



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GAZ-PARTİKÜL İKİ FAZLI GİRDAPLI AKIŞLARIN
MATEMATİK MODELLENMESİ VE SAYISAL ÇÖZÜMÜ

Mehmet TEKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GAZ-PARTİKÜL İKİ FAZLI GİRDAPLI AKIŞLARIN
MATEMATİK MODELLENMESİ VE SAYISAL ÇÖZÜMÜ**

Mehmet TEKE

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GAZ-PARTİKÜL İKİ FAZLI GİRDAPLI AKIŞLARIN MATEMATİK
MODELLENMESİ VE SAYISAL ÇÖZÜMÜ**

Mehmet TEKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez .././2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
Danışman

Prof. Dr. Atakan AVCI

Prof. Dr. Yusuf ULCAY

ÖZET

Çok fazlı ve girdaplı akışlar, akışkanlar dinamiğinin en önemli ve kompleks alanlarından biridir. Siklonlar iç içe geçmiş girdap yapısından dolayı çok fazlı ve girdaplı akışları çözmek ve araştırmak için çok uygundur. Bu yüzden girdaplı ve çok fazlı akışların matematik modellenmesi için siklonlar kullanılmıştır.

Bu çalışmada teğetsel girişli bir siklonda giriş geometrisinin basınç kaybı ve partikül toplama verimi üzerine etkileri hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile araştırılmıştır. Teğetsel girişli siklon için üç boyutlu, sürekli rejimde korunum denklemleri belirlenen sınır şartlarında sıkıştırılmaz ve türbülanslı akış için sayısal olarak çözülmüştür. Hesaplamalarda Reynold Stres türbülans modeli kullanılmıştır. Birincil faz olan hava için akış alanı için Navier-Stokes denklemleri çözülmüştür. İkinci faz olan partikül ise Lagrangian yöntem ile modellenmiştir. Sayısal analizlerde ticari CFD yazılımı olan Fluent kullanılmıştır. Hesaplanan sonuçlar literatürden benzer sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Giriş kesiti farklı geometrik oranlara sahip siklonlar çalışılmıştır.

Elde edilen sonuçlar siklon giriş kesitinin siklon performansı üzerinde önemli mertebede etkili olduğunu göstermektedir. Ancak giriş geometrisinin verim ve basınç düşümüne etksi doğrusal değildir. Ayrıca yüksek giriş kesitinde siklon içerisinde giren havanın siklon içerisinde yeteri kadar dönmeden çıkış borusundan kaçtığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı optimum giriş yüksekliğinin tesbiti için diğer geometrik ölçülerde hesaba katılmalıdır.

Anahtar Kelimeler : Girdaplı akışlar, İki Fazlı Akış, Siklon ayrıştırıcılar, Basınç düşümü, Partikül toplama verimi, Hesaplamalı akışkanlar mekaniği

ABSTRACT

The multiphase and swirling flows are one of the most important and complex fields of fluid dynamics. Cyclone separators are very convenient to solve and investigate multiphase and swirling flows due to the double vortex structure of the flow. Therefore, cyclones were used for mathematical modeling of swirling and multiphase flows.

This work presents a computational fluid dynamic simulation to investigate the effects of inlet geometry on the pressure drop and particle collection efficiency of a tangential inlet cyclone. Three-dimensional, steady governing equations for the incompressible, turbulent flow inside a tangential inlet cyclone are solved numerically under certain boundary conditions. Reynold Strees turbulence model was used. The continuous gas flow is predicted by solving Navier–Stokes equations. The second phase is modeled based on a Lagrangian approach. The commercial CFD code Fluent was used for numerical analysis. Computational results compared experimental data available in the literature for validation. Various cyclones, each has different geometrical ratio of inlet section were studied.

The obtained results show that inlet geometry influences cyclone performance considerably. However, this effect of inlet height is not linear. The design of the high inlet section generates a flow structure that increases the escape of fluid from the main flow to the exit without making enough number of revolutions before exiting. Therefore, an optimum inlet height should be present depending on the other geometrical dimensions.

Keywords: Swirling flows, Two phase flow, cyclones, pressure drop, collection efficiency, computational fluid dynamics

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
KISALTMALAR DİZİNİ.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
SİMGELER DİZİNİ.....	XI
GİRİŞ.....	1
1. KURAMSAL TEMELLER.....	9
1.1. Basınç Düşümü.....	11
1.2. Partikül Ayrışma Teorisi	12
1.3. Partikül Toplama Verimi.....	15
2. MATERYAL YÖNTEM.....	17
2.1. Korunum Denklemleri.....	17
2.2. Türbülans ve Reynolds Stres Türbülans Modeli	19
2.3. Çok Fazlı Akışlar.....	27
2.3.1. VOF model	27
2.3.2. Eulerian model.....	27
2.3.3. Eulerian Granular model.....	27
2.3.4. Karışım modeli	28
2.3.5. Ayrık faz modeli (Discrete phase model).....	28
2.3.5.1. Türbülanslı akışta partikül saçılması	30
2.3.5.2. Stokastik izleme (DRW)	30
2.4. Fluent ile Sayısal Çözüm.....	31
2.4.1. Giriş	31
2.4.2. Sonlu hacimler yöntemi	32
2.4.3. Çözücü seçenekleri	35
2.4.4. Ayrıklaştırma (Interpolasyon metodları)	37
2.4.4.1. Birinci derece upwind yöntemi	37
2.4.4.2. İkinci derece upwind yöntemi.....	37
2.4.4.3. QUICK yöntemi.....	38
2.4.4.4. PRESTO (Pressure staggering option scheme) yöntemi	39
2.5. Grid Oluşturma Yöntemi ve Grid Yapısı	40
2.6. Siklon Geometrisi.....	43
2.7. Akışkan Özellikleri ve Sınır Şartları	45
2.8. Partikül-Duvar Etkileşimi.....	47
2.9. Analiz Metodolojisi	48

