırlı jet akışı modellenmiştir.
- b) Jet akışını sınırlayan duvarlar ve jet akışının oluştuğu kanal geometrisi Yüzey Tekillik Yöntemi ile modellenmiştir. Tekillik olarak iki boyutlu girdap elemanları kullanılmıştır.
- c) Jet, yan girdapları, ani genişleyen kanal ağzından kopan akış alanının oluşturduğu etki sonucu modellenmiştir. Akış alanının oluşturduğu kayma tabakası iki boyutlu girdap tekillikler ile modellenmiştir.
- d) Jet akışı içine yerleştirilen küt bir cisim ile jet akışının etkileşimi incelenmiştir.

e) Akış alanı içinde taşınan katı fazın taşıyıcı faz ile etkileşimi, aktif ve pasif olarak modellemeye dahil edilmiştir.

f) Katı fazın, taşıyıcı faz içindeki dağılımı, değişik akış şartları ve partikül özellikleri için incelenmiştir.

g) Akış alanı içinde enerji denklemi çözülerek sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.

h) Akış alanı içindeki partiküllerin zamana bağlı sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.

Bu alanlarda yapılacak çalışmalarla, literatüre aşağıdaki önemli katkıların sağlanması hedeflenmektedir.

a) İki fazlı akış modellemesinde, hem taşıyıcı faz (gaz), hem de taşınan fazın (katı) tamamen Lagranjiyan yaklaşımla modellendiği ilk çalışma olarak bu çalışma literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır.

b) Katı faz halinin, taşıyıcı faz ile etkileşimini değişik yeni bir yaklaşımla modellenmiştir. Girdap elemanlarının şiddetleri hem viskozite hem de katı parçacıkların yaptıkları etkileşimler sonucu her zaman adımında yenilenmiş, böylece aktif etkileşim modellenebilmiştir.

c) Parçacıkların, türbülans çalkantı büyüklüklerini bozdukları gibi doğal karasızlıkların da doğasını değiştirdikleri bilinmektedir. Jet akışı için bu değişimin doğası araştırılmış ve önemli sonuçlara erişilmiştir.

d) Parçacıkların ana taşıyıcı faz ile olan enerji alışverişleri dışında, yan duvarlardan verilen enerjinin ne ölçüde etkin olduğu ayrı bir araştırma konusu olarak ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacaktır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde iki fazlı akışlar hakkında genel bilgiler verilip, iki fazlı akışların önemi üzerinde durulduktan sonra, analiz yöntemleri hakkında temel bilgiler verilmiş ve son on yıl içinde yapılan konu ile ilgili çalışmaların bir özeti sunulmuştur.

Bölüm 2, iki fazlı akışlarda kullanılan türbülans modelleri hakkında bilgi vermekte ve türbülansın doğasına ait genel bilgiler içermektedir.

Bölüm 3, çalışmada kullanılan matematik modeli anlatmaktadır. Bölümün başında akış alanı temel denklemleri hatırlatılmakta ve jet akışının Ayrık Girdap Yöntemi kullanılarak modellenmesi anlatılmakta ve bölümün sonunda katı faz- akışkan faz arasındaki etkileşimin modellenmesi için kullanılan Aktif Etkileşim ve Pasif Etkileşim Yaklaşımları üzerinde durulmaktadır.

Bölüm 4'te, bilgisayar destekli modelin detayları açıklanmaktadır. Geometri ve fiziksel tanımların ardından akışkan ve katı fazın modellenme aşamaları, katı-akışkan arasındaki aktif etkileşimin modelleme aşamaları, sıcaklık alanının çözüm yöntemi ve partikül sıcaklık değişimlerinin modellenmesi ile cisim modellemesi detaylı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 5'in ilk kısmında, tek fazlı serbest ve sınırlı jet akışına ait sonuçlar bulunmaktadır. Bu kısımda anlık girdap dağılımları, partikül dağılımları, düşey partikül konsantrasyonları, hız vektörleri kullanılarak tek fazlı jet incelenmiştir. İlerleyen kısımlarda ise, iki fazlı jet akışı serbest ve sınırlı haller için incelenmiştir. Partikül dağılımları ve partikül-akışkan etkileşiminin sonuçları da bu kısımda verilmektedir. Bölüm içinde yer alan diğer sonuçlar ise, sınırlı jet akışı esnasındaki sıcaklık alanı ve partikül sıcaklıkları ile alt akış alanına yerleştirilen bir cisim ile iki fazlı jetin etkileşimi durumlarına ait gösterimlerdir.

BÖLÜM 2

İKİ FAZLI AKIŞLAR VE TÜRBÜLANS MODELLERİ

Daha önce belirtildiği gibi, türbülanslı akışlar yüksek Reynolds sayılı akışlar olarak bilinmektedir. Diğer taraftan Girdap Elemanları Yöntemlerinin yüksek Reynolds sayılı akışlara ve bunun sonucu olarak türbülanslı akışlara bir çözüm kümesi oluşturduğu bilinen bir gerçektir [12, 13, 14]. Bu yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlara gelmeden önce türbülanslı akışların özelliklerini hatırlatmakta tezin sürekliliği açısından yarar vardır.

2.1 Türbülansın Doğası

Herhangi bir akış alanı için tanımlanmış karakteristik uzunluk ve hız değerleri kullanılarak tanımlanan Reynolds sayısı akışkan ve akış şekline bağlı olarak belirli bir kritik değerin (Re_k) altında ise komşu akışkan tabakaları birbiri üzerinde düzenli bir şekilde kayarak ilerleyerek laminar akış halini oluştururlar [38, 39, 40, 41, 42]. Ancak belirtilen Re_k sayısından daha yüksek Re sayılı akışlarda, akış karakteristiğinde radikal değişimlere neden olacak bir dizi mekanizma devreye girerek hız ve diğer tüm akış özelliklerinin gelişigüzel ve kaotik şekilde değiştiği türbülanslı akış tipine geçilir [40, 42]. Türbülanslı akışlar ana akışa ek olarak kendi kendini besleyebilen düzensiz hız çalkantıları içerir. Bu hız çalkantılarının oluşma ve gelişme mekanizması son derece karmaşık olduğundan matematik yöntemlerle çözümlenmesi imkansızdır. Bununla birlikte türbülanslı akışların genel karakteristiklerinin laminar akıştan son derece farklı olması ve karşılaşılan akışların hemen hemen hepsinin türbülanslı olması konunun incelenmesi gayretlerini cesaretlendirmektedir.

Türbülanslı akışlarda ana akıştan büyük girdapsı yapılara (Large Eddies), buradan da küçük girdapsı yapılara (Small Eddies) sürekli bir enerji akışı enerji şelalesi gerçekleşir. Ancak enerji yayılımı ısı halinde yoğunlukla küçük ediller tarafından gerçekleştirilir [42].

Doğada ve teknolojide karşılaşılan akış türlerinin büyük çoğunluğu türbülanslıdır. Atmosferin yeryüzü etrafındaki hareketi, okyanus tabanlarındaki akıntılar, uçak kanatları üzerindeki sınır tabaka akışının karakteri, boru hatlarında doğal gaz ve su akışı, gemilerin ve uçakların hareketi esnasında oluşan ardiz bölgesi akışları türbülanslı akışlara örnek olarak gösterilebilir.

Ancak karşılaşılan her girdaplı bölge taşıyan akış türbülanslı da değildir. Bir akışın türbülanslı olduğunun söylenebilmesi için bazı özelliklere sahip olması gereklidir. Bu özellikler aşağıda açıklanmıştır.

Türbülanslı akışların bir özelliği düzensizlik veya gelişigüzeliktir. Bu özellik türbülans problemlerine kesin çözüm yaklaşımını imkansız kılar, bunun yerine istatistiksel metodlara yönelinir.

Tüm türbülanslı akışların önemli diğer bir özelliği olan difüzivite, akış alanı içinde hızlı karışmayı sağlayan ve momentum, ısı ve kütle transfer oranlarını önemli miktarda artıran bir akış özelliğidir. Bir akış gelişigüzel yapıda görünmekle birlikte hız çalkantı dağılımları göstermiyorsa, türbülanslı değildir. Uygulamalar ele alındığında difüzivitenin türbülansın en önemli özelliği olduğu görülebilir.

Türbülanslı akışlar her zaman yüksek Reynolds sayılarında oluşur. Eğer Re sayısı çok yüksekse, türbülans genelde laminar akışlardaki temel karakteristiklerin etkin hale geçmesi ile oluşur. Kararsızlık viskoz terimler ile non-lineer atalet terimlerinin momentum denklemindeki etkileşimi ile ilişkilidir. Sözü edilen etkileşimin matematiksel incelenmesi, nonlineer kısmi diferansiyel denklem çözme tekniklerinin yetersizliği nedeni ile henüz tam anlamıyla mümkün değildir.

Gelişigüzellik ve non-lineerlik etkilerinin bileşimi türbülans denklemlerini kompleks hale getirir, yeterince güçlü matematiksel modellerin olmayışı nedeniyle türbülans teorisi sıkıntıya düşmektedir. Bütün yöntem eksiklikleri, türbülans problemlerine teorik yaklaşımları deneme-yanılma yoluna yöneltmektedir.

Türbülanslı akışlar her zaman dağıtıcı (dissipative) özelliktedir. Viskoz kayma gerilmeleri, türbülansın kinetik enerjisine bağlı olarak akışkanın iç enerjisinde artışa neden olan, deformasyon işi uygulayıcılar. Türbülans, bu viskoz kayıpları karşılamak için sürekli enerji kaynağına (üretimine) ihtiyaç duyar. Eğer enerji sağlanamıyorsa, türbülans hızlı bir şekilde azalır.

Gelişigüzel akustik dalgalar (akustik gürültü) gibi düzensiz hareketlerdeki viskoz kayıplar önemsiz boyutlardadır ve dolayısıyla türbülanslı değildirler. Diğer bir deyişle, gelişigüzel dalgalarla türbülans arasındaki en önemli fark dalgaların dağılık olmaması (nondissipative, often dispersive) ancak türbülansın olmasıdır.

Türbülans akışkanlara ait bir özellik değildir, akışa ait bir özelliktir. Eğer Reynolds sayısı yeterince büyükse, sıvı veya gaz tüm akışkanlarda türbülans dinamiği hemen hemen aynıdır. Türbülanslı akışların temel karakteristikleri türbülansın oluştuğu akışkanın moleküler özellikleri tarafından kontrol edilmezler.

Türbülanslı akış alanını temsil eden Navier -Stokes denklemleri için genel bir çözüm yoktur. Benzer olarak türbülanslı akışlar için de genel çözümler henüz mevcut değildir. Her akış alanı farklı olduğundan, tüm türbülanslı akışların birçok ortak özelliği olduğu halde, her türbülanslı akışın farklı karaktere sahip olması evrensel çözüm modellerinin gelişimini imkansız kılmaktadır.

Türbülanslı akışlar üç ana grupta ifade edilebilir: Nokta yapılı (gridlike) akışlar, duvar kayma tabakalı akışlar (wall shear layer) ve serbest kayma tabakalı akışlar (free shear layers). Bu çalışmaya konu olan jet akışı serbest kayma tabakalı akışlara önemli örnek teşkil etmektedir.

Nokta yapılı türbülans, özel bir türbülans türüdür zira bu tür akışlarda türbülansın kendi kendini besleme özelliği gözlenmez. Bu tür akışlara silindir etrafında akış gösterilebilir. Silindir tarafından meydana getirilen girdaplar birbirleri ile etkileşir ve akış Re sayısı ve silindirin büyüklüğüne bağlı belirli bir mesafeden sonra homojen ve izotropik türbülanslı alan elde edilir. Türbülans yönden bağımsız şekilde oluşur ve akış yönündeki değişimlerin etkisi olmayacak şekilde sönümlenir.

Duvar kayma tabakalı akışlarda ise duvarın varlığı türbülans oluşumunda etkin faktördür. Örneğin kanal içindeki akışlarda türbülans karakteristikleri duvar tarafından yönetilir. Sınır tabaka akışları ve tüm iç akışlar bu kategoriye girer.

Serbest kayma tabakalı akışlar, farklı hızda hareket eden iki akışkanın karışma tabakasını, her türlü jet ve ard-iz akışını içerir. Bu akışların başlangıç noktasına yakın bulunan geçiş bölgesi türbülansın oluşumuna neden olan mekanizmaların etkin olduğu bölgelerdir. Alt akış bölgelerinde türbülanslı bölgenin genişliği daima artar.

2.2 İki Fazlı Türbülanslı Akışların Modellenmesi

Doğadaki akış şekilleri incelendiğinde hemen hemen tüm akışların türbülanslı olduğu görülür [42]. Türbülanslı akışları yöneten temel denklemlerin Navier-Stokes Denklemleri olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti [43]. Türbülanslı akışların çözümü için kullanılan zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes Denklemlerinin çözüm vermesi için, hız çalkantıları terimlerinin yaptığı katkıyı modelleyecek yeni yöntemler

gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle literatürde birçok model çalışması bulunmaktadır. Aşağıda bu yaklaşımlar kısaca özetlenmiştir.

Akış alanlarının incelenmesinde temel iki yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan ilki Euleriyan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda akış alanı içindeki özellikler belirli konumlarda tanımlanmakta ve bu konumlardan geçen akışın özellikleri incelenmektedir [44]. Lagranjiyan yaklaşımda ise akışa ait özellikler akışla beraber hareket eden elemanlar olarak düşünülmektedir [12, 18, 19].

Aşağıda iki fazlı türbülanslı akışların incelenmesinde kullanılan belli başlı yöntemler açıklanmıştır.

İki fazlı akışların modellenmesinde temel iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki akışkanlar mekaniğinin denklemlerinin ortalama formları kullanılan yöntem [44], ikincisi ise akış alanı (taşıyıcı faz) için Euleriyan yaklaşım kullanılırken partiküller için Lagranjiyan iletme yöntemidir [28, 30]. Bu çalışmada tanıtılan ve üçüncü bir yöntem olarak literatüre geçecek olan yaklaşım hem akışın hem de katı fazın Lagranjiyan yaklaşımla incelenmesidir. Bu üç temel yaklaşımı temel alan bazı modelleme yöntemleriyle ilgili kısa açıklamalar aşağıda verilmiştir.

İki fazlı türbülanslı akış alanlarında türbülans kapama problemlerinin çözümüne destek olan iki denklem modelleri, iki fazlı türbülanslı akışları modellemek için kullanılan en eski yöntemlerdendir. İki denklem modelleri içerisinde en çok kullanılan ve türbülansın doğasını en iyi temsil ettiğine inanılan yöntem türbülans enerjisi-disipasyon ($k-\epsilon$) modelidir. Bu modelde türbülans enerjisi ve disipasyon diferansiyel denklemleri çeşitli ayrıklaştırma yöntemleri ile nümerik denklemlere dönüştürülmektedir [42]. Bu şekilde hesaplanan türbülans alanı, partikül dağılımını hesaplamakta kullanılmaktadır [7].

Son on yılda yoğun kullanım alanı olan, Büyük Eddy Simülasyonu yöntemi (LES), hem modelleme, hem de Reynolds ortalama yaklaşımlarını içermektedir. Direkt modelleme büyük ölçekli akışın türbülanslı akışa katkısını incelemek için kullanılmaktadır. Türbülanslı akış içinde momentum ve enerji aktarımında büyük edilerin etkin olduğu yaklaşımı ile, yöntem bu etkileri hesaba katmada başarılı olmaktadır. Yöntem teknolojik akış problemlerindeki partikül dağılımlarını belirlemede avantajlıdır [6,7].

Son yirmi yılda yüksek Reynolds sayılı akışların modellenmesinde zamana bağlı girdap elemanı yöntemi yoğunlukla kullanılmaktadır [12, 13, 14, 16]. Bu yöntemin iki fazlı türbülanslı akışları modellemedeki avantajı, girdaplılık dinamiği ve büyük ölçekli girdaplı yapıların modelle yakın ilişkisidir. Yöntem Random Walk [43] yaklaşımı ile küçük ölçekli yapıların viskoz davranışları konusunda inceleme imkanı verebilmektedir. Yöntemde kullanılan matematiksel tekillikler olan ayrık girdaplardan oluşacak tekilliklerin önlenmesi için girdap çekirdeği yöntemi kullanılmaktadır [43].

Bilgisayar teknolojisindeki ilerleme, hesaplamalarda hızı belirgin olarak arttırırken, Direkt Sayısal Modelleme (DNS), lineer olmayan Navier-Stokes denklemlerinin üç boyutlu zamana bağlı çözümleri için nümerik bir yaklaşımı sağlamaktadır [26]. Bu yaklaşımla büyük boyutlu yapılardan Kolmogorov ölçekli küçük yapılara kadar türbülans karakterleri incelenebilmektedir. Yöntemin sayısal kısmı için sonlu farklar, sonlu elemanlar, spektral elemanlar, spektral ve poseido-spectral yöntemler kullanılmaktadır.

BÖLÜM 3

MATEMATİK MODEL

3.1 Akış Alanı Temel Denklemleri

İki boyutlu, viskoz, sıkıştırılamaz ve zamana bağlı akış alanlarının davranışını yöneten Navier-Stokes denklemleri kartezyen koordinatlarda;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad 3.1$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{F_x}{\rho} \quad 3.2$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{F_y}{\rho} \quad 3.3$$

u , v , x ve y yönündeki hızlar, p , termodinamik basınç alanı, ν kinematik viskozite, ρ yoğunluk, F_x ve F_y birim hacim için akışkan parçacıkları üzerindeki cisim kuvvetleridir. Eğer F_x ve F_y kuvvet değerleri bilinirse, 3 denklem, 3 bilinmeyen; u , v ve p , Euleriyan bir yaklaşımla akış alanı içinde çözülebilir. Elbette çözümün tek ve yalnızca tek olabilmesi için uygun hız ve basınç sınır koşullarının sağlanması gerekmektedir [39, 41].