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	50
3.1. Grid Hassasiyet Analizleri.....	50
3.2. Tek Fazlı Akış Analizleri ile Yapılan Çalışmanın Doğrulanması.....	51
3.3. Teğetsel Girişli Stairmand Siklonunda Giriş Kesiti Değişiminin Basınç Kaybı ve Siklon Verimliliğine Etkisinin İncelenmesi.....	59
3.3.1. Değişken giriş kesiti	59
3.3.1.1. Giriş hızının basınç kayıpları üzerine etkisinin incelenmesi (b/D=Sabit) ..	60
3.3.1.2. Sabit giriş debisinin basınç kayıpları üzerine etkisinin incelenmesi (b/D Sabit).....	62
3.3.1.3. Sabit giriş debisinin hız profilleri üzerine etkisinin incelenmesi (b/D sabit)	63
3.3.1.4. Sabit giriş debisinin partikül toplama verimi üzerine etkisinin incelenmesi	71
3.3.2. Sabit giriş kesiti	72
3.3.2.1. Giriş hızının basınç kayıpları üzerine etkisinin incelenmesi	75
3.3.2.2. Kesit boyut oranının hız profilleri üzerine etkisinin incelenmesi	80
3.3.2.3. Sabit giriş kesiti ve debisinin partikül toplama verimi üzerine etkisinin incelenmesi	87
4. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	90
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	100
TEŞEKKÜR	101

KISALTMALAR DİZİNİ

HAD	- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LDA	-Lazer Dopler Anemometri (LDA)
Re	- Reynolds sayısı
LES	- Büyük edi simülasyonu
RSTM	-Reynolds Stres Türbülans Modeli
VOF	-Volume of Fluid
DRW	- Stokastik izleme
DB	-Yoğunluk tabanlı
PRESTO	-Pressure staggering option scheme yöntemi
PBS	-Basınç Temelli Ayrık Çözüm Yöntemi
PBC	-Basınç Temelli Birleşik Çözüm Yöntemi
DBC	-Yoğunluk Temelli Birleşik Çözüm Yöntemi

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1: Stairmand Siklon Boyutları.....	43
Çizelge 2.2: Nümerik Çalışmada Kullanılan Siklon Boyutları (m).....	44
Çizelge 2.3: Havanın Özellikleri.....	45
Çizelge 2.4: Sınır Şartları.....	46
Çizelge 2.5: Çözüm Algoritmalarının Kullanımı.....	49
Çizelge 3.1: Nümerik Çalışmada Kullanılan Siklonlara Ait Boyutlar.....	59
Çizelge 3.2: C1, C2 ve C3 Siklonlarına Ait Giriş Hızları.....	62
Çizelge 3.3: Nümerik Çalışmada Kullanılan Siklonlara Ait Boyutlar.....	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1: Teğetsel Girişli Bir Siklonun Çalışma Prensibi.	10
Şekil 1.2: Ters Akışlı Siklonda Statik ve Toplam Basınç Profilleri.	11
Şekil 1.3: Ters Akışlı Siklonda Partiküle Etki Eden Kuvvetler.	13
Şekil 1.4: Teorik ve Gerçekleşen Partikül Ayrırma Verimi.	15
Şekil 1.5: Çeşitli Partikül Ayrırma Yöntemlerinin Verimleri.	16
Şekil 2.1: Türbülanslı Akışta Ediler.	20
Şekil 2.2: Enerji Kaskadı.	20
Şekil 2.3: Düzlem Levha Üzerinde Türbülanslı Sınır Tabakanın Gelişimi.	21
Şekil 2.4: Hız Profili Üzerinde Ortalama ve Salınım Hızları.	22
Şekil 2.5: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Çözüm Adımları.	32
Şekil 2.6: Hesap Hacmi Üzerinden Bir Kontrol Hacminin Gösterimi.	33
Şekil 2.7: Kontrol Hacmi.	34
Şekil 2.8: Basınç Temelli ve Yoğunluk Temelli Çözümde Denklemlerin Çözüm Sırası.	36
Şekil 2.9: QUICK Yöntemi.	39
Şekil 2.10: Sayısal Ağ İçin Kullanılabilecek Eleman Tipleri.	40
Şekil 2.11: Siklon İçin İdeal Bir Grid Yapısı.	42
Şekil 2.12: Stairmand Siklonu.	44
Şekil 2.13: Siklonun CAD Modeli.	45
Şekil 2.14: Partikül-Duvar Etkileşimi.	47
Şekil 2.15: Reflekt Duvarın Partikülü Yansıtma Açıları.	47
Şekil 3.1: Farklı Eleman Sayılarında Eksenel Hız Profillerinin Karşılaştırılması.	50
Şekil 3.2: Farklı Eleman Sayılarında Teğetsel Hız Profillerinin Karşılaştırılması.	51
Şekil 3.3: Siklonda Farklı Giriş Hızlarında Basınç Kayıpları.	52
Şekil 3.4: Teğetsel Girişli Stairmand Siklonunda Akım Çizgileri.	53
Şekil 3.5: Stairmand Siklonu Hız Profilleri Ölçüm İstasyonları.	54
Şekil 3.6: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=35 cm).	55
Şekil 3.7: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=41 cm).	55
Şekil 3.8: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=66 cm).	56
Şekil 3.9: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=81 cm).	56
Şekil 3.10: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=35 cm).	57
Şekil 3.11: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=41 cm).	57
Şekil 3.12: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=66 cm).	58

Şekil 3.13: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması ($z=81$ cm).....	58
Şekil 3.14: Nümerik Analizlerde Kullanılan Siklon Geometrileri, C1, C2 (Stairmand) ve C3.	60
Şekil 3.15: a/b Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıpları Üzerinde Etkisi...	61
Şekil 3.16: C1, C2 ve C3 Siklonları için Farklı Giriş Kesitlerinde Giriş Hızının Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi	61
Şekil 3.17: Sabit Debide C1, C2 ve C3 Siklonları için Statik Basınç Konturu	63
Şekil 3.18: Stairmand Siklonu Hız Profilleri Ölçüm İstasyonları.	64
Şekil 3.19: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=20$ cm).....	65
Şekil 3.20: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=60$ cm).....	65
Şekil 3.21: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=100$ cm).....	66
Şekil 3.22: Sabit Giriş Debisinde C1, C2 ve C3 Siklonları için Teğetsel Hız Konturu.	67
Şekil 3.22'den de görüleceği üzere en yüksek teğetsel hız C1 siklonunda bulunmuştur.	67
Şekil 3.23: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri ($z=20$ cm).....	68
Şekil 3.24: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri ($z=60$ cm).....	68
Şekil 3.25: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri ($z=100$ cm).....	69
Şekil 3.26: Sabit Giriş Debisinde C1, C2 ve C3 Siklonları için Eksenel Hız Konturu.	70
Şekil 3.27: 15 m/s Giriş Hızı için Partikül Toplama Verimleri	71
Şekil 3.28: Stairmand Siklonu Giriş Kesiti	73
Şekil 3.29: Nümerik Analizlerde Kullanılan Siklon geometrileri (Soldan sağa doğru S1, S2, S3 (Stairmand), S4 ve S5).	74
Şekil 3.30: a/b Oranının Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi	75
Şekil 3.31: a/b Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi	76
Şekil 3.32: e/a Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi	77
Şekil 3.33: e/b Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi	78
Şekil 3.34: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Statik Basınç Konturu.....	79
Şekil 3.35: Stairmand Siklonu Hız Profilleri Ölçüm İstasyonları.	80
Şekil 3.36: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=20$ cm).....	81
Şekil 3.37: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=60$ cm).....	81
Şekil 3.38: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=100$ cm).....	82
Şekil 3.39: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Teğetsel Hız Konturu.	83
Şekil 3.40: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri ($z=20$ cm).....	84
Şekil 3.41. 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri ($z=60$ cm).....	84
Şekil 3.42: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri ($z=100$ cm).....	85
Şekil 3.43: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Eksenel Hız Konturu.	86
Şekil 3.44: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Partikül Toplama Verimleri.....	87
Şekil 3.45: a/b Oranının Radyal Hızlara Etkisi ($z=20$ cm).....	88
Şekil 3.46: S4 ve S5 Siklonlarında Akışkanın Kısa Yol Üzerinden Siklonu Terk Etmesi	89

SİMGELER DİZİNİ

a	Siklon giriş yüksekliği, (m)
b	Siklon giriş genişliği, (m)
B	Siklon toz çıkış çapı, (m)
D	Siklon çapı, (m)
De	Siklon gaz çıkış borusu çapı, (m)
H	Siklon boyu, (m)
h	Siklon silindir yüksekliği, (m)
S	Siklon çıkış borusunun siklon içerisinde kalan kısmının uzunluğu, (m)
x, y, z	Kartezyen koordinat takımı
i, j, k	Kartezyen koordinat bileşenleri
k	Türbülans kinetik enerjisi, (m^2/s^2)
p	Basınç, (Pa)
Re	Reynolds sayısı
u, v, w	x, y ve z yönlerindeki hız değerleri, (m/s)
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	x,y ve z yönlerindeki ortalama hız değerleri,(m/s)
$\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'$	x,y ve z yönlerindeki türbülans yoğunlukları, (1/s)
U	Hız, (m/s)
C_D	Sürüklenme katsayısı
F_D	Sürüklenme kuvveti, (N)
d	Partikül çapı, (m)

Yunan Harfleri

Γ	Yayınım katsayısı
Δ	Fark
ε	Türbülans edi disipasyonu
μ	Dinamik viskozite, (Pa.s)

μ_t	Türbülans viskozitesi, (Pa.s)
ν	Kinematik viskozite, (m ² /s)
ρ	Yoğunluk, (kg/m ³)

İndisler

p	Partikül
50	%50 verim
eff	Efektif

GİRİŞ

Siklonlar endüstride en çok kullanılan gaz-katı ayırıcılardandır. Bunun nedeni siklonların basit dizaynlarından dolayı düşük üretim ve düşük bakım maliyetleridir. Herhangi dönen bir parçaları olmadığı için çok farklı malzemelerden üretilbilirler. Düşük basınç kayıpları ve yeterli seviyedeki partikül toplama verimleri siklonları gaz-katı ayırma prosesi için elverişli hale getirmektedir.