Yukarıdaki denklemleri, akım fonksiyonu tanımını kullanarak tekrar düzenlemek mümkündür. Akım fonksiyonu, ψ ile, hız alanı arasındaki ilişki,

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad 3.4$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad 3.5$$

şeklindedir. İki boyutlu rotasyonel akışlar için tanımlanan girdap vektörü bileşeninin

$$w = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad 3.6$$

olduğu hatırlanırsa, akım fonksiyonu cinsinden girdaplılık denklemi

$$\nabla^2 \psi = -w \quad 3.7$$

şeklinde ifade edilebilir. Diğer taraftan, 3.2 ve 3.3 nolu denklemlerden birincisinin y, ikincisinin x'e göre türevini alınıp birbirinden çıkartılırsa, iki boyutlu girdaplılık taşınım denklemi elde edilir. Yani,

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial F_y}{\partial y} - \frac{\partial F_x}{\partial x} \right) \quad 3.8$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w = \nu \nabla^2 w + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_x}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial x} \right) \quad 3.9$$

ifadesi elde edilir [39].

Eğer akım alanı üzerinde viskozite ve diğer cisim kuvvetleri yok ise,

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w = 0 \quad 3.10$$

$$\frac{Dw}{Dt} = 0 \quad 3.11$$

viskoz olmayan girdaplılık taşınım denklemi elde edilir. Bu son hal Helmholtz Teoremi'ne uygun olarak, girdap şiddetinin, akım alanı viskoz değilse ve diğer kuvvetler yok ise sabit kaldığını göstermektedir [41]. Eğer cisim kuvvetleri sıfır ve viskoz kuvvetler mevcut ise,

$$\frac{Dw}{Dt} = \nu \nabla^2 w \quad 3.12$$

denklemini elde edilir.

Girdap elemanları yöntemi temelde viskoz etkilerin ihmal edildiği yüksek Reynolds sayılı akışların modellenmesine dönük geliştirilmiştir. O halde çözülen denklem

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w = 0 \quad 3.10$$

denklemdir. Denklemin Lagranjiyan çözümü nokta girdap tekillik takibi üzerine kurulmuştur [12]. Ancak Chorin [43] ve diğer birçok araştırmacının da gösterdiği gibi girdap tekillik yaklaşımı ile 3.12 no.lu denkleme de çözüm sağlamak mümkündür. Bu durumda viskoz difüzyonun zaman adımlı bir formülasyon ile modellenmesi gereklidir. İlk önce parçacıklar ilerletilmekte, daha sonra şiddetlerindeki değişme hesaplanmaktadır. Yani

1. Adım

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w = 0 \quad 3.10$$

Girdap tekilliklerin Lagranjiyan takibi bu adıma çözüm sağlamaktadır.

2. Adım

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nu \nabla^2 w \quad 3.13$$

Taşınan girdapların şiddetleri ya Lagranjiyan [12] ya da Euleriyan [14, 45] yaklaşımla yeniden hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada ikinci faz olan parçacıkların akış alanı üzerine uyguladıkları cisim kuvvetleri hesaplamalarını ve bu cisim kuvvetlerinin 3.9 no.lu denklemin 3 adımlı çözümünü öngörmüştür.

1. Adım

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w = 0 \quad 3.10$$

2. Adım

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nu \nabla^2 w \quad 3.12$$

3. Adım

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_y}{\partial y} - \frac{\partial F_x}{\partial x} \right) \quad 3.14$$

Görüldüğü gibi girdaplılık taşınmakta, viskoz difüzyon ve cisim kuvvetleri altında değişmektedir. Cisim kuvvetleri olarak bu çalışmada parçacıkların yaptığı etki alınmıştır. Aşağıdaki bölümlerde yukarıda teorik temelleri sunulan yaklaşımın ayrıntıları açıklanmıştır.

3.1 Jet Akışının Ayrık Girdap Yaklaşımı ile Modellenmesi

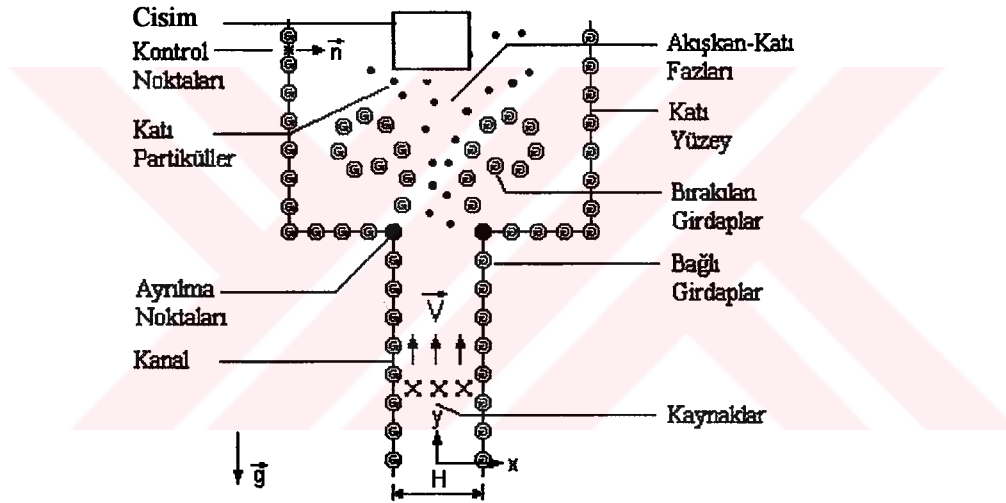
Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle işlem kapasitesi ve hızının artması ile birlikte Girdap Elemanı Yöntemleri çok sayıda değişik akış probleminin çözümünde artan bir ilgi ile kullanılmaktadır [12, 13]. Girdap Elemanı Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen jet, ardiz akışı ve karışma tabakalı akış simülasyonlarında elde edilen başarılar yöntemin daha kompleks problemlerde kullanılması konusunda araştırmacılara cesaret vermektedir. Bu çalışmada, çok kullanılan bir girdap Elemanı Yöntemi olan Ayrık Girdap Yöntemi, iki fazlı jet akışı ve akışın alt akış bölgesine yerleştirilmiş bir cisim ile etkileşiminin incelenmesinde kullanılmıştır. Katı partiküller akışın ikinci fazını oluşturmaktadır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde serbest jet ve sınırlı jet ile cisim etkileşimi incelenmiştir.

Ayrık girdap yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen modellemelerde, girdap tekillikler iki temel amaçla kullanılmaktadırlar. İlk amaç, akış alanı içindeki katı cisim yüzeylerin modellenmesidir. Bu amaçla kullanılan girdap tekilliklere “Bağlı girdap” adı verilmektedir. Katı cisim cidarının bulunduğu konumlara, bağlı girdaplar

yerleştirilerek yüzeyler panellere bölünmüş olmaktadır. Sayısal modellerde panellerin yüzey gibi davranması için, orta noktalarında yazılan sınır şartları kullanılmaktadır.

Ayrık girdap yönteminde, girdap tekilliklerin kullanılmasının ikinci amacı ise, problemin doğasına bağlı olarak gelişecek ayrılmalı akışın modellenmesidir. Bu amaçla kullanılan girdaplara “Serbest girdap” adı verilir. Ayrılmalı akış, serbest girdaplar zamana bağlı olarak akış alanı içine bırakılarak modellenir.

Şekil 3.1’de bu çalışmada kullanılan, Ayrık Girdap Yöntemi ile oluşturulmuş akış geometrisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Akış Geometrisi ve tanımlar

Şekilden görüldüğü gibi, çalışılan geometri dar bir kanalın açıldığı geniş bir hesap alanından oluşmaktadır. Hesap alanının alt akış bölgesine bir cisim yerleştirilmiştir. Serbest jet geometrisi, yan duvarların kaldırılması ile daha az sayıda girdap kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Şekilde gösterilen kontrol noktaları, bağlı girdap şiddetlerinin hesaplanması için kullanılan $\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$ sınır koşullarının yazıldığı noktalardır. N adet kontrol noktasında

yazılan sınır şartları, N adet girdabın şiddetlerini bilinmeyen olarak içeren bir denklem takımı vermektedir. Denklem takımının çözümünden bağlı girdap şiddetleri elde edilmektedir. Yöntemin detayları Bölüm 4'te açıklanmaktadır.

Şekil 3.1'de gösterilen kanaldan geçen yüksek Reynolds sayılı akış, ani genişlemenin gerçekleştiği köşelerden akım ayrılmasına ve ortamda girdap bölgelerinin oluşumuna neden olmaktadır. Aynı zamanda, alt akış bölgesindeki cismin köşelerinden de ayrılma gerçekleşmekte ve cisim arkasında ard-iz akışı (wake) oluşmaktadır. Oluşturulan modelde sözü edilen etkiler, ayrılma noktalarından ortama serbest girdaplar bırakılarak sağlanmıştır.

Her zaman adımında ortamdaki girdap sayısı arttığı için, kontrol noktalarındaki sınır koşulları yeniden yazılmakta ve bağlı girdap şiddetleri yeniden sağlanarak güncellenmektedir.

Ana jet akışı, kanal içine yerleştirilen kaynak tekillikler kullanılarak yaratılmaktadır. Kaynaklar, kanalın belirlenen bir kesiti boyunca yerleştirilmişlerdir. Belirlenen toplam kaynak şiddeti, kaynak tekilliklere lineer veya parabolik şekilde dağıtılabilir. Toplam kaynak şiddeti değiştirilerek çeşitli Reynolds sayılı akışlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada Reynolds sayısı hesaplanmasında havanın akışkan faz olarak özellikleri kullanılmıştır.

3.3 İki Fazlı Akışın Modellenmesinde İzlenen Yaklaşım

Bu çalışmada incelenen iki fazlı jet akışı probleminde, akışkan faz (taşıyıcı faz) hava ve katı faz ise değişik çap ve malzemeden partiküllerden oluşmaktadır. Akışkan içindeki katı partiküllerin hareketi ile ilgili hareket denklemleri akışkanlar mekaniği literatüründen bilinmektedir. İki fazlı akışların önemli problemlerinden bir tanesi, akış içindeki katı partiküllerinin nasıl hareket ettiği değil, partiküllerin taşıyıcı fazı nasıl

etkilediği ve değiştirdiği sorusudur [46, 47, 48]. Özellikle partikül çapı büyüdükçe, akışın temel özelliklerinde son derece dikkate değer değişimler olmaktadır. Bu nedenle, katı-akışkan sistemler için çözümler Pasif Etkileşim Yaklaşımı (One Way Coupling Approach) ve Aktif Etkileşim Yaklaşımı (Two Way Coupling Approach) olarak adlandırılan iki temel yaklaşımla gerçekleştirilmektedir [6, 7].

Bu çalışmada iki fazlı jet, her iki yaklaşım da kullanılarak incelenmiştir. Jet akışı yüksek Reynolds sayısında, 10^4 mertebelerde seçilmiştir. Bu mertebelerde akış türbülanslı özelliklere sahiptir. Bu nedenle çalışmada jet akışı, türbülanslı jet akışının özelliklerini taşıdığı kabul edilmiştir.

Bölüm 5 'te her iki yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçlar detaylarıyla incelenmiştir. Bu bölümün ilerleyen başlıkları altında iki yaklaşım detaylı olarak açıklanmaktadır.

3.3.1 Pasif Etkileşim Yaklaşımı (One Way Coupling Approach)

Teknoloji ve günlük hayatta karşılaşılan katı-akışkan iki fazlı akışlar çok değişik katı-akışkan çiftlerini içermektedir. Katı partiküller yoğunluk ve büyüklük açısından büyük çeşitlilik göstermektedir. Bazı katı-akışkan iki fazlı akışlarda karşılaşılan katı partiküller büyüklük ve yoğunluklarının düşük olması nedeni ile içerisinde bulundukları taşıyıcı fazın hareketi üzerinde, akışın temel özelliklerinde anlamlı değişiklik yaratacak kadar etkili olmamaktadırlar. Örneğin, havadaki toz tanelerinin hava hareketlerine etkisi ihmal edilebilecek kadar düşüktür. İki fazlı akış çözümlerinde bu tür katı-akışkan çiftleri ile çalışılması durumunda katı fazının akışa etkisi ihmal edilmektedir. Böylece çözüm önemli ölçüde basitleşmekte ve anlamlı derecede hata yapılmamış olmaktadır. Bu yaklaşım akışkanlar mekaniği literatüründe Pasif Etkileşim Yaklaşımı (PEY) olarak anılmaktadır.

Bu yaklaşımda, partiküllerin bulundukları konumlardaki akış hızları kullanılarak, partikül hızları hesaplanır ve hareket denklemleri entegre edilerek partiküllerin yeni konumları belirlenir [6, 7].

3.3.2 Aktif Etkileşim Yaklaşımı (Two Way Coupling Approach)

Bazı katı-akışkan iki fazlı akışlardaki katı fazın özellikleri (yoğunluk, hacim, kütle) akış alanını değiştirmektedir. Kullanımı her geçen gün artmakta olan akışkan yatak sistemleri bu konuya örnek olarak gösterilebilir. Akışkan yatakla yüzey sertleştirme sistemlerinde kullanılan partikül fazının görevi yüzeyi sertleştirilecek cisim etrafında türbülanslı bir ortam yaratmak ve ortamdan cisme gerçekleşen ısı transferinin homojen olmasını sağlayarak üniform ve yüksek kaliteli yüzey sertliği değerlerine ulaşmaktır. Bu tür uygulamalarda karşılaşıldığı gibi, akış içindeki ikinci fazın akışı etkilemesi bazı hallerde istenen bir olaydır. Katı fazın, taşıyıcı faz üzerindeki etkilerinin incelendiği bu yaklaşım akışkanlar mekaniği literatüründe Aktif Etkileşim Yaklaşımı (AEY) olarak adlandırılmaktadır [6, 7].

BÖLÜM 4

BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODEL

4.1 Problemin Doğası

Bu çalışmada katı-akışkan fazlı, jet akışı ve bu akışın yan duvarlar ve akım altı cisim ile etkileşimi incelenmiştir. İki fazlı jet akışı günlük hayatta ve teknolojik uygulamalarda sıkça rastlanan önemli bir akışkanlar mekaniği konusudur [46, 47, 48]. Çalışmada ani genişleme ile oluşan iki fazlı jetin serbest ve duvarlarla sınırlı durumdaki davranışları incelenmiştir. Taşıyıcı faz içerisindeki katı partiküllerin dağılımları ve ortamın ısıtılması halinde akış alanı ile partikül sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi de hesaplanmıştır. İleri aşamalarda alt akış alanına bir cisim eklenmiş ve jet-cisim etkileşimi ile partikül dağılımı-cisim etkileşimi ve partikül konsantrasyonu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile jet hızı, partikül büyüklüğü, cisim konumu, duvar etkisi gibi parametrelerin partikül dağılımı ve akışa etkileri incelenerek hesap alanı içerisindeki homojen dağılımın nasıl elde edilebileceği irdelenmiştir.

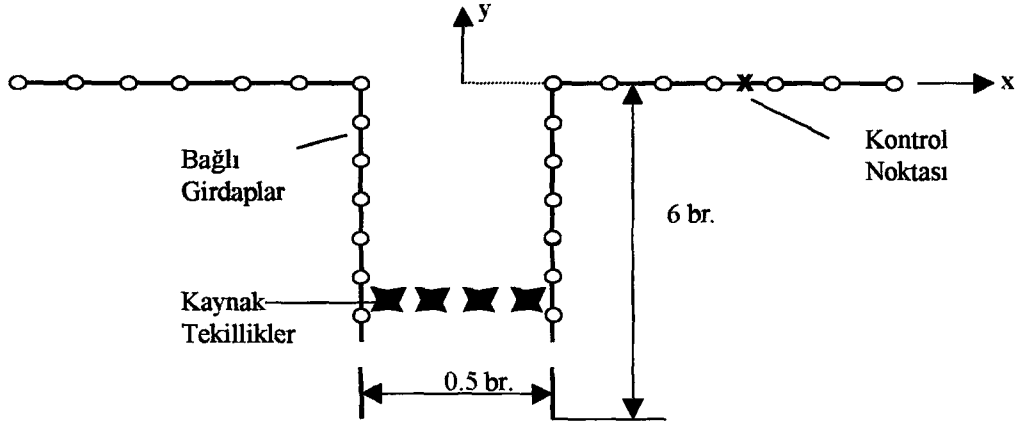
4.2 Geometrik ve Fiziksel Tanımlar

4.2.1 Kanal geometrisi

Çalışmada iki temel geometri kullanılmıştır. Bunlar iki fazlı jetin serbest gelişimi için kullanılan kanal yapısı ve jetin kapalı geometri içindeki davranışını incelemek üzere yanlarda duvarlarla sınırlandırılmış geometridir.

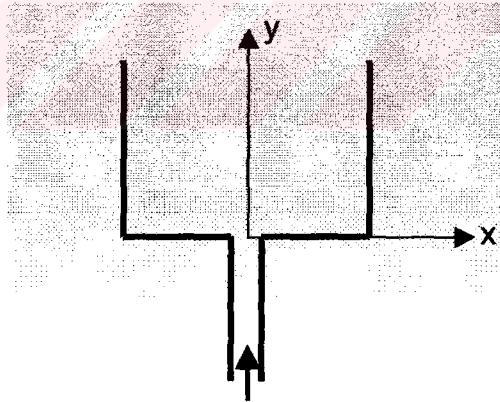
Şekil 4.1 çalışmada kullanılan kanal geometrisini göstermektedir. Kanal, 6 birim yükseklikte ve 0.5 birim genişliktedir. Kanal duvarları bağlı girdap tekillikler kullanılarak oluşturulmuştur. Duvarları oluşturan her ardışık girdabın arasındaki mesafenin orta noktalarında sınır koşullarının yazıldığı kontrol noktaları bulunmaktadır.

Bağlı girdapların şiddetleri bu noktalarda yazılan sınır koşullarının çözümü ile elde edilmektedir. Her duvar üzerindeki girdap sayısı şekilde belirtilmiştir.



Şekil 4.1 Jet akışının oluşturulduğu kanal geometrisi

Şekil 4.2 'de ise duvarla sınırlandırılmış jetin çözümünde kullanılan geometri gösterilmektedir. Şekil 4.1'den farklı olarak yanlarda yükseltilmiş duvarlar da bağlı girdap tekillikler kullanılarak kanal yapısı ile aynı mantıkla geliştirilmiştir.