Siklonlar teğetsel ve eksenel girişli olarak tasarlanırlar ve endüstride en sık teğetsel olanlar kullanılır. Teğetsel siklonlarda partiküller gaz içerisinden santrifüj kuvvetler yardımı ile ayrılırlar. Teğetsel girişten giren tozlu hava siklon içerisinde girdap hareketi oluşturur. Merkezkaç kuvvet etkisine maruz kalan partiküller siklon cidarına savrulur ve girdap ile beraber aşağı doğru ilerleyerek toz kutusuna giderler. Konik kısımdan aşağı doğru ilerleyen dış girdap siklonun orta bölgesinde ikincil bir girdap hareketi daha oluşturur. Oluşan bu ikincil girdap ile beraber partiküllerden ayrılmış hava siklonun üst kısmındaki çıkış borusundan sistemi terk eder. Akışın iç içe geçmiş ters yönlü iki girdaptan oluşması ve akış ortamında hava ile hareket eden partiküllerin olması siklonlar içerisindeki akış alanının çözümünü son derece güçleştirir.

Siklonların performansları değerlendirilirken bilinmesi gereken en önemli iki husus siklonun partikül toplama verimi ve basınç kaybıdır. Bu değerlerin tahmini veya hesabı siklon içerisindeki akışın karmaşıklığından dolayı oldukça zordur. Literatürde siklonlar ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Siklonlar ile ilgili çalışmalar, partiküllerin %50 verimle tutulduğu kritik çapın hesabı ve fraksiyonel verimlerin hesabına yöneliktir. Bu tarz çalışmalara Shepperd ve Lapple (1939), Lapple (1951), Barth (1956), Barth ve Leineweber (1964), Muschelknautz (1970), Leith ve Licht (1972), Chan ve Lippmann (1977), Dietz (1981), Mothes ve Löffler (1988), Iozza ve Leith (1990), Liden ve Kenny (1991), Avcı ve Karagöz (2000, 2001 ve 2003), Karagoz ve Avcı (2005) sayılabilir. Bu modellerin bir kısmı

az parametre içermekte olup kullanımı kolay, bir kısmı ise daha fazla parametre içermekte olup kullanması zordur. Fakat sonuçlar genel bir fikir vermesi açısından yeterli olmakla beraber sistemi tam olarak çözmek, akışın kompleks yapısından dolayı zordur.

Siklonlarda basınç kaybının hesabına yönelik olarak da çeşitli çalışmalar mevcuttur. En basit modeller geometrik parametrelerden yola çıkılarak türetilmiş olup Shepperd and Lapple (1939), Casal ve Martinez (1983), Dirgo (1988) ve Coker (1993) sayılabilir. Barth (1956) siklon sürtünme yüzeyini de dikkate alan bir model geliştirmiştir. Basınç düşümüne toz yükünün etkisi de farklı araştırmacılar tarafından ele alınmıştır (Gil ve ark. 2002). Yapılan deneyler sonucunda gaz içerisindeki toz miktarı arttıkça basınç düşümünün bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni teğetsel hızdaki azalma olarak tespit edilmiştir. Ayrıca basınç düşümünün toz miktarına bağlılığını ifade eden çeşitli matematik modeller de önerilmiştir (Muschelknautz 1970, Gil ve ark. 2002).

Leith ve Litch (1972) siklonlarda partikül toplama verimlerini hesaplamak için teorik olarak çalışmışlardır. Sürüklenme katsayısı ve siklon tarafından tutulamayan partiküllerin tekrar siklona girmesi durumları da dikkate alınmıştır. Siklonda partikül toplama veriminin hesaplanacağı bir teori geliştirmişlerdir. Bu teorinin teğetsel girişli siklonlarda iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Dirgo ve Leith (1985) siklon partikül toplama verimini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmalar Stairmand siklonu üzerinde yapılmıştır. Deneyler 860 kg/m^3 yoğunluktaki ve 1-7 μm çaplarında partiküller kullanılarak ve giriş hızı 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Lapple, Barth, Dietz ve Leith-Litch teorik modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlara göre Bart ve Leith-Litch teorileri teğetsel girişli siklonlarda iyi sonuçlar verirken Lapple ve Dietz teorileri ise kabul edilebilir sonuçlar vermediği ifade edilmiştir.

Ioza ve Leith (1990) 11 farklı geometri ve sınır şartında partikül toplama verimi üzerinde deneysel ve geliştirilen bir lojistik fonksiyon1 ile sonuçlar elde edilmiştir. Partikül toplama verim hesabı için partikül çapı 1.4-7.4 µm aralığında kullanılmıştır. Sonuçlar deneysel ve teorik (Barth, Lapple, Dietz, Leith-Licht, Ioza ve Leith) sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan lojistik fonksiyon yapılan 11 test sonucuna göre partikül verimliliği ve partikül çapı arasındaki ilişkiyi iyi temsil etmektedir.

Ramachandran ve ark. (1991), Dirgo (1988) tarafından geliştirilen ampirik model kullanılarak 98 siklon modeli üzerinde istatistiksel analizler ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda aerodinamik çapa bağlı olarak siklon basınç kaybı ve boyutlandırma için gerekli grafikler sunulmuştur.

Bohnet (1995) aerosiklonlarda partikül toplama verimine gaz sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir. Çalışma, 293-1123 K sıcaklıkları arasında alınarak basınç düşümü ve verim değişimi bulunmuştur. Gaz sıcaklıklarının verim ve basınç düşümü üzerine olan etkisinin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu gösterilmiştir.