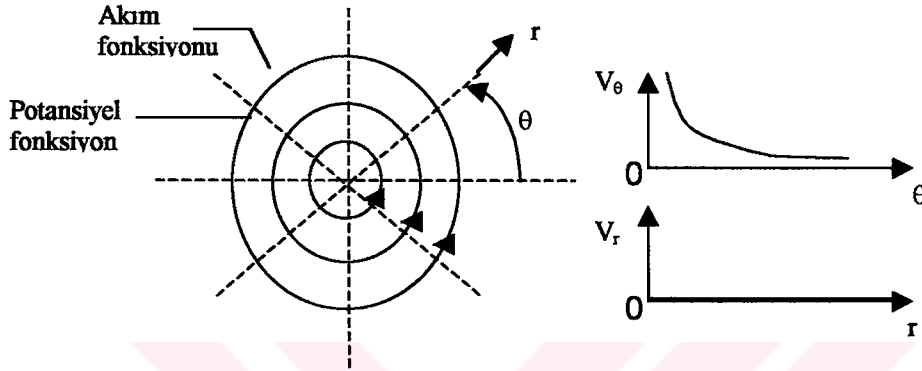


Şekil 4.2 Sınırlandırılmış jet uygulamaları için kanal geometrisi

Ayrık girdap yönteminde kullanılan bir girdap tekillik için temel özellikleri aşağıda görülmektedir. 2 boyutlu rotasyonel olmayan girdap için temel formülasyonlar, potansiyel teori ile uyumlu olarak hız lanaları, akım fonksiyon ve hız potansiyel fonksiyon aşağıda verilmiştir [41].

$$V_r = 0 \quad V_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad 4.1$$

$$\psi = -\frac{\Gamma}{2\pi} \ln r \quad \Phi = -\frac{\Gamma}{2\pi} \theta \quad 4.2$$



Şekil 4.3 Girdap tekillik için akım çizgileri (çizgiler) ve eşpotansiyel çizgileri (kesikli) ile radyal ve açısız hız profilleri

Burada Γ girdabın sirkülasyon şiddetidir.

Bağılı girdapların, hesap alanının herhangi bir noktasına indüklediği hızı veren vektörel denklem,

$$\vec{V}_{BAG} = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^{N_B} \Gamma_i \left\{ \frac{(y - y_i)\vec{i} + (x - x_i)\vec{j}}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right\} \right] = u_B \vec{i} + v_B \vec{j} \quad 4.3$$

şeklindedir [41]. Bu denklemde,

$\vec{V}_{BAG}$, bağılı girdapların akış alanındaki bir noktaya indükledikleri hız,

Γ_i , i. girdabın şiddeti,

y , hız indüklenen noktanın ordinatı,

x , hız indüklenen noktanın apsisi,

y_i , i. girdabın ordinatı,

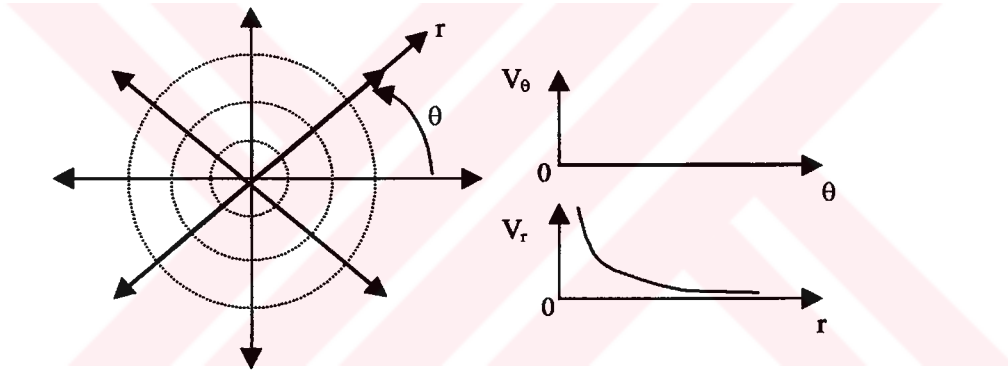
x_i , i. girdabın apsisi,

N_B , bağı girdap sayısını göstermektedir.

Jet akışının oluşturulması için kanal içine yerleştirilmiş kaynak tekillikler kullanılmıştır (Bkz. Şekil 4.1). Kaynaklar da girdaplar gibi potansiyel akış teorisinde yer alan tekilliklerdir [41]. Kaynak tekillikler ile ilgili temel tanımlar aşağıda verilmiştir.

$$V_r = \frac{\sigma}{2\pi r} \quad V_\theta = 0 \quad 4.4$$

$$\psi = \frac{\sigma}{2\pi} \theta \quad \Phi = -\frac{\sigma}{2\pi} \ln r \quad 4.5$$



Şekil 4.4 Kaynak tekillik için akım çizgileri (çizgiler) ve eşpotansiyel çizgileri (kesikli) ile radyal ve açısız hız profilleri

Burada σ kaynak şiddetidir.

Kanalın içindeki belirli bir konuma akışı yaratan kaynak tekillikler yerleştirilmiştir. Tekillikler kanal genişliği boyunca istenen sayıda noktaya lineer ve parabolik şekilde dağıtılabilmektedir. Kaynak şiddetleri modele dışarıdan girilmekte ve kaynak şiddetinin artması çıkış ağzındaki Re sayısını artırmakta ve daha hızlı bir jet elde edilmektedir. Kaynaklar tarafından akış alanının herhangi noktasına indüklenen hız alanının vektörel formülasyonu,

$$\vec{V}_K = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^{N_K} \sigma_i \left\{ \frac{(x-x_i)\vec{i} + (y-y_i)\vec{j}}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right\} \right] = u_K \vec{i} + v_K \vec{j} \quad 4.6$$

şeklindedir. Burada,

$\vec{V}_K$, Kaynakların akış alanındaki bir noktaya indükledikleri hız,

σ_i , i. kaynağın şiddeti,

y , hız indüklenen noktanın ordinatı,

x , hız indüklenen noktanın apsisi,

y_i , i. kaynağın ordinatı,

x_i , i. kaynağın apsisi,

N_K , Kaynak sayısını göstermektedir.

Bu durumda akış alanının herhangi noktasına indüklenen toplam hız 4.3 ve 4.6 eşitlikleri ile ifade edilebilir.

$$\vec{V} = \vec{V}_K + \vec{V}_{BAG} \quad 4.7$$

4.2.2 Girdap bırakma modeli

Bölüm 3 Şekil 3.1 'de akış alanının şematik gösterimi çizilmiştir. Kaynak tekillikler yardımı ile oluşan akış, kanal çıkışındaki ani genişleme ile bir jet akışını yaratmaktadır. Yüksek Re sayılı gerçek akışlarda ani genişlemenin gerçekleştiği kenarlardan akış alanına girdap kopmaları gerçekleşmektedir. Çalışmada, bu akım kopmasını simüle etmek üzere a ve b noktalarından her zaman adımında ortama birer serbest girdap tekillik bırakılmıştır. Bu girdapların şiddetleri kanal içindeki sınır tabakada üretilen girdaplılık göze alınarak tayin edilmektedir. Her zaman adımında ortamdaki girdap sayısı değiştiği için bağlı girdapların şiddetleri tekrar hesaplanmaktadır. Ortama bırakılan girdaplar zamana bağlı olarak Lagrangian bir yaklaşımla izlenmektedir.

Bırakılan girdapların akış alanına indükledikleri hızlar, bağlı girdaplara benzer bir şekilde,

$$\vec{V}_{BIG} = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^{N_{BIG}} \Gamma_i \left\{ \frac{(y - y_i)\vec{i} + (x - x_i)\vec{j}}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right\} \right] \quad 4.8$$

formülasyonu ile ifade edilmektedir. Burada,

$\vec{V}_{BIG}$, Kanal çıkış köşelerinden bırakılan girdapların akış alanındaki bir noktaya indükledikleri hız,

Γ_i , i. girdabın şiddeti,

y , hız indüklenen noktanın ordinatı,

x , hız indüklenen noktanın apsisi,

y_i , i. girdabın ordinatı,

x_i , i. girdabın apsisi,

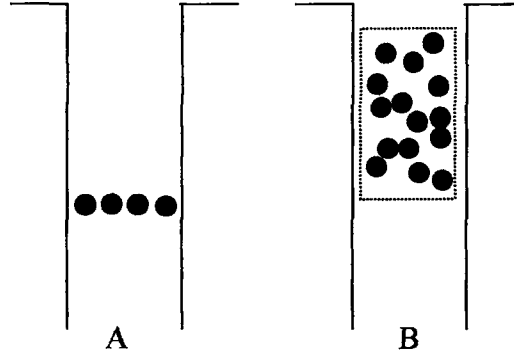
N_{BIG} , bağlı girdap sayısını göstermektedir.

Akış alanına bırakılan girdaplar da gerek kontrol noktalarına, gerekse de akış alanının diğer noktalarına hız indüklemektedirler. Bu nedenle artık bir noktaya indüklenen hız için 4.9 nolu denklem geçerli olacaktır.

$$\vec{V} = \vec{V}_K + \vec{V}_{BAG} + \vec{V}_{BIG} \quad 4.9$$

4.2.3 Katı partikül fazı

İki fazlı akışın katı bileşenleri olarak değişik çaplarda (50-125 mikron) alüminyum partiküller kullanılmıştır. Katı partiküller kanal içinde çıkış ağzında aşağıdaki konumdan akış içersine bırakılmaktadır. Partiküllerin başlangıç konumları lineer veya gelişigüzel seçilebilmektedir (model A ve B).



Şekil 4.5 Partikül başlangıç konumları için iki model

Akışkan fazı içerisindeki katı partiküllerin hareketi iki temel yaklaşımla incelenebilir. Bunlardan birincisi partiküllerin hareketlerinin sadece cisim ve yüzey kuvvetleri dikkate alınarak incelendiği yaklaşım “Dilute flow” yaklaşımıdır. Diğeri ise katı partiküllerin hareket mekanizmasında partiküller arasındaki etkileşimin de incelendiği yaklaşım “Dense flow” yaklaşımıdır. Çalışmada dense flow yaklaşımı kullanılmıştır.

Akış içerisindeki partiküllere etkiyen kuvvetler sürüklenme kuvveti, üniform olmayan akıştan doğan gerilme tensörü etkisi, virtüel kütle etkisi, Basset etkisi, Saffman kaldırma kuvvetleri ve ağırlık olarak sıralanabilir. Çalışmada etkileri kuvvetli olan sürüklenme ve ağırlık kuvvetleri kullanılmış, etkileri düşük olan diğer kuvvet terimleri ise ihmal edilmiştir.

Üniform olmayan, zamana bağlı akışlarda partiküle akış nedeni ile gelen kuvvetler ve cisim kuvvetleri olarak adlandırılacak etkiler bulunmaktadır [3, 11]. Partikülün ivmelenmesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [11],

$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = F_l(\vec{U}_g - \vec{U}_p) + \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p}\right) \vec{g} \quad 4.10$$

Burada

$\vec{U}_g$ akışkan hızı,

$\vec{U}_p$ partikül hızı,

ρ_g akışkanın yoğunluğu,

ρ_p partikülün yoğunluğu ve

F_1 sürüklenme katsayısıdır. Sürüklenme katsayısı Parçacık Re Sayısına bağlı olarak belirlenmektedir.

Bu çalışmada kullanılan Aktif Etkileşim Yaklaşımının (EAY) modelleme aşamaları aşağıda açıklanmıştır.

1. Adım

Akışkan fazı içindeki katı partiküllerin hareketi incelendiğinde, hareketi yöneten çok sayıda kuvvet olduğu görülmektedir. Bu çalışmada adı geçen kuvvetlerden sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti ve ağırlık kuvvetleri hesaba katılmıştır.

Partikül üzerinden geçen akışın hızı ile partikülün hızı birbirinden farklıdır. Hızlar arasındaki bu fark partikül üzerinde bir sürüklenme kuvveti oluşturmaktadır. Partikül üzerindeki sürüklenme kuvvetini hesaplamak için literatürde aşağıdaki denklemler verilmektedir [11]. Partikül üzerindeki bu kuvvetin tersi akışkan üzerine etkiyen tepki kuvveti olacaktır.

$$F_x = F_1(u_a - u_p) \quad 4.11$$

$$F_y = F_1(v_a - v_p) - \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)g \quad 4.12$$

Burada F_1 parçacık Reynolds sayısına bağlı bir katsayı, u_a, v_a akış hızının x ve y bileşenleri, u_p, v_p partikül hızının x ve y bileşenleri, ρ_a akışkanın yoğunluğu, ρ_p partikül yoğunluğu ve g yerçekimi ivmesidir. Partikül Reynolds sayısı ve buna bağlı olarak F_1 katsayısı seçimi için kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir.

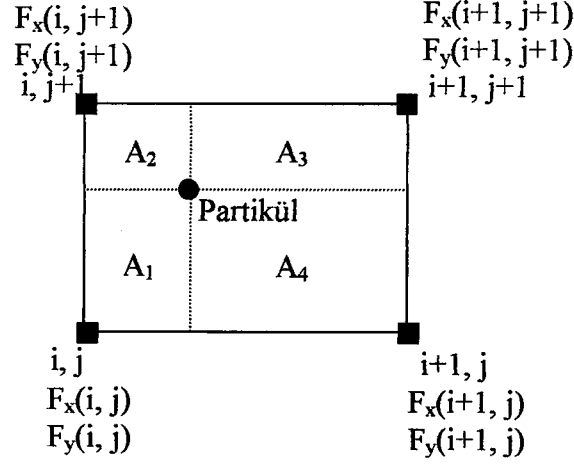
$$Re_p = \frac{|U_p - U_a|d}{\nu} \quad 4.13$$

$$F_1 = \begin{cases} \frac{18\nu_g}{d_p^2} \frac{\rho_a}{\rho_p} \left(1 + \frac{3}{16} Re_p\right) & Re_p < 0.01 \\ \frac{18\nu_g}{d_p^2} \frac{\rho_a}{\rho_p} \left(1 + 0.315 Re_p^{0.82-0.05 \log Re_p}\right) & 0.01 < Re_p < 20.0 \end{cases} \quad 4.14$$

Denklem 4.13 kullanılarak her zaman adımında, akış alanı içindeki tüm partiküller için Re_p hesaplanır ve elde edilen değerler yardımı ile 4.14 karşılaştırması yapılarak kullanılacak F_1 katsayı ifadesi seçilir. Seçilen F_1 katsayıları kullanılarak her partikül üzerindeki yatay ve düşey toplam sürüklenme kuvvetleri hesaplanır.

2. Adım

Partiküller üzerine gelen kuvvetlerin akış alanına etki ettirilmesi için hesap alanı hücrelere, ağırlara bölünür. Hücreler içine düşen partiküller üzerinde akışın yaratmış olduğu kuvvetler hücrelerin köşe noktalarına alan ağırlık yöntemi ile dağıtılır. Yöntemin esasını, partikülün hücre içindeki konumunun merkez alınarak hücrenin dört bölgeye ayrılması ve dağıtılacak büyüklük olan kuvvetin elde edilen alanların büyüklüğü ile ters orantılı olarak köşelerdeki grid noktalarına bölüştürülmesi oluşturmaktadır. Şekil 4.6'da çalışma mantığı hücre içinde bir partikül bulunması hali için şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Ağırlıklı alan yönteminin partikül kuvvetlerine uygulanması

Hücre içinde n tane partikül olması durumunda, A hücre alanı olmak üzere, kuvvet dağıtma denklemleri,

$$F_x(i, j) = \sum_{i=1}^n F_{xi} \frac{A_3}{A} \quad F_y(i, j) = \sum_{i=1}^n F_{yi} \frac{A_3}{A} \quad 4.15$$

$$F_x(i+1, j) = \sum_{i=1}^n F_{xi} \frac{A_2}{A} \quad F_y(i+1, j) = \sum_{i=1}^n F_{yi} \frac{A_2}{A} \quad 4.16$$

$$F_x(i+1, j+1) = \sum_{i=1}^n F_{xi} \frac{A_1}{A} \quad F_y(i+1, j+1) = \sum_{i=1}^n F_{yi} \frac{A_1}{A} \quad 4.17$$

$$F_x(i, j+1) = \sum_{i=1}^n F_{xi} \frac{A_4}{A} \quad F_y(i, j+1) = \sum_{i=1}^n F_{yi} \frac{A_4}{A} \quad 4.18$$

şeklini almaktadır.

3. Adım

Grid noktalarında elde edilen kuvvet dağılımı girdaplılık alanının yenilenmesi için kullanılmaktadır. Kuvvet dağılımı, merkezsiz sonlu farklar yaklaşımı ile

ayrıklaştırılarak denkleme konulmaktadır. Girdaplılık değerinin partiküllerden gelen kuvvete bağlı olarak değişimi,

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial F_y}{\partial y} - \frac{\partial F_x}{\partial x} \right) \quad 4.19$$

$$\omega_{i,j} = \omega_{i,j} - \left[\frac{F_y(i+1,j) - F_y(i-1,j)}{2\Delta x} - \frac{F_x(i,j+1) - F_x(i,j-1)}{2\Delta y} \right] \Delta t \quad 4.20$$

4. Adım

Bu adımda elde edilmiş girdaplılık dağılımlarından yola çıkarak hesap alanındaki akım fonksiyonu değerleri çözülmektedir. Bilindiği gibi potansiyel akış teorisinde z eksenine etrafındaki girdaplılık ifadesi,

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad 4.21$$

şeklindedir. Akım fonksiyonu ψ ile hız bileşenleri arasındaki ilişki ise,

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad 4.22$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad 4.23$$

şeklinde tanımlanmaktadır ve denklem 34 , denklem 'de yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad 4.24$$

şeklinde Poisson denkleminde ulaşılmaktadır. Denklemin ψ için çözülmesi oluşturulan grid noktalarındaki akım fonksiyonu değerlerini vermektedir.

5. Adım

Bu adımda, grid noktalarında elde edilmiş akım fonksiyonu değerleri, her grid noktası için u_{ek} ve v_{ek} ek hız bileşenlerine dönüştürülmektedir. 3.4 ve 3.5 denklemleri grid yapısı için merkezsiz sonlu farklar yaklaşımı ile ifade edilirse,

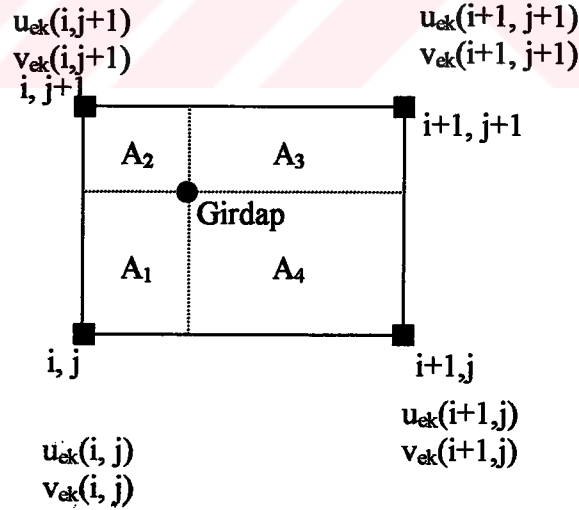
$$u_{ek}(i, j) = \frac{\psi(i, j+1) - \psi(i, j-1)}{2dy} \quad 4.25$$

$$v_{ek}(i, j) = \frac{\psi(i+1, j) - \psi(i-1, j)}{2dx} \quad 4.26$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin sonucunda ek hız bileşenleri hesaplanmış olur.

6. Adım

Elde edilen ek hız bileşenleri, adım 2'de tanımlanmış hücre içine düşen girdaplara ağırlıklı alan yöntemi kullanılarak dağıtılır.



Şekil 4.7 Ağırlıklı alan yönteminin girdap kuvvetlerine uygulanması

7. Adım

Son adımda ise girdaplar, hesaplanmış konumlarına ek hız bileşenlerinden gelen katkılar integre edilerek elde edilen ek yer değiştirme miktarları eklenerek ilerletilir.

$$x_{girdap} = x_{girdap} + u_{ek} dt \quad 4.27$$

$$y_{girdap} = y_{girdap} + v_{ek} dt \quad 4.28$$

4.2.4 Cisim modellemesi

Şekil 4.7 'de hesap alanı içindeki cisim temsili olarak gösterilmiştir. Cisim katı yüzeyleri de kanal ve hesap alanı duvarları gibi bağlı girdap tekillikler kullanılarak oluşturulmuştur. Cismin yatay ve düşey konumu ile dönme açısı dışarıdan girilmektedir. Cismin dört köşesinden akış alanı içerisine her zaman adımında birer serbest girdap bırakılmakta ve kanal çıkışından bırakılan girdaplar gibi Lagrangian yöntemle takip edilmektedir. Bu girdapların indükledikleri hızlar denklem 4.8 ile hesaplanabilir.

Böylece akış alanı içinde cisim bulunması halinde akış alanı içindeki herhangi noktaya indüklenen hız aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

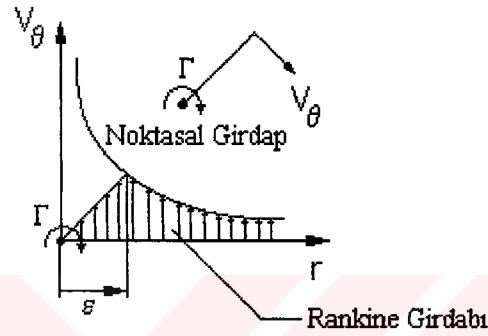
$$\vec{V} = \vec{V}_K + \vec{V}_{BAG} + \vec{V}_{BIG} + \vec{V}_{CISG} + \vec{V}_{CISBIG} \quad 4.29$$

4.2.5 Girdap Çekirdeği Modeli

İnvisid ayrık girdap, merkezine sonsuz hız indükler. Dolayısıyla, girdabın merkezine yakın konumlara son derece yüksek hızlar indüklenmektedir. Fiziksel olarak imkansız olan bu durumun önüne geçebilmek için çalışmada Rankine Girdap Modeli uygulanmıştır [41]. Bu model uyarınca girdap şiddeti aşağıdaki gibi değiştirilmektedir;

$$V_{\theta} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi r^2} \Gamma & (r \geq \epsilon) \\ \frac{r}{2\pi \epsilon^2} \Gamma & (r \leq \epsilon) \end{cases} \quad 4.30$$

Burada V_{θ} teğetsel hızı, Γ girdabın şiddetini, r girdabın merkezinden uzaklığı ve ϵ ise core yarıçapını göstermektedir. Şekil 4.8 'de Rankine girdabı tarafından indüklenen teğetsel hız alanı gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Girdap çekirdeği yönteminde uygulanan teğetsel hız profili

4.2.6 Viskoz Etkiler Modeli

Viskoz etkilerin modele dahil edilmesi için, Chorin [43] tarafından geliştirilen “Random Walk” yöntemi kullanılmıştır. Difüzyon tarafından oluşturulan girdaplılık, girdaplara gelişigüzel bir hareket vermektedir. Bu nedenle modelde, girdaplar önce Biot-Savart Kanunu’na göre ilerletilmekte ve sonra konumlarına gelişigüzel bir artış miktarı verilmektedir. Girdapların yeni konumları (X_i^{n+1}, Y_i^{n+1}) ,

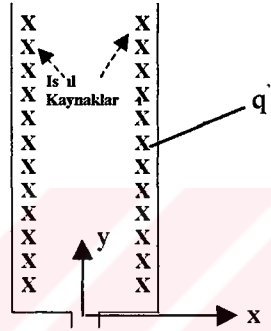
$$\begin{aligned} X_i^{n+1} &= X_i^n + \eta_1 \\ Y_i^{n+1} &= Y_i^n + \eta_2 \end{aligned} \quad 4.31$$

olmaktadır. Burada η_1 ve η_2 Chorin [43] tarafından belirtilmiş rastgele sayılardır.

4.3 Sıcaklık Alanının Hesaplanması

4.3.1 Akış Alanı

Şekil 3.1 'de açıklanan geometri içerisinde incelenen önemli bir olay sıcaklık alanıdır. Katı-akışkan iki fazlı akışlara rastlanılan teknolojik uygulamalardaki önemli bir amaç akış alanı içindeki sıcaklık alanının homojenleştirilmesi ve akış alanı içerisindeki herhangi bir cisim ile etkileşimde cismin her yerinde aynı sıcaklık mertebesinin yakalanmasıdır. Çalışmada Şekil 4.9 'da gösterilen noktalardan hesap alanına ısı akışı sağlanmış ve zamana bağlı sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 Isı kaynakları ve kanal geometrisi

Hesap alanı içinde klasik enerji denklemi çözülmemektedir [39].

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{q''}{\rho c} \quad 4.32$$

Sıcaklık alanının hesaplanması için denklem 4.32, Sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Sonlu farklar ayrıklaştırması sonucunda denklem

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} + u_{i,j} \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n}{\Delta x} + v_{i,j} \frac{T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n}{\Delta y} = \alpha \left[\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right] + \frac{q''_{i,j}}{\rho c} \quad 4.33$$

halini almaktadır [39].

Denklemden belirtilen u , v oluşturulan grid yapısının düğüm noktalarında hesaplanan hız bileşenleridir.

4.3.2 Katı Faz Alanı,

Bu çalışmada, akış alanı içinde ikinci fazı oluşturan katı partiküllerin sıcaklık değişimleri de incelenmiştir.

Katı partiküller, bazı iki fazlı akış uygulamalarında yakılmakta, bazılarında ise türbülansı artırmak için kullanılmakta ve ortamın sıcaklık dağılımının iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu nedenle partiküllerin zaman içindeki sıcaklık değişimlerinin incelenmesi önem kazanmaktadır.

Partiküllerin zamana bağlı sıcaklık değişiminin hesaplanması için klasik ısı transferinin denklemleri kullanılmaktadır.

Bilindiği gibi akış içindeki bir cismin yüzeyinden ortama veya ortamdan cisme gerçekleşen ısı transferi aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = hA(T_{\infty} - T) \quad 4.35$$

Denklem zamana göre entegre edilirse,

$$T = T_{\infty} + Ce^{\frac{hA}{\rho c V} t} \quad 4.36$$

elde edilir. C katsayısını belirlemek üzere başlangıç koşulu olarak $t=0$ anında partikül sıcaklığı $T=T_0$ seçilirse sabit,

$$C = T_0 - T_\infty \quad 4.37$$

elde edilir. Sabit denklemde yerine yazılırsa, katı partikülün zamana bağlı sıcaklık değişimi için,

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty) e^{\frac{hA}{\rho c V} t} \quad 4.38$$

elde edilir. Denklemdeki T_0 partikülün başlangıç sıcaklığı olup, $t=0$ için ortam sıcaklığına eşit seçilmiştir. T_∞ , ortam sıcaklığı olup denklem 4.33'ün çözümünden elde edilen, grid yapısında ifade edilen sıcaklık dağılımı değerlerinin ağırlıklı alan yöntemi ile partikülün bulunduğu konuma indirgenmesi ile elde edilmiştir.

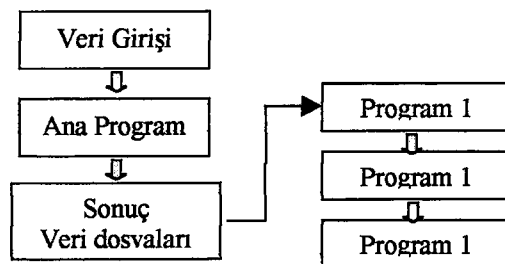
Isı taşınım katsayısının tespiti için Achenbach [49] tarafından önerilen;

$$Nu = 2 + \left(0.4 Re^{1/2} + 0.06 Re^{2/3} \right) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_w} \right)^{1/4} \quad 3.5 < Re < 8.10^4 \quad 4.39$$

ifadesi kullanılmıştır.

4.4 Bilgisayar Programı

Fortran programa dilinde hazırlanan bilgisayar programı 1800 satırdan oluşmaktadır. Programa ek olarak elde edilen veri dosyalarını işleyen ve grafik gösterim, sıcaklık hesapları, konsantrasyon hesapları, türbülans özellikleri hesaplayan ilave bilgisayar programları da hazırlanmıştır.



Şekil 4.10 Bilgisayar destekli matematik model çalışma şeması

Örnek bir veri giriş dosyası aşağıda verilmiştir.

Initial Data File for the source code (do not remove this line!!)

```

-----
Enter output directory
d:\tezdata\
Enter # of control points for regions I, II and III
19 19 41
Enter coordinate data (x1(=xa=xb), x2(=xc=xd),y1(=ya),y2(=yb=yc),y3(=yd)
-0.25 -4.0 0 6 25
ENTER # of CONTROL POINTS ON SQUARE
0
CORNER POINT OF SQUARE, ANGLE, LENGTHS L1 & L2
-0.1 10.0 0.0 0.2 1.6
-----Control parameters - Vortex shedding-----
0.05 3 : time increments for shedding and partial particle time step
1000 : # of time steps to be covered
5 : nstep; shedding vortices will be stored in every <nstep> incr.
10 : nstep_scrn; step # for screen shoots
0.015 0.015 : x and y shift amount of shed points
0.01 : Vortex Core Radius (for use in Rankine Vortex Model)
1 : time increment # at which bound vortices will be updated
1 : 0; Euler 1; Adams-Bashforth
1 35 : clipping param.&height 4 those exceeding the up.bound (1:y;0:n)
-----FREE STREAM AND INPUT SOURCE DATA-----
0.0 0.0 : Free Stream Velocity Components (u0,v0)
1E-5 1.1774 : kinematic viscosity and density of gas (AIR)
2 : source distribution type; 1 constant; 2 parabolic dist.
1.0 21 : total source strength and # of sources
3.0 : y shift of input source distribution
-----PARTICLE DATA-----
2 : particle emission (0:no,1:regular,2:random)
0.125 : x shift from the sides (POSITIVE!!!!) & random distribution
5.5 : y shift (from bottom) for the particles & random distribution
0.05 4.8 : x and y shift for constructing region of random particles
0.5 : y shift (from top) for the particles of random distribution
10 10 : # of particles : regular # and initial random dist. #
2707 : particle density (kg/m^3)
50E-6 : particle diameter (m)
1 35 : clipping param.&height 4 those exceeding the up.bound (1:y;0:n)
1.0 1.0 : clip/reflection parameters for x and y directions
-----Two-Way Coupling-----
2 : Type 1 for one-way; 2 for two-way coupling
35 : height of the computational domain
25 25 : # of grid points in x and y directions
1.72 1E-7 5000 : w_opt,convergency error and iteration limit (SOR)
-----End Of Data-----
(xa,ya)=(x1,y1) (xb,yb)=(x1,y2) (xc,yc)=(x2,y2) (xd,yd)=(x2,y3)

```


-0.25 4 0.25 8 : area boundaries random particles

Optimum SOR parameters for different grid numbers :

15x15	1.62
21x21	1.67
25x25	1.72
31x31	1.78
35x35	1.81
39x39	1.81
41x41	1.82
45x45	1.835
51x51	1.84
55x55	1.855



BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, önceki bölümlerde yapısı açıklanan bilgisayar destekli matematiksel modelden değişik senaryolar için elde edilen sonuçlar detaylı olarak tartışılmıştır. İlk kısımda tek fazlı serbest ve sınırlı jet simülasyon sonuçları verilecektir. İlerleyen kısımlarda ise, sırasıyla iki fazlı serbest ve sınırlı jet için sonuçlar, aktif ve pasif yaklaşım sonuçlarının karşılaştırılması, katı fazı oluşturan partiküllerin büyüklüklerinin ve miktarlarının akışa olan etkileri, sınırlı iki fazlı jet senaryolarında ortam ve partikül sıcaklık değişimleri ve cisim iki fazlı jet etkileşimi incelenmiştir.

5.1 Tek Fazlı Jet Akışı

Şekil 5.1’de, bu çalışmadaki yaklaşım ile elde edilen jet akışının başlangıç safhası, deneysel ve diğer bir girdap yöntemi olan Girdap Blob ile hazırlanmış jet profilleri ile karşılaştırılmıştır [50]. Üç yönteme ait resimler aynı boyutsuz zaman adımına karşılık gelmektedir. Karşılaştırmalı şekilden görüldüğü üzere, çalışmada kullanılan Girdap Yöntemi ile elde edilmiş sonuçlar, her iki yöntem sonuçları ile büyük bir uyum içersindedir.

Küçük ölçekli girdapsı yapılar jetin çıkış bölgesinde etkin iken, alt akış bölgesindeki konumlarda jette asimetri gözlenmeye başlamaktadır. Asimetrik büyük girdapların yapıları ve jetin akış alanında sağ tarafa doğru eğilmesi, her üç yöntemle de benzer şekilde bulunmuştur.



Deneysel Sonuçlar



Girdap Blob Yöntemi Sonuçları



Ayrık Girdap Yöntemi Sonuçları

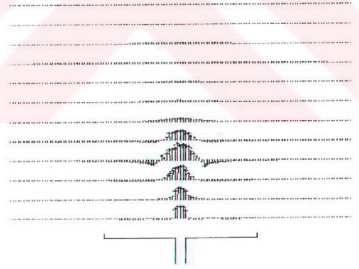
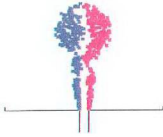
Şekil 5.1. İki boyutlu jet akışına ait deneysel ve hesaplamalı yöntemlerin karşılaştırılması

5.1.1 Serbest Jet

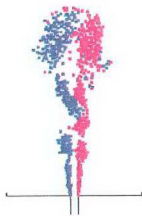
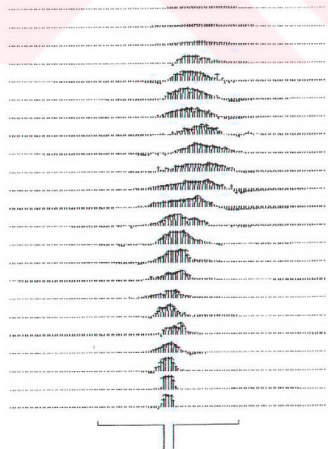
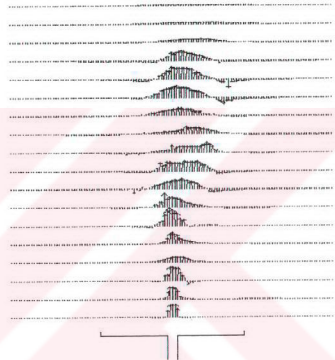
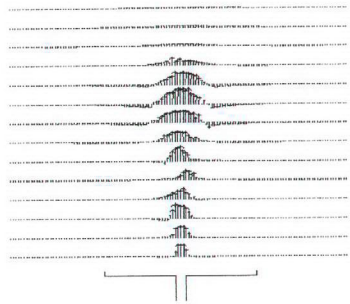
Bu kısımda, tek fazlı serbest jet akışı simülasyonlarının sonuçları verilmektedir. Jet akışı, ani genişleme köşelerindeki ayrılma noktalarından ortama bırakılan serbest girdap tekillik dağılımları ve hız vektörleri çizilerek gösterilmiştir.

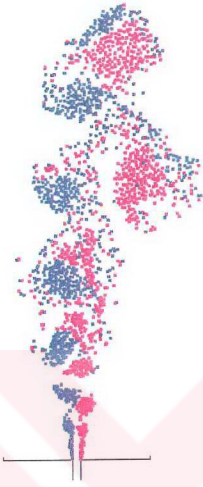
Şekil 5.2'de görülen resim dizisinde, tek fazlı jetin zamana bağlı gelişimi anlık girdap dağılımları ve hız vektörleri kullanılarak gösterilmiştir. Kaynak şiddetleri, kanal çıkış ağzında $Re = uD/v = 6.78 \times 10^4$ olacak bir hız sağlamaktadır. Akış bu Reynolds sayısı sayesinde türbülanslı bir karakter kazanacaktır. a-e arasındaki resim çiftleri, 200 hesap adımı sonrasında tespit edilmiş anlık akış alanı ve hız vektörleri olup her hesap adımı 0.05 sn dir. Toplam inceleme süresi $T = 50$ olarak seçilmiştir.