Griffiths ve Boysan (1996) üç farklı tip siklonda partikül toplama verimliliği ve basınç düşümleri nümerik olarak hesaplanmıştır. Partikül toplama verimleri teorik değerler ile, basınç düşümleri ise deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile elde edilen sonuçların siklonlarda basınç düşümü ve partikül toplama verimliliği hesaplamada uygun sonuçlar verdiği ifade etmişleridir. Üç farklı ampirik model arasında yapılan karşılaştırmada küçük siklonlarda Barth (1956) modelinin, büyük siklonlarda ise Ioza ve Leith (1989) modelinin doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Fraser ve ark. (1997) Siklon içerisindeki 3 boyutlu türbülanslı akış, Phoenics yazılımı ile çözülmüş. Standart ve modifiye edilmiş k-Epsilon yöntemleri kullanılarak yapılan Lazer

Dopler Anemometri (LDA) ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre siklon içerisindeki karmaşık vorteks yapısından dolayı standart k-epsilon yöntemi kabul edilebilir sonuçlar vermemiştir. Bununla beraber modifiye edilmiş k-epsilon modeli daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Liden ve Gudmundsson (1997) siklonda partikül toplama verimini ifade etmek için çalışma şartlarına ve siklon dizaynına bağlı olarak yarı ampirik model geliştirme üzerinde çalışmışlardır. Bunun için dört siklon geometrisi incelemiştir. Partikül toplama veriminin siklon dizaynı ve çalışma şartlarıyla ilişkisine dair yarı ampirik bir model önermişlerdir. Geliştirilen bu modelde Reynolds sayısının (Re) 500-100 000 değerleri arasında vorteks tüp uzunluğunun partikül toplama verimi üzerine etkilerini ifade etmişlerdir.

Zhu ve Lee (1999) küçük boyutlu siklonlar üzerinde partikül toplama verimi ve basınç düşümünü deneysel olarak çalışmışlardır. Yedi farklı siklon için akış oranı 60-10 lt/dak, partikül çapı 0.026-3.6 μm , silindir yüksekliğinin siklon gövde çapına oranı 0.75-4.5 ve çıkış borusu uzunluğunun siklon gövde çapına oranı 0.5-1.5 arasında alınmıştır. Silindir yüksekliği ve çıkış borusu uzunluğunun da etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre yüksek akış oranlarında partikül toplama verimi artmaktadır. Silindir yüksekliği arttıkça toplama verimliliği artmaktadır. Silindir yüksekliğinin uzun olması ya da çıkış borusunun kısa olması basınç düşümünü azaltmaktadır.

Slack ve ark. (2000) Silindir çapı $D=0.205$ m olan Starimand siklonunda Reynolds Stres türbülans modeli ve Büyük edisimülasyonu (LES) ile nümerik çözümler yapılmış ve elde edilen hız profilleri literatürden deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre Reynolds Stres Türbülans Modeli (RSTM) için uygun grid yapısı ve düğüm noktası sayısı önerilmiştir. LES için daha hassas bir grid ile çalışılmış. Hem RSTM ile hem de LES ile deneysel veriler ile çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. RSTM hızlı ve doğru sonuçlar verdiği için LES yöntemine göre avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Avcı ve Karagöz (2000) Teğetsel girişli siklonlarda iki fazlı akışın modelini sunmuşlardır. Bu modelle siklon geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve partikül konsantrasyonunun etkilerini içeren yeni parametreler tanımlamışlardır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel veriler ve teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile uygunluk gösterdiği ifade edilmiştir. Siklon yüksekliğinin belirli bir değere kadar artması toplama verimini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Çok fazla parametreyi içeren bu modelin kolay kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir.

Avcı ve Karagöz (2001) siklonlarda basınç kayıplarının hesabına yönelik teorik bir model geliştirmişlerdir. Bu model akışkan özellikleri, akış ve geometrik parametrelerin bir fonksiyonu olarak oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Denklemin çok kolay uygulanabildiği ve deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Xiang ve ark. (2001) siklon performansı üzerinde konik kısmın etkisini boyutu deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun için toz kutusuna açılan 3 farklı çap değerinde ve 4 farklı akış oranında ölçümler yapılmıştır. Deney sonuçları teorik yöntemler ile karşılaştırılarak bu teorik yöntemlerin uygunluğu incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre akış oranı verim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve yüksek akış oranlarında verim artmaktadır. Koni hacminin değişimi sadece toplama verimi üzerinde bir etkisi olduğu, koni dip çapının azalması toplama verimini artırdığı ifade edilmiştir.

Hoffman ve ark. (2001) Siklon uzunluğu etkisinin partikül toplama verimi ve basınç düşümü üzerine etkileri deneysel, HAD ve matematiksel modellerle incelemişlerdir. Giriş hızı 19 m/s ve partikül yoğunluğu 2730 kg/m^3 , partikül çapı 0.3-60 μm için çalışmalar yapmışlardır. Geometrik değerler $D=200 \text{ mm}$ siklon çapı için $L/D=2.65-6.15$ aralığında çalışmışlardır. $L/D=5.65$ oranına kadar siklon performansında iyileşme gözlemlenirken, bu

değerden sonra performans düşmeye başlamıştır. HAD çözümlerinin deneysel sonuçlarla uygun olduğunu ifade etmişleridir. L/D oranında artış ile basınç düşümünde azalmanın olduğu gösterilmiştir.

Avcı ve Karagöz (2003) gaz siklonlarında akış ve geometrik parametrelerinin verim üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Matematiksel modelde sürtünme etkileri göz önüne alınmıştır. Sonuçlar literatürdeki yarı ampirik modellerle karşılaştırılmıştır. Literatürdeki yarı ampirik modeller ile yapılan karşılaştırma sonucunda geliştirilen matematiksel modelin teğetsel girişli bir siklonun performansının değerlendirilmesinde başarılı sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Özellikle küçük boyutlu siklonlarda akış ve geometrik parametrelerden yüzey sürtünmesi, vorteks uzunluğu ve akış rejimi gibi parametrelerin önemli rol oynadığı gösterilmiştir.