Aniden başlayan jet akışı, saat yönünün tersi yönde (sol girdap) ve saat yönünde (sağ girdap) başlangıç girdap dipolünü akış alanı içine enjekte etmektedir. Akışın gelişimi ile $T = 10$ anında tipik sol ve sağ girdapların periyodik olarak oluştuğu görülmektedir. $T = 50$ anında jet, çıkış ağzı bölgesinde oluşan düzenli sağ ve sol girdaplı bölgeler düzlemsel, yüksek Reynolds sayılı jet akışlarının tipik karakteristiği olan girdap caddelerini göstermektedir. Kaykayoglu [51, 52] düzlemsel jet oluşumunu deneysel olarak incelemiştir. Benzer sağ ve sol girdap oluşumları bu çalışmada da gözlenmiştir. Her zaman adımında çizilen hız vektörlerinin dağılımı ekselel hızların dağılımı ile jetin salınımı açık bir şekilde göstermektedir.

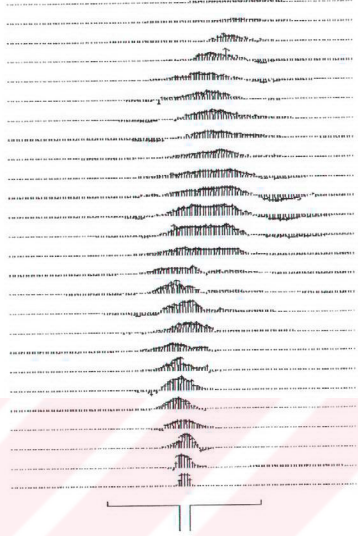


a) $T=10$

b) $T=20$ c) $T=30$ d) $T=40$ 



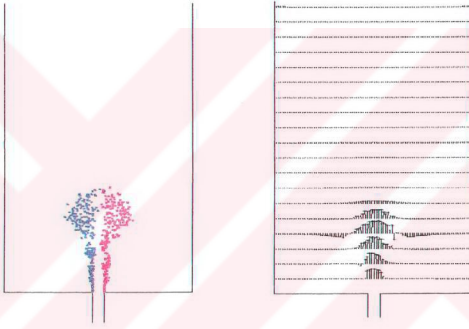
e) $T=50$



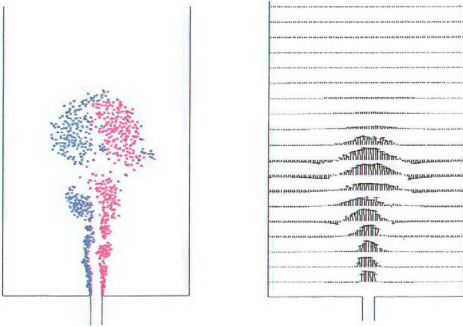
Şekil 5.2 Tek fazlı jetin zamana bağlı gelişimi $Re=5.78 \times 10^4$

5.1.2 Sınırlı Jet Sonuçları

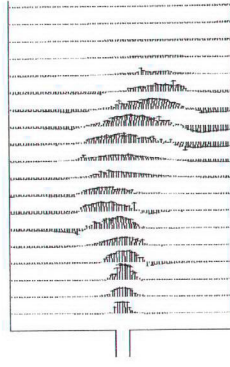
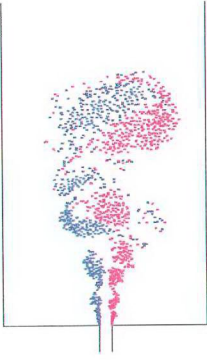
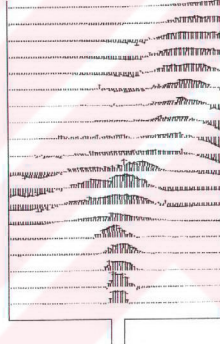
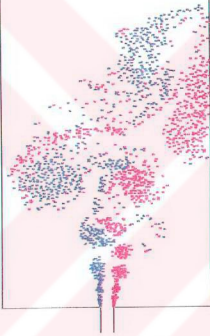
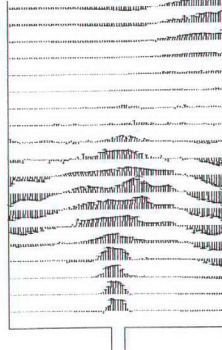
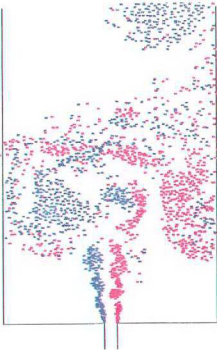
Bu kısımda tek fazlı, sınırlı jet jet akışı sonuçları akış alanı resimleri ve hız vektörleri ile gösterilmiştir. Sınırlı jet akışının evreleri incelendiğinde, başlangıç adımlarının serbest jetin aynı zamandaki yapısı ile büyük ölçüde benzeştiği görülmektedir. $T=50$ zamanına kadar sınırlı jet davranışının, serbest jet davranışı ile aynı karakterde olduğu söylenebilir. Ancak sınırlı jetin zamanın ilerletilmesi ile sağ duvara yaklaşması sonucu akışın karakteri değişmektedir. Duvarla etkileşime giren jet yukarı akış alanına doğru dönmeye başlamaktadır. Zaman $T=50$ 'ye ulaştığında, belirtilen dönmüş akış jetin çıkış ağzına doğru yaklaşmakta ve kanal ortamını doldurmaktadır.



a) $T=10$



b) $T=20$

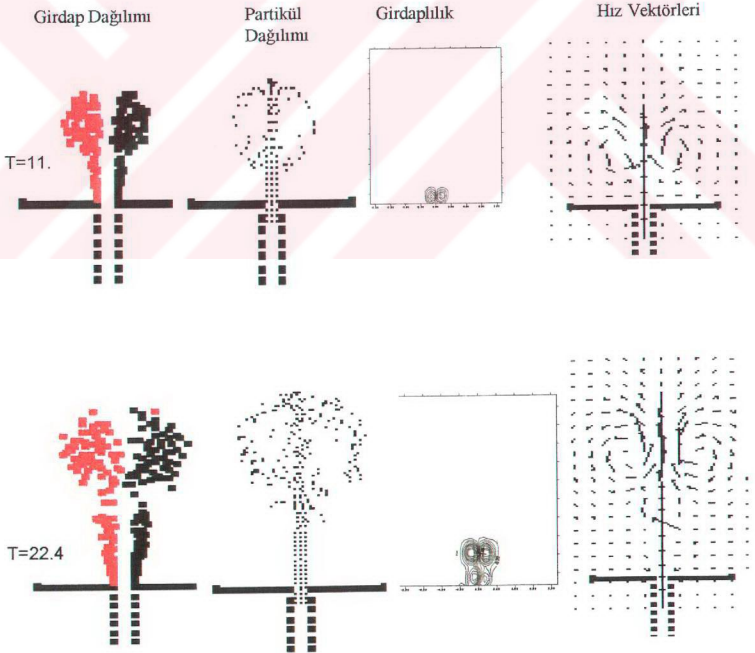
c) $T=30$ d) $T=40$ e) $T=50$

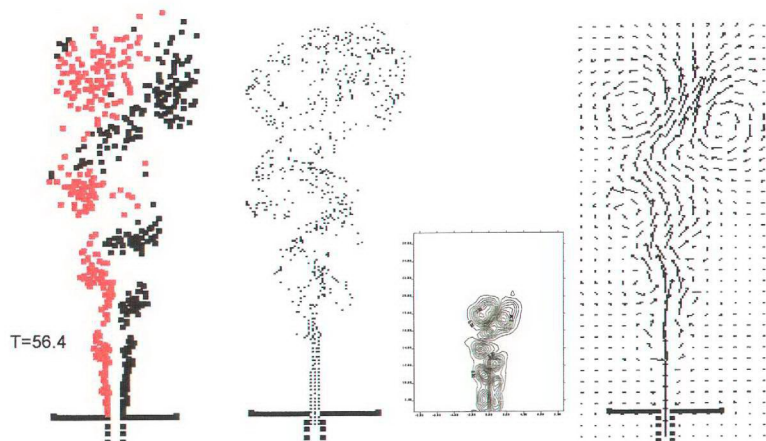
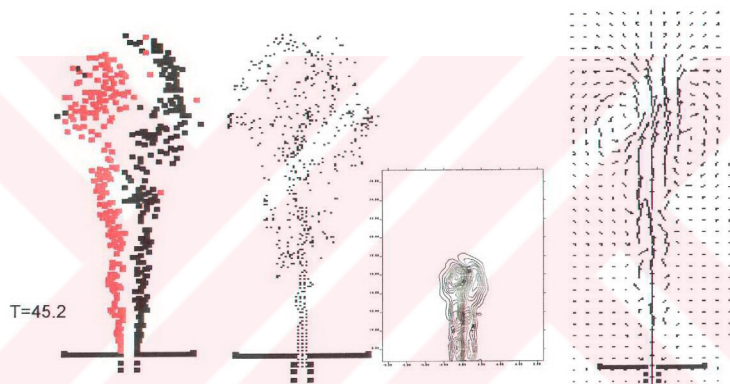
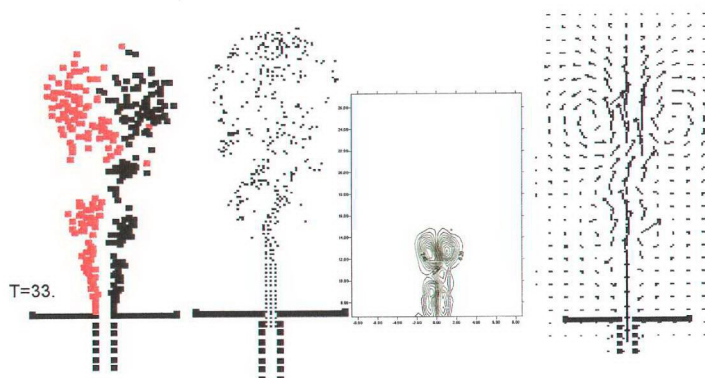
Şekil 5.3 Tek fazlı sınırlı jet akışının zamana bağlı girdap dağılımları ve hız vektörleri

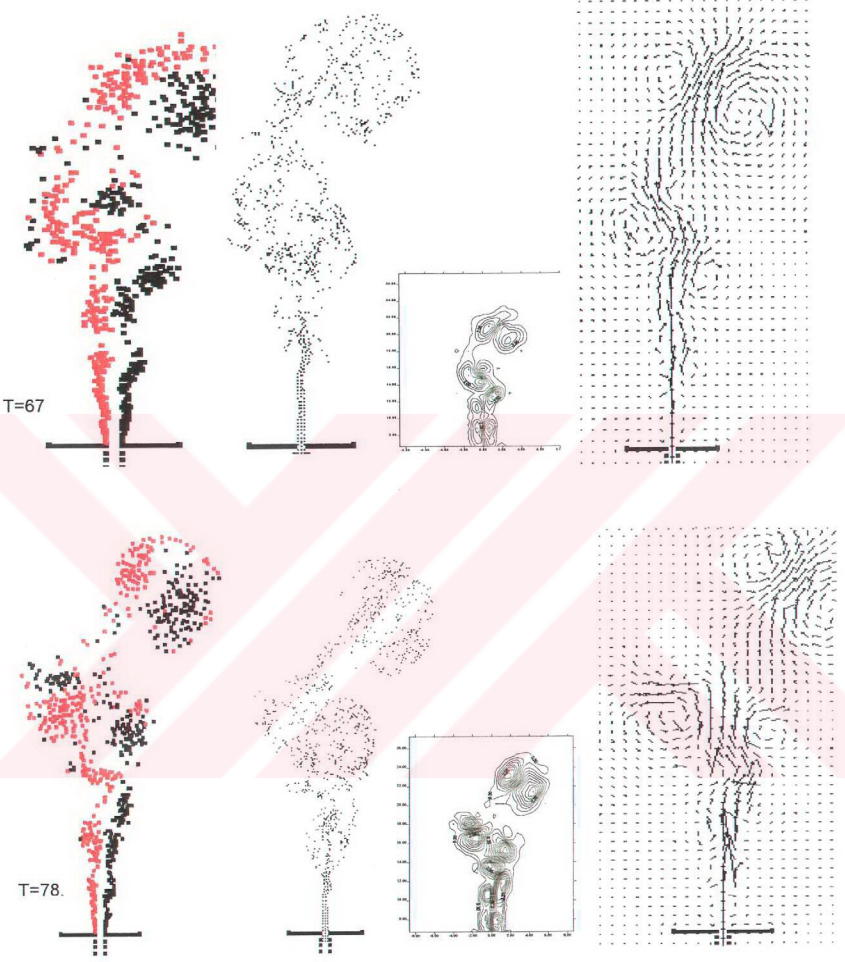
5.2 İki Fazlı Jet Akışı

5.2.1 Serbest Jet

Şekil 5.4’de Pasif Etkileşim Modelinin uygulandığı iki fazlı bir jetin zamana bağlı gelişimi ve partikül dağılımları ilk iki sütunda, belirli zaman adımları için gösterilmiştir. Diğer iki sütunda ise girdaplılık konturları ve hız vektörleri çizilmiştir. Jetin başlangıç zamanlarında, simetrik gelişen girdaplar, dipol tarzı bir hareket sergilemektedirler. Akış geliştikçe, kanaldan çıkan partiküller, oluşan dipolün kenarlarında yoğunlaşmaktadırlar. Akışın daha ileri zaman adımlarında ise partiküllerin büyük girdap toplulukları etrafında toplanmaları ile katı faz alanında içine partiküllerin giremediği paket yapılar gözlenmektedir. Bu hesaplamada 400μ çaplı partiküller kanal içerisine model A’ya uygun olarak yerleştirilmiştir.



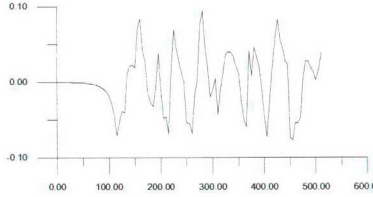




Şekil 5.4 Pasif Etkileşim Yaklaşımıyla hesaplanmış serbest jet

Girdapsı yapıların etkileri, zaman ölçeği ile ilişkilendirilmiştir. Bu oran, partiküllerin aerodinamik yanıt zamanının ($\tau_A = \rho_p d_p^2 / 18\mu$) karakteristik zaman ölçeğine oranıdır. Karakteristik zaman ölçeği, girdap oluşma periyodu olarak seçilmiştir. Bu periyodun

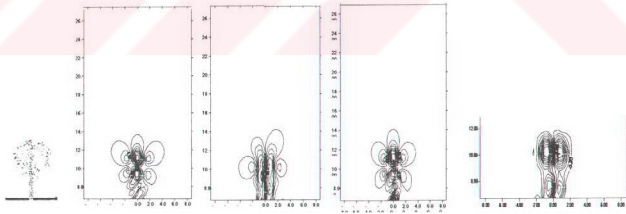
bulunması için kanal çıkışına yakın bir nokta seçilerek Şekil 5.5'te görülen bu noktadaki hız çalkantıları çizilmiş ve böylece girdap oluşumunun doğal frekansına ulaşılmıştır.



Şekil 5.5 Referans nokta hız grafiği

Partikül zaman ölçeği oranı Stokes Sayısı ile ifade edilebilir. Şekil 5.4'teki sonuçlar $St=1$ için çizilmiştir. Girdap yapıları ve partikül dağılımları incelendiğinde, büyük girdapsı yapıların yüksek hızlı sınırlarında partikül konsantrasyonunun yüksek olduğu görülmektedir. Girdaplar zaman içerisinde ilerledikçe, partiküller de karışmadan dalga tipi bir hareketle ilerlemektedir. Girdaplar arası etkileşim devam ettikçe partiküller bu girdap yapıları içine girerek karışmaya başlamaktadır.

Akış gerinme alanı ve partikül dağılımları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



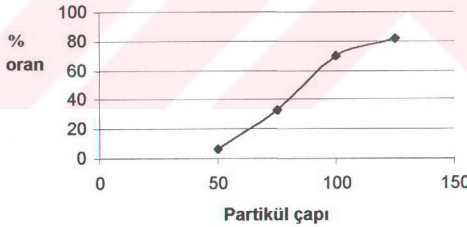
Şekil 5.6 Partikül dağılımı, gerinme alanı bileşenleri e_{11} e_{12} e_{22} ve girdaplılık konturları

5.2.2 Serbest Jet Akışı ve Partikül Büyüklüğünün Etkisi

Bu kısımda, 5.1 başlığı altında incelenen tek fazlı jet akışları, katı fazı eklenerek ele alınacaktır. Parçacık-akışkan etkileşimi önce Pasif Etkileşim Yaklaşımı ile çözülmektedir. Daha önce açıklandığı gibi, Pasif Etkileşim Yaklaşımı ile yapılan

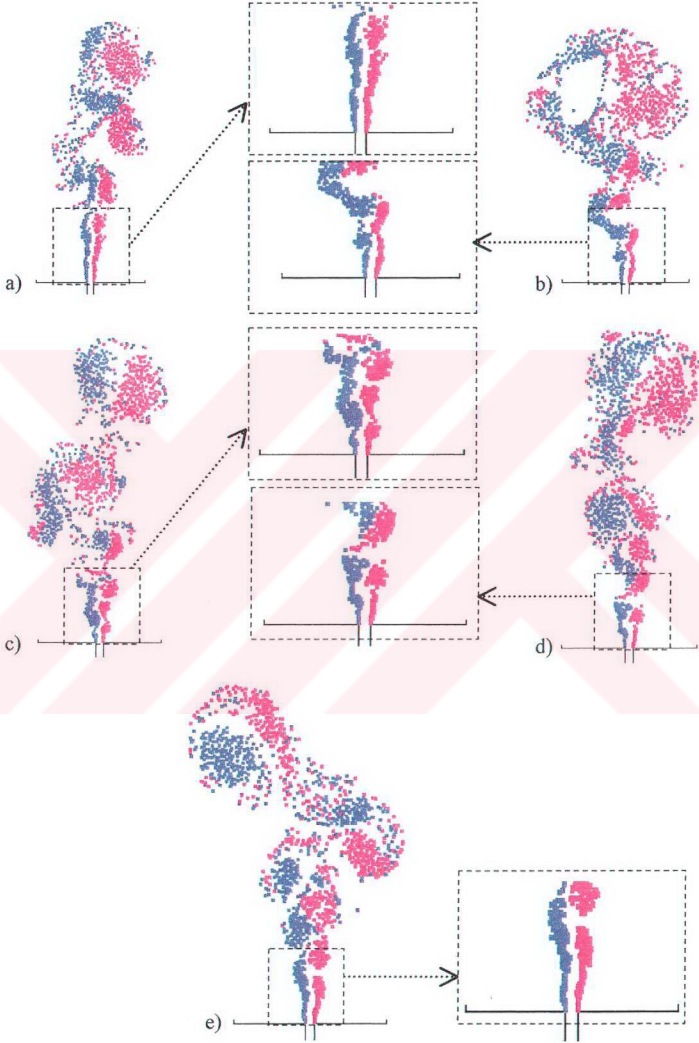
çözümlemelerde, katı fazın taşıyıcı fazın hareketinde yaptığı değişiklikler ihmal edilmektedir. Pasif Yaklaşım çözümlemelerinde, değişik büyüklükteki partiküllerin jet içindeki hareketleri ve yayılımları incelenmektedir.

Şekil 5.7’de, $T = 50$ sonundaki iki fazlı, pasif etkileşimli jetin girdap dağılımı görülmektedir. b), c), d), ve e) ‘de ise sırasıyla 50μ , 75μ , 100μ ve 125μ ‘luk dört değişik çap için bulunan partikül fazı resimleri ve düşey konsantrasyon dağılımları görülmektedir. Beklendiği gibi pasif etkileşimli bu jette, partikül çapı büyüdükçe, akışkan faz tarafından alt akış bölgelerine taşınmaları zorlaşmaktadır. Dikkat çeken bir başka nokta ise, partikül çapı büyüdükçe, partikül bulutunun şeklinin girdap dağılımlarından farklılaşması, yani partiküllerin ana akış yapıları dışında yörüngelerde hareket etmiş olmalarıdır. Parçacık dağılımları, 50μ ’luk partiküllerin akış alanına ait girdap yapılarını takip ederek hareket ettiğini, diğer taraftan parçacık çapının iki katı olduğu durumda, partiküllerin girdapları takip edemeden jet ana akışı tarafında toparlandığını göstermektedir. Şekil 5.7 a’da kanal çıkış ağzında toplam parçacıkların %65’i bulunmaktadır. Bu oran parçacık çapının büyümesi ile sırasıyla %33, %69 ve %82 olmaktadır. Şekil 5.8’de bu dağılım basit bir grafikte sunulmuştur.



Şekil 5.8 Partikül çapı ve kanal düzlemindeki yüzdesi

gelmektedir. Ayrıca akış alanına ait ani girdaplılık dağılımları değişmektedir. Şekil 5.9 a'da $T = 50$ anındaki jet akışına ait temel karakterler görülmektedir.



Şekil 5.9 a) Pasif Etkileşim, b) Aktif Etkileşim 50 mikron, c) Aktif Etkileşim 75 mikron, d) Aktif Etkileşim 100 mikron, e) Aktif Etkileşim 125 mikron, girdap dağılımları.

Şekil 5.9 dan açıkça görüldüğü gibi, katı fazın aktif etkileşim ile modellendiği sonuçlar ile a) daki pasif etkileşim sonucu arasında büyük farklılıklar bulunmaktadır.

Şekil 5.9 T=50 anındaki girdap alanlarını göstermektedir. Şekil 5.9a parçacıkların pasif olarak akış alanı ile taşındığı durum için girdap parçacıklarının dağılımını göstermektedir. Görüldüğü gibi parçacıkların akış alanını etkilediği duvarlarda b-e akış yapısında belirgin farklılıklar görülmektedir. En belirgin fark aşağı akım bölgesinde oluşan girdap alanlarıdır. Diğer taraftan sol ve sağ jet girdaplarının oluşumunu incelersek, bu oluşumun parçacık büyüklüğü ile direkt ilgili olduğunu görüyoruz. Şekil 5.9b'de akış alanı içinde 50μ parçacıklar olduğu durumu incelenmektedir. Şekil 5.9c ile karşılaştırıldığında en belirgin özelliği girdap oluşum mekanizmasındaki değişiktir. Parçacıklar daha belirgin girdap kümelerinin oluşumuna neden olmaktadır. Şekil 5.9 c, d, e 'de de girdap oluşum mekanizmalarının Şekil 5.9a 'dan farklı olduğu görülmektedir. Girdap oluşum zamanındaki gecikmenin yanı sıra sağ ve sol girdapların oluşturduğu girdap caddesinin dalga boyundaki farklılık açık olarak görülmektedir. Girdap oluşum frekanslarındaki değişik mekanizmayı anlamak için parçacık dağılımlarını inceleyelim. Şekil 5.10'da sol kolonda pasif etkilerin sonuçları yer alırken, sağ kolonda aktif etkileşime ait sonuçlara yer verilmiştir. İki durum karşılaştırıldığında görülen en önemli etki parçacık çapı değişimidir. Parçacıkların akım alanı içine yayılımı aktif etkiler modelinde yavaşlamıştır. Buna benzer etki $dp = 50\mu$ için de geçerlidir. Parçacıkların yayılımındaki bu gecikme, akış alanını etkilenmesi sonucu kinetik enerjisini kaybederek parçacıkları taşıyamamasıdır.

Pasif Etkileşim

Aktif Etkileşim



a) 50 μ



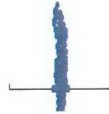
b) 75 μ



c) 100 μ



d) 125 μ

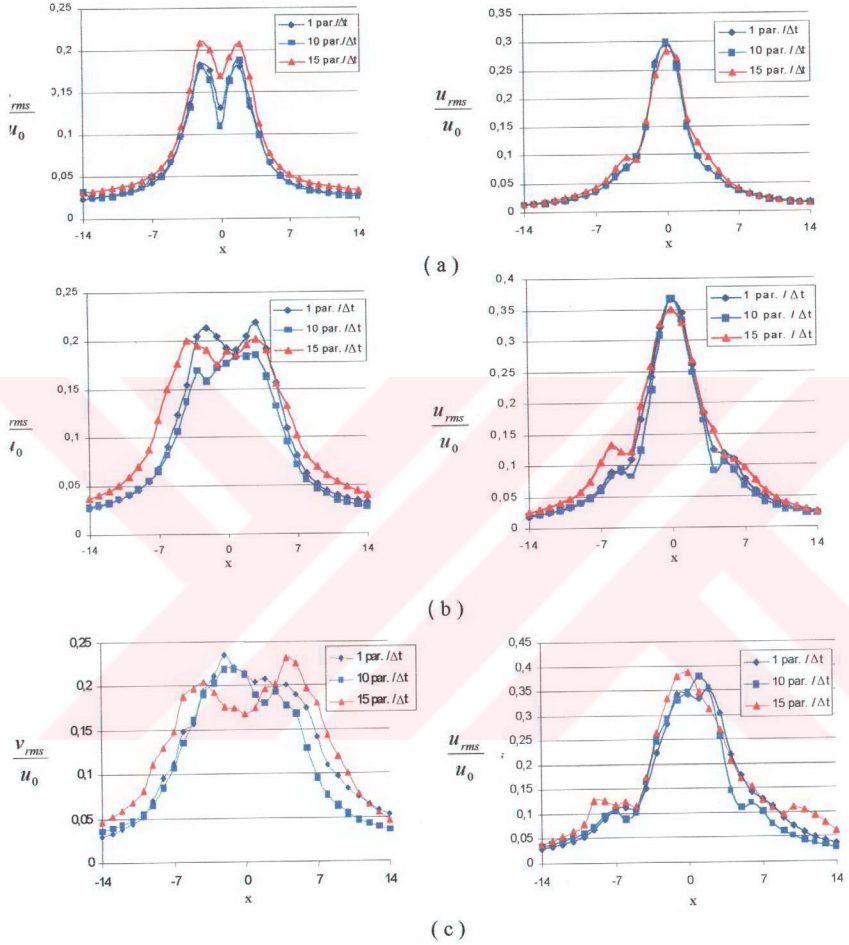


Şekil. 5.10 a) 50 mikron, b) 75 mikron, c) 100 mikron, d) 125 mikronluk partiküller için sol kolonda pasif etkileşim, sağ kolonda ise aktif etkileşim partikül dağılımları

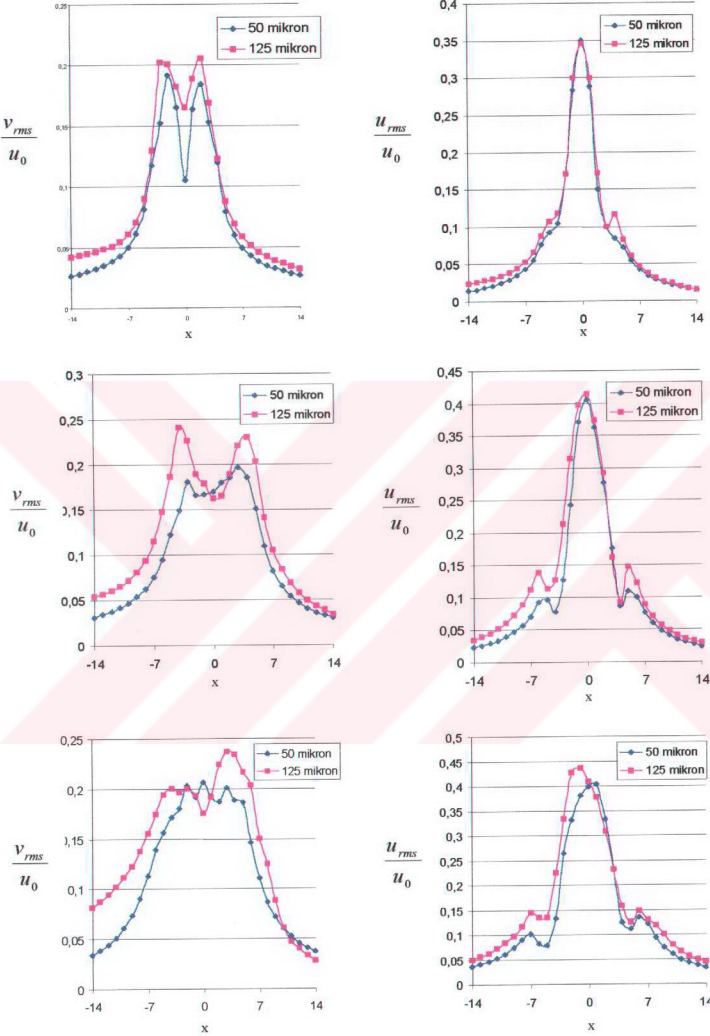
5.2.3 Parçacık Büyüklüğü ve Akış Alanı İçindeki Katı Faz Yoğunluğunun Akışın Çalkantı Alanına Etkisi

Şekil 5.11’de $Re = 4.78 \times 10^3$ Reynolds sayısına sahip jet için, aktif etkileşim yöntemi kullanılarak elde edilen akış alanına ait eksenel ve yatay, karekök ortalama hız çalkantı alanları üç değişik eksenel istasyonda verilmiştir. Grafiklerde iki değişik çaptaki parçacıkların etkisi incelenmiştir. Şekilde sol kolondaki grafikler eksenel hız çalkantılarını verirken, sağ kolonda ise yatay hız çalkantıları verilmiştir. Hız çalkantı alanlarının maksimumları jetin aşağı akım bölgesinde daha yüksek değerlere erişmektedir. $x/d = 5$ eksenel istasyonunda yapılan karşılaştırmalı çalkantı değerlerinin jet ekseninin iki kenarında maksimum olduğunu göstermektedir. Parçacık çapının artırılmasının eksenel hız çalkantı değerlerini artırdığını görmekteyiz. Diğer tarafta yatay hız çalkantı değerleri hemen hemen sabit kalmaktadır. Parçacık çapının artışı eksenel çalkantıları artırarak akış alanı içinde eksenel karışımı artırmaktadır. Şekil 5.9 ‘da (b) ve (e) durumları incelenerek akış alanı içindeki değişimin nasıl etkilendiği daha belirgin olmaktadır.

Diğer taraftan Şekil 5.12 ‘de akış alanına bırakılan parçacık besleme hızlarındaki değişimin çalkantı alanına olan etkisi araştırılmıştır. Parçacık çapı $dp = 75\mu$ olarak seçilmiş ve her zaman adımında sırası ile ortama 1, 10 ve 15 parçacık eklenmiştir. Görüldüğü gibi çıkış ağzına yakın bölgede yüksek oranda parçacıklar eksenel çalkantılatıları yükseltirken, aşağı jet bölgelerinde maksimum değer aynı kalmakta ancak yatay istasyonlarda değerlerin %100 ’e varan miktarlarda arttığı görülmektedir.



Şekil 5.11 a) $x/d=5$ b) $x/d=10$ ve c) $x/d=15$ için 1,10 ve 15 adet 50μ çaplı partikül yüklenme durumlarında v' ve u' hız çalkantıları

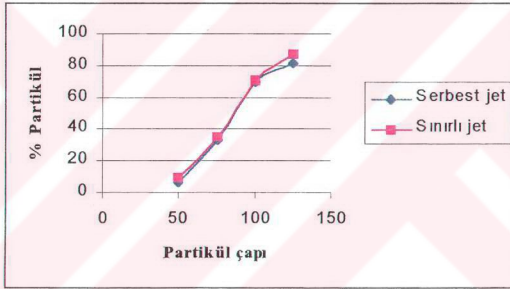


Şekil 5.12 50 ve 125 mikron çaplı partiküllerin yarattıkları u_{rms} ve v_{rms} hız çalkantıları

5.3 İki Fazlı Türbülanslı Jet Sonuçları

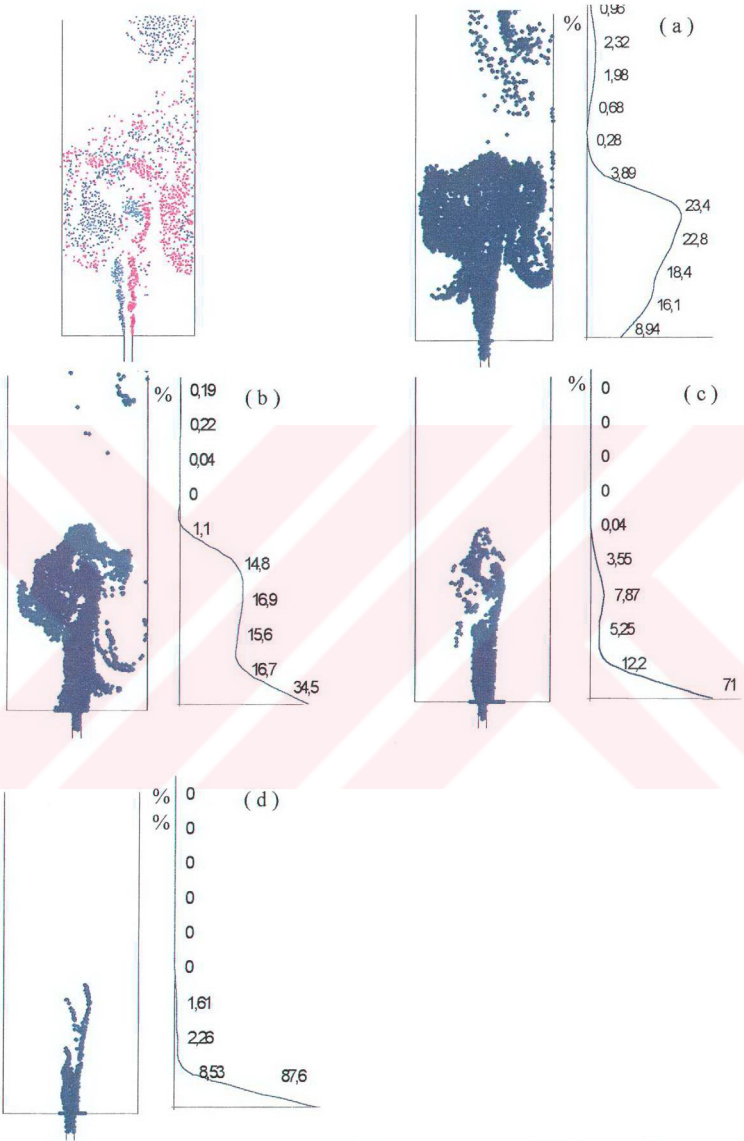
5.3.1 Sınırlı Jet

Bu kısımda, iki fazlı, sınırlı jet akışı için elde edilen sonuçlar verilmektedir. Kanal genişliği 16 D olarak seçilmiştir. Şekil 5.14'te $T = 50$ anında girdap dağılımı, 50μ , 75μ , 100μ ve 125μ için partikül dağılımı ve düşey partikül konsantrasyon yüzdeleri verilmiştir. Eksenel parçacık dağılımı ise % olarak gösterilmiştir. Şekil 5.3'te de gösterildiği gibi jet girdapları duvarla etkileşimde bulunarak jetin eksenel gelişimini engellemektedir. Bu durum parçacıklara da yansıtılmaktadır. Şekil 5.13 serbest ve sınırlı jet halindeki jet akış ağzındaki parçacık birikimi gözlenmektedir. Sınırlı jet halinde daha çok parçacık kanal ağzında toplanmaktadır.

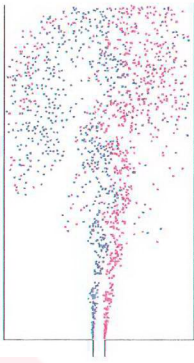


Şekil 5.13 Kanal çıkış bölgesi partikül yoğunlukları

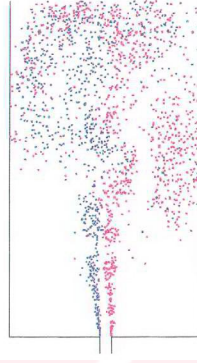
Şekil 5.15 'de parçacık büyüklüğüne bağlı olarak gelişmekte olan jet akışının anı durumu gösterilmiştir. Şekil 5.15 a pasif etkileşimi gösterirken, Şekil 5.15 b, c ve d aktif etkileşim sonucu oluşan jet akışı gösterir. Akış alanlarında görülen farklılık $dp=100\mu$ için belirgin haldedir. Jet akışı duvar yakınında yukarıdan aşağıya bir akış alanı oluşturmaktadır.