Gimbun ve ark. (2005) Stairmand ve Bohnet siklonlarında basınç düşümü üzerinde sıcaklık ve giriş hızının etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Analizlerde Fluent yazılımı kullanılmış ve türbülans modeli olarak RNG k-epsilon ve RSTM kullanılmıştır. Sonuçları literatürdeki ampirik ifadeler ile karşılaştırmışlardır. Hesaplamalarda RSTM modelin deneysel verilerden %3 hata ile sonuçları tahmin ettiği, RNG k-epsilon modelinin ise %14-18 arasında hata ile sonuçları tahmin ettiği belirtilmiştir. Sıcaklık değişimi dikkate alındığında en uygun ampirik yöntemin Shepherd ve Lapple olduğu ifade edilmiştir.

Xiang ve Lee (2005) çalışmasında Stairmand siklonunda 3 farklı koni dip çapı değişimini dikkate alarak ve giriş hızı 8 m/s ile nümerik analizler yapmıştır. Hesaplamalarda türbülans modeli olarak RNG k-epsilon ve RSTM kullanılmıştır. Bu modellerin siklonlar için uygunlu ve koni dip çapının etkisi incelenmiştir. Fluent yazılımı ile elde edilen nümerik çözümler sonucunda RSTM modelin RNG k-epsilon modele göre daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ayrıca koni dip çapı azaldıkça ayrışma veriminin daha artacağı ifade edilmiştir.

Chuah ve ark.'ın (2006) çalışmasında siklonlarda koni dip çapının etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Hesaplamalar RNG k-epsilon ve RSTM türbülans modeli kullanılmıştır. Giriş hızı 8'den 16 m/s arasında, partikül çapı 1 μm den 3 μm ' ye kadar alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak HAD'ın siklon tasarımıdaki yeri ve kullanılan türbülans modellerinin girdaplı akışlar için uygunluğu araştırılmıştır. Nümerik sonuçlar ile deneysel veriler arasında yapılan karşılaştırmada basınç düşümleri %2.9, partikül toplama veriminde ise %5 hata ile sonuçlar elde edilmiştir. Koni dip çapının değiştirilmesi ile elde edilen sonuçlarda, küçük koni dip çaplarında teğetsel hız ve aksel hız değerlerinin çok yüksek olduğu, bu yüksek hız değerlerinin ise toplama verimini ve basınç düşümünü önemli ölçüde artırdığı ifade edilmiştir.

Cortes ve Gil'in (2007) çalışmasında Ters akışlı siklonlar için geliştirilen modeller incelenmiştir. Yapılan çalışma tek fazlı ve çift fazlı olarak iki kısımda gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinin ve kullanılan türbülans modellerinin bu tip akışlarda uygunluğunu incelemiştir. İnceledikleri çok sayıda modelin deneysel datalar ile karşılaştırmasını yaparak en uygun modelleri önermişlerdir. Yapılan incelemelere göre bir siklonda basınç düşümü için en uygun modelin Muschelknautz, partikül toplama verimi için ise Trefz ve Muschelknautz modeli olduğu ifade edilmiştir. HAD hesaplamalarında türbülans için RSTM ve LES kullanmanın daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

Kaya ve Karagöz (2008) girdaplı akışlarda türbülans modellerinin uygunluğu nümerik olarak incelemiştir. Bu amaçla teğetsel girişli Stairmand siklonu üzerinde tek fazlı analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde standart k-epsilon, RNG k-epsilon ve Reynolds Stres türbülans modellerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda Reynolds Stres türbülans modelinin girdaplı akışlar için daha uygun olduğunu önermişlerdir. Ayrıca girdaplı akışlarda kullanılacak çözüm algoritmaları hakkında tavsiyelerde bulunmuşlardır.

Kaya ve Karagöz (2009) yaptıkları nümerik çalışmada siklon dip çapının uzatılması ile elde edilen yeni geometrilerin siklonda partikül toplama verimine etkisini incelemişlerdir. Siklon dip uzunluğu 40 mm' ye kadar partikül toplama verimini artırdığını, ancak 40 mm' den sonra giriş hızı 10 m/s altında verimin düşmeye başladığını, daha yüksek hızlarda ise verimin değişmediğini ifade etmişlerdir.