Şekil 5.14 Pasif Etkileşim yaklaşımı ile hesaplanmış, (a) 50 μ , (b) 75 μ , (c) 100 μ ve (d) 125 μ 'luk partikül dağılımları ve düşey konsantrasyon yüzdeleri



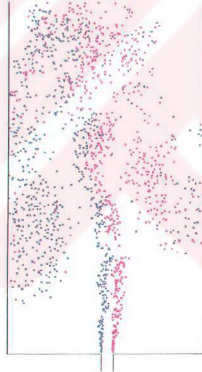
(a)



(b)



(c)



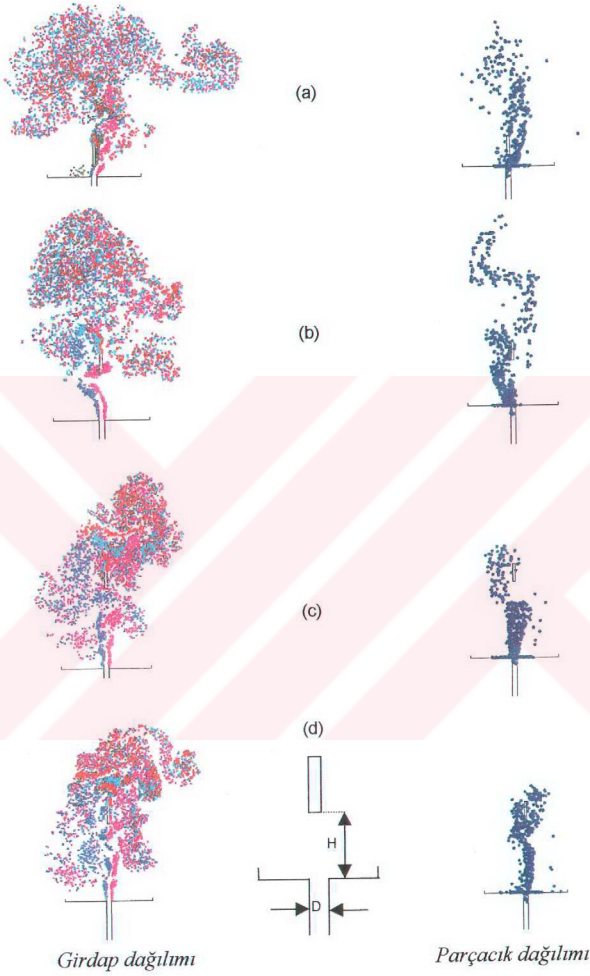
(d)

Şekil 5.15 (a) Pasif Etkileşim jet profili, $Re=6.78 \times 10^4$, $T=50$, (b) Aktif Etkileşim $d_p=50\mu$, (c) Aktif Etkileşim $d_p=75\mu$, (d) Aktif Etkileşim $d_p=100\mu$ jet profilleri

5.4 İki Fazlı Türbülanslı Jet-Cisim Etkileşimi Sonuçları

5.4.1 Serbest Jet – Cisim Etkileşimi

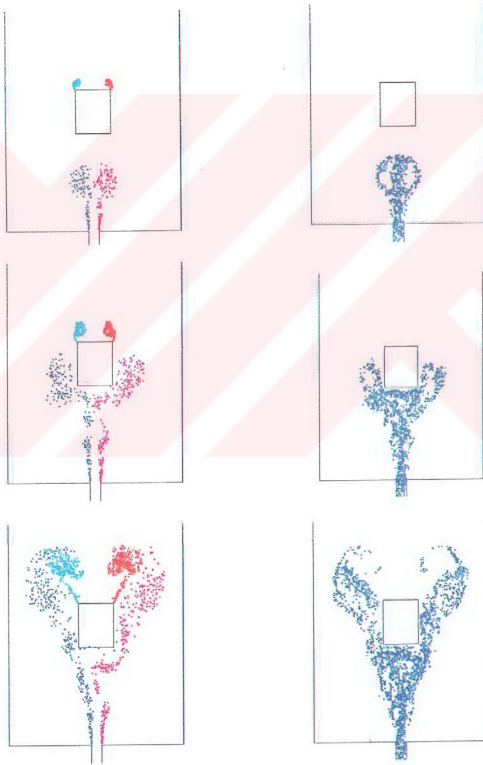
Bu kısımda, iki fazlı jet ile alt akış alanına yerleştirilen cisim etkileşimi incelenmiştir. Serbest jet akışı halinde, akış alanına konulan cismin konumu değiştirilerek girdap ve partikül alanlarının durumları incelenmiştir. Üç değişik konumda bulunan plaka jet akışının gelişimini değiştirmektedir. Şekil 5.16'da, $T = 50$ anında tespit edilen girdap alanları incelendiğinde, çıkış ağzına yakın plakanın ($H/D = 2$) jetin genel gelişimini bozduğu, buna karşılık $H/D = 14$ 'de etkileşim öncesi klasik jet girdaplarının oluştuğu görülmektedir. (a), (b), (c) durumları pasif etkileşim hali için oluşturulurken, (d) hali (c) konumundaki plaka- jet etkileşimini aktif etkileşim ile incelemiştir. Parçacık dağılımları, aktif etkileşim modeli kullanıldığında parçacıkların plakaya kadar ulaştıklarını buna karşın pasif etkileşim yönteminde plaka etrafında parçacık yoğunluğunun daha az olduğu görülmektedir.

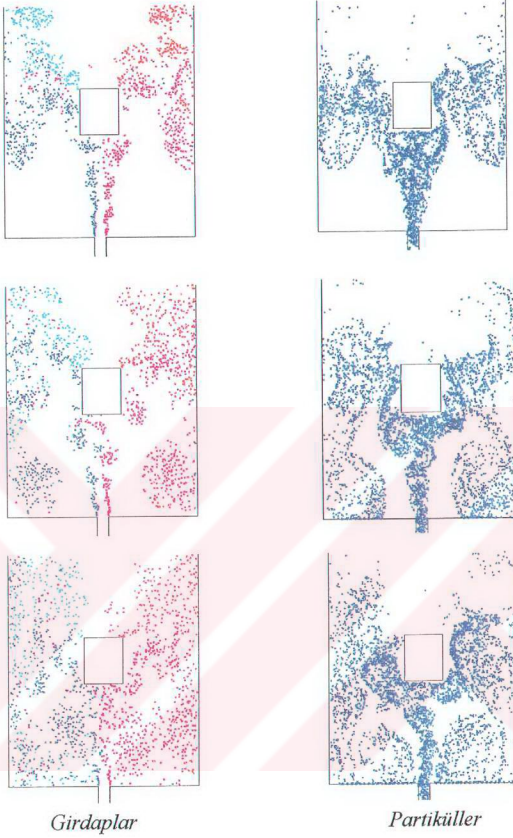


Şekil 5.16 Cisim konumuna bağlı iki fazlı serbest jet-cisim etkileşimi, $Re=7.2 \times 10^4$, $T=50$, a) $H/D=2$, $d_p=75\mu$, pasif etkileşim b) $H/D=6$, $d_p=75\mu$, pasif etkileşim c) $H/D=14$, $d_p=75\mu$, pasif etkileşim d) $H/D=14$, $d_p=75\mu$, aktif etkileşim

5.4.2 Sınırlı Jet – Cisim Etkileşimi

Şekil 5.17’de, 50 μ ’luk partiküller ile Aktif Etkileşim Yaklaşımı ile hesaplanmış bir sonuç görülmektedir. Jet gelişimi ile oluşan girdaplar, ortadaki cisim ile etkileşime geçtikten sonra, cisimden ayrılan girdaplar ile birleşerek duvarlara yönelmiş ve duvarlar ile etkileşimin ardından üst akış bölgesine yönelmiştir. İlerleyen zaman adımlarındaki resimlerde akış alanının hemen hemen tamamen girdaplar ile dolduğu gözlenmektedir. Partiküller de üst akış bölgesine yönelerek cismin yan ve alt taraflarında yoğunlaşarak ortamı doldurmuşlardır.

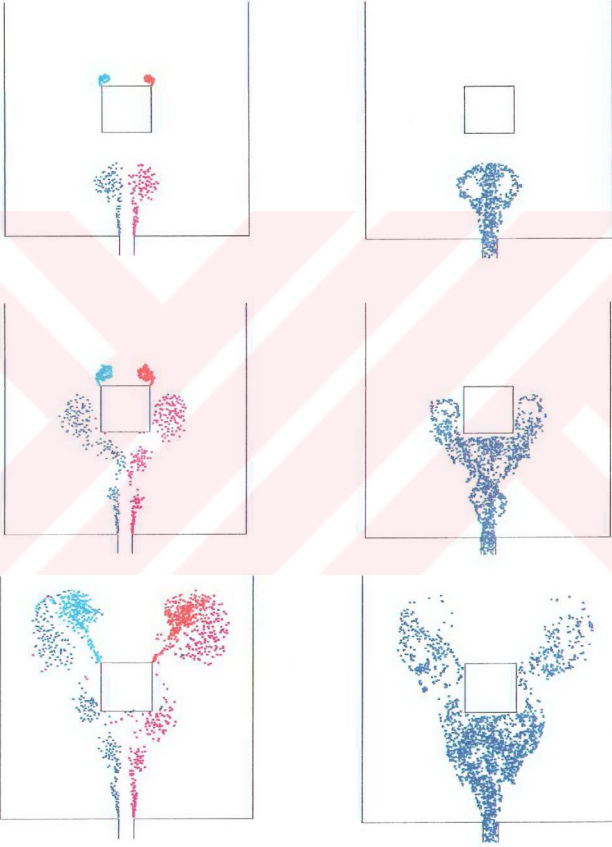




Şekil 5.17 50 mikronluk katı fazlı jet-cisim etkileşimi, Aktif Etkileşim

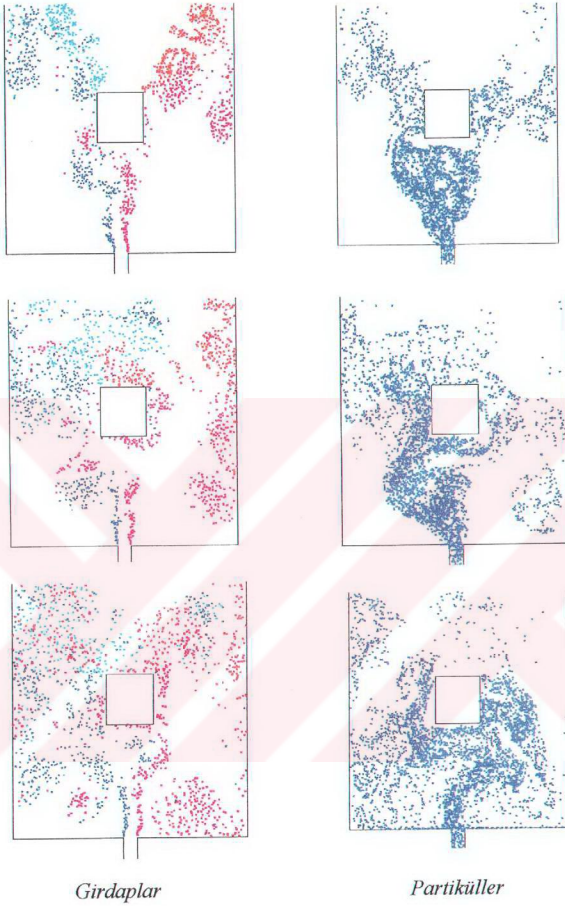
Şekil 5.18’de ise bir önceki sonuç ile aynı özellikteki partiküller kullanılarak, ancak Pasif Etkileşim Yaklaşımı ile bir sonuç hesaplanmıştır. Jet cisim ile karşılaştıktan sonra yine cisimden kopan girdaplar ile jete ait girdaplar birleşmekte ancak duvarla etkileşimden sonra asimetrik bir şekilde üst akış bölgesine dönmektedir. Son resimde görüldüğü üzere ileri zaman adımlarında Aktif Etkileşim sonuçlarında hesap alanı hemen hemen homojen bir şekilde girdaplar ile dolmuş iken bu sonuçta aynı şekilde bir dağılım elde edilememiştir. Partikül dağılımları da bir önceki sonuçlara göre farklılık

göstermektedir cisimin üst kenar hizasının altında boşluk miktarı artmıştır. Partikül dağılımının Two-Way Coupling sonuçlarda daha iyi olduğu sonucu akışkan yatak teknolojisinin temelini oluşturan, partiküllerin akışı etkilemesinin ve cisim etrafında olabildiğince eşit akışkan-cisim teması sağlanması amacıyla da doğrulanmıştır.



Girdaplar

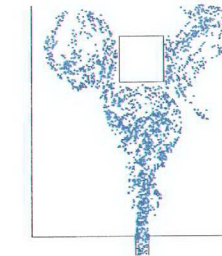
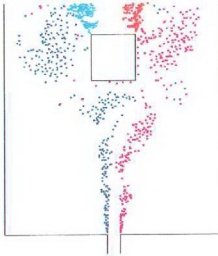
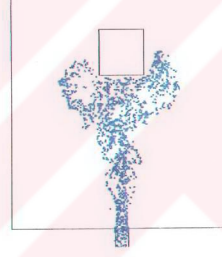
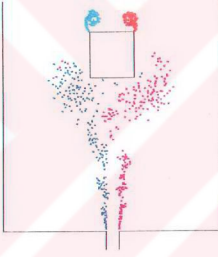
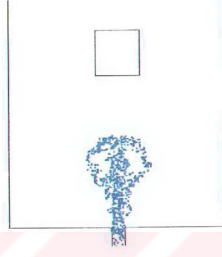
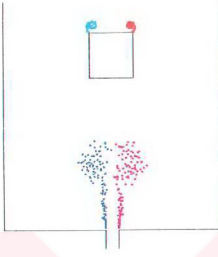
Partiküller



Şekil 5.18 50 mikronluk katı fazlı jet-cisim etkileşimi, pasif Etkileşim

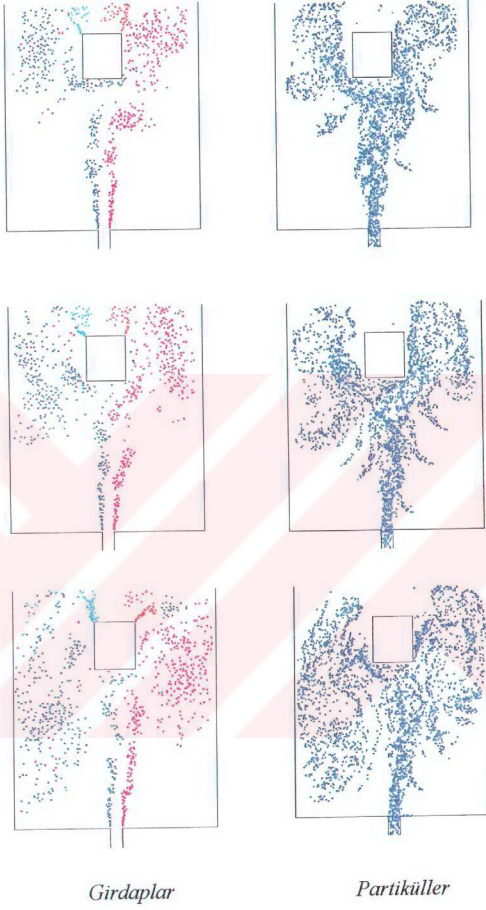
Şekil 5.19’da Aktif Etkileşim yaklaşımı ile diğer örneklerdekine benzer partiküller kullanılarak ancak cismin konumu daha yukarıya taşınarak hesaplanmış sonuçlar görülmektedir. Girdap ve partikül dağılımlarından görüldüğü üzere cisim ile jetin karşılaşmasının gecikmesi, yukarıdaki örneklerdeki zaman adımlarına göre hesap

alanının girdaplarla ve partiküllerle dolmasını geciktirmiş ancak yine cisim üst kenarının hizasının altında partikül yoğunlaşması başlamıştır. Bu da göstermektedir ki cismin akış alanı içindeki konumu partikül dağılımını ve akışkan yatak için akışkanlaşma süresini önemli ölçüde etkilemektedir.



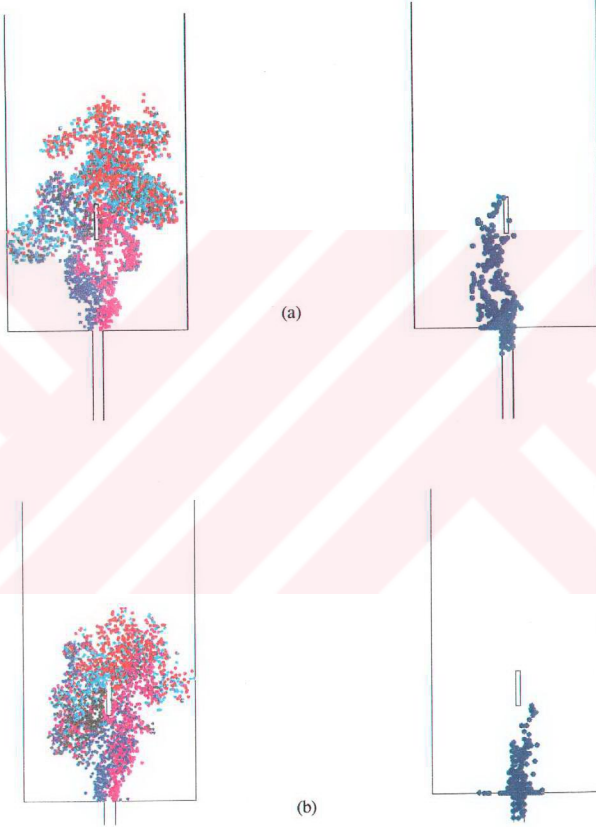
Girdaplar

Partiküller



Şekil 5.19 Değişik cisim yüksekliği için 50 mikronluk katı fazlı jet-cisim etkileşimi, aktif etkileşim

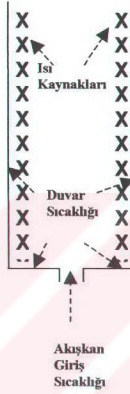
Sınırlı jet ile etkileşimde bulunan $H/D=8$ konumunda plaka etrafındaki girdap ve parçacık dağılımları Şekil 5.20’de verilmiştir. Aktif etkileşim senaryosunda parçacıkların cisme ulaşamadıkları görülmektedir.