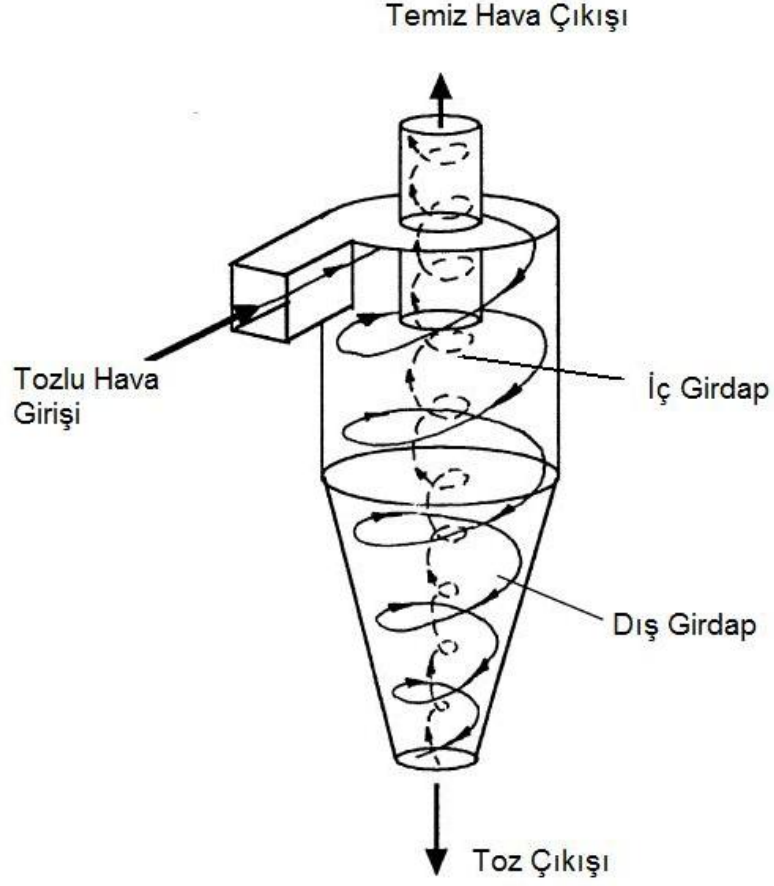
Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisine bağlı olarak nümerik çözümler de yapılmaktadır. Siklonlar ile ilgili ilk HAD analizleri Boysan ve ark. (1982) tarafından yapılmıştır. HAD analizleri ile bilgisayar ortamında yapılan çalışmalar hafıza ve analiz süresi kısıtı dışında herhangi bir kısıtın olmayışı nedeni ile araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Böylece bir çok sınır şartı ve geometride analizler yapmak mümkün olmaktadır. Griffiths ve Boysan (1996), Slack ve ark. (2000), Gong ve Wang (2004), Wang ve ark. (2005), Xiang ve Lee (2005), Gimbun ve ark. (2005), Chuah ve ark. (2006) ve Karagoz ve Kaya (2007) son yıllardaki nümerik çalışmalardır. Nümerik çalışmalar genellikle basınç düşümü ve partikül toplama veriminin tahminine yönelik olmakla beraber en iyi sonucu veren nümerik algoritmalar yada türbülans modelleri de HAD ile çalışan araştırmacıların ilgi alanını oluşturmaktadır.

1. KURAMSAL TEMELLER

Siklon seperatörler, santrifüj kuvvetler yardımı ile partiküllerin hava içerisinde ayrılmasında kullanılan aygıtlardır. Endüstride bir çok alanda kullanılan siklonlar, sabit parçalı olması dolayısı ile üretiminin kolaylığı ve bakım gerektirmemesi nedeniyle tercih edilirler. Siklonlar farklı sektörlerde değişik boyut ve ebatlarda kullanılabilir. Siklonların kullanıldığı sektörlere örnek vermek gerekirse:

- Petrol ve Gas
- Enerji Santralleri
- Demir Çelik
- Çimento Fabrikası
- Taş Ocakları
- Gıda Sanayi

sayılabilir. Şekil 1.1' de teğetsel girişli bir siklonun çalışma prensibi görülmektedir. Tozlu hava, siklonun üst tarafındaki teğetsel kanaldan giriş yapar. Girişin teğetsel olması siklon içerisinde girdap hareketi oluşturur. Girdap hareketi ile oluşan santrifüj kuvvetler sayesinde havadan ağır olan partiküller konik cidardan aşağı doğru kayarak siklonun alt tarafından çıkar. Ayrıca dış girdap, konik kısımdan aşağı doğru ilerlerken siklonun orta bölgesinde ikinci bir girdap daha oluşur. Yukarı doğru hareket eden bu girdap yardımı ile partikülden ayrılmış hava siklonun üst tarafındaki silindirden sistemi terk eder. Çıkış borusu bir miktar siklona daldırılmış durumdadır.



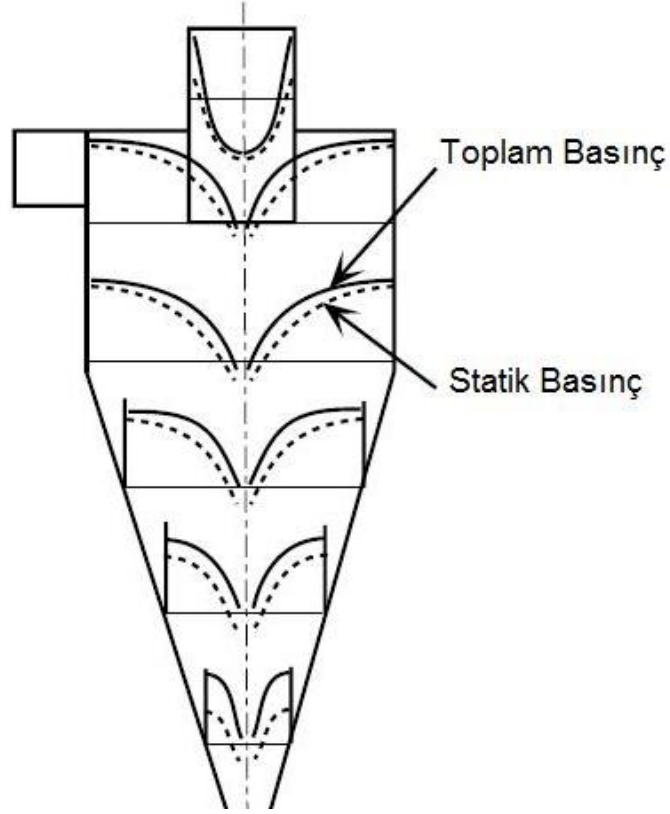
Şekil 1.1: Teğetsel Girişli Bir Siklonun Çalışma Prensibi.

KAYNAK: RHODES, M. 2008. Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons Ltd., England, 450 p.