Şekil 5.20 : İki fazlı sınırlı jet – ince küt cisim etkileşimi, $Re = 3 \times 10^4$, $T=50$
a) $H/D=8$, $d_p=50\mu$, pasif etkileşim b) $H/D=8$, $d_p=50\mu$, aktif etkileşim

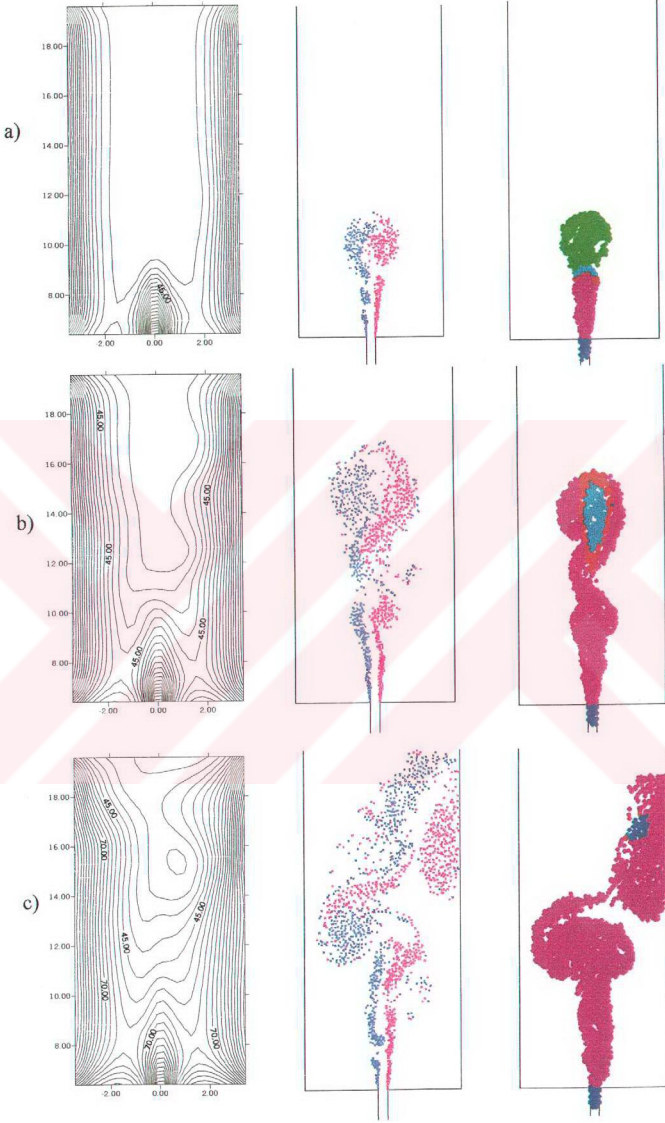
5.5 Sınırlı Jet ve Isıl Etkiler

Bu kısımda, sınırlı jet hali için gerçekleştirilen hesaplamalarda incelenen sıcaklık alanı ile ilgili sonuçlar bulunmaktadır. Şekil 5.21 'de sıcaklık alanının hesaplanması sırasında kullanılan parametreler şematik olarak gösterilmiştir.



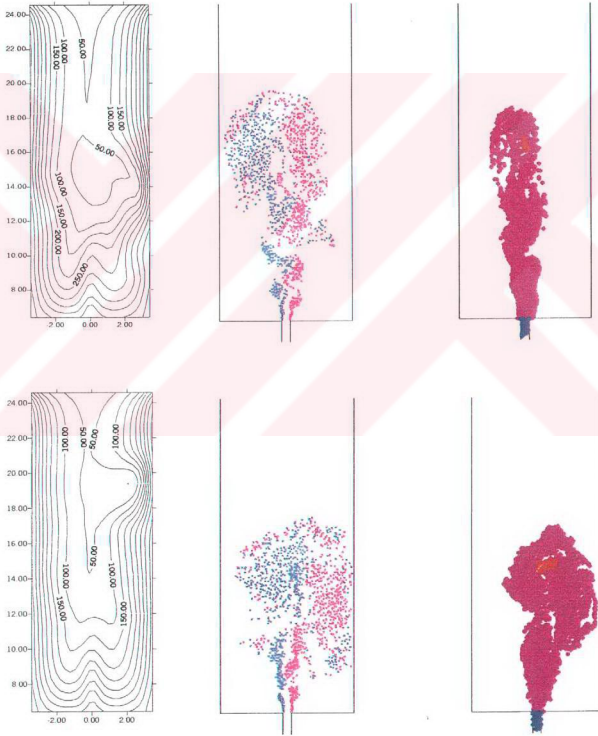
Şekil 5.21 Sıcaklık hesabı parametreleri

Şekil 5.22'de Akışkanın giriş sıcaklığının $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Duvar sıcaklıklarının $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $q=100.000\text{ W/m}$ olduğu durum için zamana bağlı sıcaklık alanı, eş sıcaklık eğrileri şeklinde gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, duvarlardaki kaynakların ve yüksek sınır şartının sonucu olarak jet akışının ilk aşamalarında, duvarlardan ortama doğru ve akışkanın giriş sıcaklığı nedeni ile akış boyunca sıcaklık değerleri artmakta eğiliminde görülmektedir. Zamanla ilerlendikçe, sıcaklık alanının hesap alanının içlerine doğru yüksek değerler almaya başladığı ve aynı zamanda sıcaklık konturlarının akış şekli ile bükülerek, akışın sıcaklık üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 5.22 Anlık sıcaklık, akış ve partikül sıcaklık alanları a) $T=12.5$ b) $T=25$ c) $T=37.5$

Şekil 5.23’de iki değişik partikül çapı (50μ ve 75μ) ve $T_{sınır}=500^{\circ}\text{C}$, $T_{giriş}=200^{\circ}\text{C}$ şartları için sıcaklık alanı, girdap alanı ve partikül sıcaklık alanı çizilmiştir. Eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, 75μ ’luk partiküllerin bulunduğu halde, eksenel sıcaklık dağılımında, alt akış alanına doğru ısınmanın daha hızlı gelişmiş olduğu gözlenmektedir. Bu sonuç, partikül çapının büyümesi ile türbülans özelliklerinin iyileştiği ve dolayısıyla ısı transferinin kolaylaşarak hızlandığı gerçeği ile uyum içinde görülmektedir.



Şekil 5.23 50 ve 75μ parçacıklı jetlerin $T_{sınır}=500^{\circ}\text{C}$, $T_{giriş}=200^{\circ}\text{C}$ şartlarında ortamın sıcaklık alanına etkileri

BÖLÜM VI

GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, iki fazlı, türbülanslı jet akışı Lagranjiyan bir yöntem olan Yüzey Tekillik Yöntemi ile birleştirilmiş Ayrık Girdap Yöntemi ile modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, katı ve akışkan fazları Lagranjiyan yaklaşımla modelleyen ilk çalışma olan ve bu tezde geliştirilen yöntem, iki fazlı jet akışlarının simülasyonu için uygundur ve gelecek çalışmalar için yeni yollar açmaktadır.

Hazırlanan modelle gelecek çalışmalarda incelenebilecek araştırma konuları, aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

1. Aktif Etkileşim Yaklaşımı ile yapılan çalışma sonuçları, katı fazın girdap kopma mekanizması üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Çeşitli akış senaryoları için bu mekanizmanın incelenmesi yeni bir araştırma konusu yaratmaktadır.
2. Akış alanı içine yerleştirilen cisim ile katı fazın etkileşimi, pek çok uygulamada karşılaşılan ve daha detaylı incelenmesi halinde yeni araştırma başlıkları yaratabilecek bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.
3. Katı-akışkan, iki fazlı akışların karşılaşıldığı uygulamalardan bir tanesi olan akışkan yatak ve akışkanlaşma problemleri, mevcut modelin inceleme kapsamı içine girmekte ve gelecek çalışmalar için büyük bir imkan yaratmaktadır.
4. Katı-akışkan, iki fazlı akışların karşılaşıldığı uygulamalardan bir başkası olan pnömomatik taşıma da yine mevcut model yardımı ile incelenebilecek bir konu başlığı olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. GRAHAM B. W., 1969, Introduction, One Dimensional Two-Phase Flow, McGraw- Hill.
2. LIM, K. S., ZHU, J. X. and GRACE, J. R., 1995, Hydrodynamics of Gas-Solid Fluidization, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, 141-193.
3. YARIN, L. P. And HETSRONI, G., 1993, Turbulence Intensity in Dilute Two-Phase Flows-I, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 20, 1-15.
4. YARIN, L. P. And HETSRONI, G., 1993, Turbulence Intensity in Dilute Two-Phase Flows-II, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 20, 16-26.
5. YARIN, L. P. And HETSRONI, G., 1993, Turbulence Intensity in Dilute Two-Phase Flows-III, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 20, 26-44.
6. CHANG, E. J., KAILASANATH, K. and AGGARWAL, S. K., 1998, Two-Way Coupled Gas-Particle Systems in an Axisymmetric Ramjet Combustor, AIAA Journal, Technical Notes, Vol. 37, 396-398.
7. LUN, C. K. K. and LIU, H. S., 1997, Numerical Simulation of Dilute Turbulent Gas-Solid Flows in Horizontal Channels, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 23, No. 3, 575-605.
8. SAKAKIBARA, J., WICKER, R. B. and EATON, J. K., 1996, Measurements of The Particle-Fluid Velocity Correlation And The Extra Dissipation in A Round Jet, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 22, No. 5, 863-881.
9. KAFTORI, D., HETSRONI, G. and BENERJEE, S., 1998, The Effect of Particles On Wall Turbulence, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 24, No. 3, 359-386.

10. KENNING, V. M. and CROWE, C. T., 1997, On The Effect of Particles on Carrier Phase Turbulence in Gas-Particle Flows, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 23, No. 2, 403-408.
11. CHANG, E. J. and KAILASANATH, K., 1996, Simulations of Particle Dynamics in A Confined Shear Flow, *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 6, 1160-1166.
12. LEWIS, R.I., 1991, *Vortex Element Methods for Fluid Dynamics, Analysis of Engineering Systems*, Cambridge University Press.
13. LEONARD, A., 1985, Computing Three Dimensional Incompressible Flows with Vortex Elements, *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, Vol. 17 , 523.
14. KAYKAYOĞLU, C.R., 1996, Computational Aspects of 3-D Vortex Methods, Invited Lecture, Workshop on Turbulence Modeling and Vortex Dynamics, 2-6 September 1996, Istanbul.
15. CLEMENTS, R.R., 1973, An Inviscid Model of Two-Dimensional Vortex Shedding, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 57, 321-336.
16. CHRISTIANSEN, J.P., 1973, Numerical Simulation of Hydrodynamics by the Method of Point Vortices, *Journal of Computational Physics*, Vol. 13, 253.
17. SHIMIZU, S., 1986, Discrete Vortex Simulation of Two-Dimensional Turbulent Jet, *Bulletin of JSME*, Vol. 29, 2440-2446.
18. SARPKEYA, T., 1994, Vortex Element Methods for Flow Simulation, *Adv. Appl. Mech.*, Vol. 31, 113-247.
19. SARPKEYA, T., 1989, Computational Methods with Vortices, 1988 Freeman Scholar Lecture, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, 5-52.

20. MEI, R. and HU, K., 1999, On The Collision of Small Particles in Turbulent Flows, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 391, 67-89.
21. LI, C., MOSYAK, A. and HETSRONI, G., 1999, Direct Numerical Simulation of Particle-Turbulence Interaction, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, 187-200.
22. SNIDER, D. M., O'ROURKE, P. J. and ANDREWS, M. J., 1998, Sediment Flow in Inclined Vessels Calculated Using A Multiphase Particle-In-Cell Model for Dense Particle Flows, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 24, 1359-1382.
23. ZHOU, Q. and LESCHZINER, M. A., 1999, An Improved Particle-Locating Algorithm for Eulerian-Lagrangian Computations of Two-Phase Flows in General Coordinates, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, 813-825.
24. NGUYEN, A. V. and FLETCHER, C. A. J., 1999, Particle Interaction with The Wall Surface in Two-Phase Gas-Solid Particle Flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, 139-154.
25. TASHIRO, H. and TOMITA, Y., 1991, A Numerical Simulation for Gas-Solid Two-Phase Flow, *JSME International Journal, Series II*, Vol. 34, No. 2, 129-133.
26. McLAUGHLIN, J. B., 1994, Numerical Computation of Particles-Turbulence Interaction, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 20, 211-232.
27. LAZARO, B.J. ve LASHERAS, J.C., 1989, Particle Dispersion in a Turbulent, Plane, Free Shear Layer, *Phys. Fluids A*, Vol. 1, No. 6, 1035-1044.
28. PAN, Y. and BANERJEE, S., 1996, Numerical Simulation of Particle Interactions with Wall Turbulence, *Physics of Fluids* 8 (10), 2733-2755.

29. INAMURA, T., ADACHI, T. and SAKATA, H., 1983, A Numerical Analysis of Unsteady Separated Flow by Vortex Shedding Model, Bulletin of JSME, Vol. 26, No. 22, 2106-2112.
30. ELGHOBASHI, S. and TRUESDELL, G. C., 1993, On The Two-Way Interaction Between Homogenous Turbulence and Dispersed Solid Particles. I: Turbulence Modification, Physics of Fluids, A 5 (7), 1790-1801.
31. TSUJI, Y. and MORIKAWA, Y., 1982, LDV Measurements of An Air-Solid Two-Phase Flow in A Horizontal Pipe, Journal of Fluid Mechanics, Vol.120, 385-409.
32. VITTAL, B. V. R. and TABAKOFF, W., 1986, Two-Phase Flow Around A Two-Dimensional Cylinder, AIAA Journal, Vol. 25, No. 5, 648-654.
33. TUNÇ, M., KAYKAYOĞLU, C.R. and GÖKÇÖL, O., 1997, Computer Simulation of Two-Phase Turbulent Jet Flow, MAMKON'97, İ.T.Ü. Makina Fakültesi 1. Makina Mühendisliği Kongresi, Bildiriler Kitabı, 176-184.
34. TUNÇ, M., KAYKAYOĞLU, C.R. and GÖKÇÖL, O., 1998, Externally Excited Two-Phase Jet Flow in a Confined Geometry and Wave Evolution, EUROMECH 376 Wakes In Two-Phase Flows, Book of Abstracts, 96.
35. TUNÇ, M., KAYKAYOĞLU, C.R. and GÖKÇÖL, O., 1998, İki Fazlı Akışların Lagrange Yaklaşımıyla Modellenmesi, III. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı UHMK'98, Bildiriler Kitabı, 537-544.
36. TUNÇ, M., KAYKAYOĞLU, C.R. and GÖKÇÖL, O., 1999, İki Fazlı Türbülanslı Jet-Cisim Etkileşiminin Lagrangian Yaklaşımıyla İncelenmesi, TUMTMK, XI Ulusal Mekanik Kongresi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.
37. TUNÇ, M., KAYKAYOĞLU, C.R. and GÖKÇÖL, O., 11-14 September 2000, Purely Lagrangian Computational Model for Two-Phase Turbulent Jet Flow-Bluff

Body Interaction, ECCOMAS 2000, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, Spain (Accepted).

38. FOX, R. W. and McDONALD, A. T., 1985, Introduction to Fluid Mechanics, Third Edition, John Wiley&Sons, Inc.
39. WHITE, F. M., 1994, Fluid Mechanics, Third Edition, McGraw Hill International Editions.
40. BETCHOV, R. and CRIMINALE, W. O., 1967, Stability of Parallel Flows, New York/London: Academic.
41. CURRIE, I. G., 1974, Fundamental Mechanics of Fluids, McGraw-Hill.
42. TENNEKES, H. and LUMLEY, J. L., 1974, A First Course in Turbulence, The MIT Press.
43. CHORIN, A.J., 1994, Vorticity and Turbulence, Springer Verlag, New York.
44. ENWALD, H., PEIRANO, E. and ALMSTEDT, A. E., 1996, Eulerian Two-Phase Flow Theory Applied to Fluidization, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 22, 21-66.
45. KAYA, M. O., and KAYKAYOĞLU, C. R., 1996, Numerical Simulation of a Self-Sustained Wake-Edge Interaction, Journal of Fluids and Structures, Vol. 10, 215-236.
46. SHRAIBER, A. A., GAVIN, L. B., NAUMOV, V. A., and YATSENKO, V. P., 1990, Turbulent Flows in Gas Suspensions, Hemisphere, New York.
47. TRUESDELL, G.C., and ELGOBASCHI, S. E., 1991, Direct Numerical Simulation of a Particle –Laden Homogeneous Turbulent Flow. In Gas-Solid Flows; Proceedings 1st ASME-JSME Fluids Engineering Conference, 11-17.

48. TANG, L. and CROWE, C. T., 1989, Effects of Momentum Coupling on Development of Vortical Flows in Gas-Particle Systems, Proceeding 3rd International Symposium on Gas-Solid Flows, La Jolla, California, 37-42.
49. ACHENBACH, E., 1978, Heat Transfer from Spheres up to $Re=6 \times 10^6$, Proc. 6th Int. Heat Trans. Conf., Vol.5, 341-346.
50. PETERS, M.C.A.M., 1988, Aeroacoustic Sources in Internal Flows, Eindhoven University of Technology.
51. KAYKAYOĞLU, C. R., 1984, Interactions of Unstable Shear Layers with Leading Edges And Associated Pressure Fields, PhD. Thesis, Lehigh University, USA.
52. KAYKAYOĞLU, C. R., and ROCKWELL, D., 1986, Unstable Jet-Edge Interaction. Part 1. Instantaneous Pressure Fields at a Single Frequency, Vol. 169, 125-149.

ÖZGEÇMİŞ

Mutlu Tunç, 1971 yılında İstanbul'da doğdu. 1988 yılında Terakki Vakfı Özel Şişli Terakki Lisesi'nden mezun olarak aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1993 yılında Lisans eğitimini tamamlayarak 1994 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'na başladı. Aynı tarihte İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1996 yılında Yüksek Lisans Eğitimini tamamlayan Tunç, aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı'na girdi. Halen İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Tunç, evlidir.