Siklonlarda performansı belirleyen en önemli iki parametre basınç kaybı ve partikül toplama verimidir. Bu bilgilerin doğru olarak tayin edilmesi ise oldukça zordur. Bunun nedeni siklonların içerisinde oluşan iç içe iki girdaplı akıştır. Bununla beraber partikül dağılımları, büyüklükleri ve partiküllerin birbirleri ve hava ile etkileşimleri de problemi oldukça güçleştirmektedir. Literatürde basınç kayıpları ve partikül toplama verimleri için çeşitli ampirik ifadeler araştırmacılar tarafından türetilmiştir. Ayrıca son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak nümerik analiz yöntemleri de siklonların basınç kaybı ve partikül toplama verimlerinin tespiti için kullanılmaktadır.

1.1. Basınç Düşümü

Siklon içerisindeki akışın dönümlü olması radyal yönde bir basınç gradyanı oluşturur. Siklon içerisinde akışın girişinden çıkışına kadar olan sürtünme kayıpları ile akışın sürekli yön değiştirmesinden kaynaklanan kayıpların toplamı siklonda toplam basınç kaybını oluşturur. Şekil 1.2' de görüldüğü gibi statik basınç radyal yönde artmaktadır ve ayrıca statik basınç duvarlarda maksimumdur.



Şekil 1.2: Ters Akışlı Siklonda Statik ve Toplam Basınç Profilleri.

KAYNAK: HOFFMAN, A.C. and E.S. LOUIS. 2008. Gas Cyclones and Swirl Tubes, Springer, Verlag Berlin Heidelberg.

Toplam basınç kaybı siklonun girişi ile çıkışı arasında ölçülür ve gaz akışının karesi ile doğru orantılıdır. Direnç katsayısı Euler sayısı (Eu) olarak adlandırılır ve basınç kaybı ve karakteristik hız cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Eu = \Delta P / \left(\frac{\rho U^2}{2} \right) \quad (1.1)$$

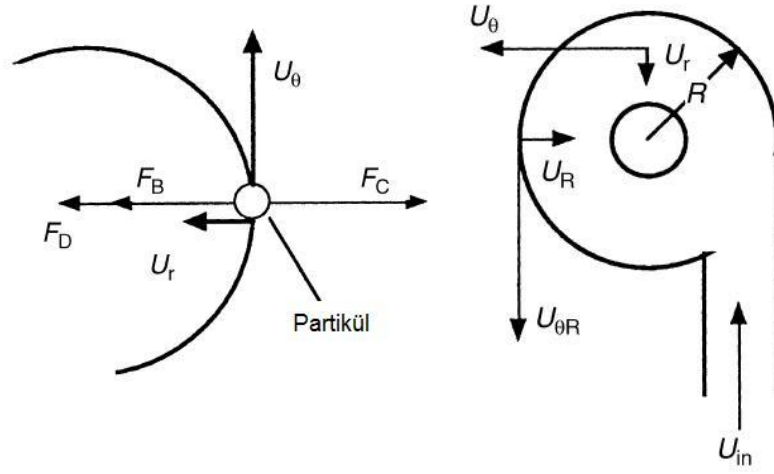
ρ gaz yoğunluğudur. U karakteristik gaz hızıdır ve

$$U = Q/A \quad (1.2)$$

şeklinde yazılır. Burada Q gaz debisi ve A siklon giriş kesitidir.

1.2. Partikül Ayrışma Teorisi

Teğertsel girişli bir siklonda gaz akışı ile siklona giren partikül siklon içerisinde dönmeye başlar. Bu esnada partiküle sürüklenme kuvveti F_D , yerçekimi kuvveti F_B ve merkezkaç kuvveti F_C etkir. Bu kuvvetlerin dengesi altında partikül bir yörüngeyi takip eder. Şekil 1.3' de görüldüğü üzere F_B ve F_D kuvvetleri partikülü siklon içerisine doğru etki ederken, F_C merkezkaç kuvveti dışarıya doğru etki eder. Bu kuvvetlerden başka bir partiküle partikül ısısından kaynaklanan thermophoretik kuvvetler, mikronun altındaki ölçekte laminar akışta etkili olan Brownian kuvveti ve kayma oranı nedeni ile meydana gelen Saffman kaldırma kuvveti etki eder. Bu kuvvetler hesaplamalarda sıcaklık etkileri incelenmediği için ve akışın türbülanslı olması nedeni ile ihmal edilmiştir.



Şekil 1.3: Ters Akışlı Siklonda Partiküle Etki Eden Kuvvetler.

KAYNAK: RHODES, M. 2008. Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons Ltd., England, 450 p.

Partikül çapı d ve yoğunluğu ρ_p , gaz yoğunluğu ρ_f , yörünge yarıçapı r , siklon silindir yarıçapı R ve viskozite μ olmak üzere ve partikülün teğetsel hızı U_θ ve radyal hızı U_r olduğunda Stokes kanununa göre sürüklenme kuvveti;

$$F_D = 3\pi d \mu U_r \quad (1.3)$$

Partiküle etkiyen merkezkaç kuvveti ve kaldırma kuvveti sırasıyla

$$F_C = \frac{\pi d^3}{6} \rho_p \frac{U_\theta^2}{r} \quad (1.4)$$

$$F_B = \frac{\pi d^3}{6} \rho_f \frac{U_\theta^2}{r} \quad (1.5)$$

Bu kuvvetler altında hareket eden partikül belli bir yörüngeye oturacaktır ve bu durumda aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$F_C = F_D + F_B \quad (1.6)$$

$$d^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_f)} \left(\frac{r}{U_\theta^2}\right) U_r \quad (1.7)$$

Dönen solid yapılarda $U_\theta = \omega r$ 'dir ve Burada

ω açısal hızdır ve serbest girdaplarda $U_\theta r = \text{Sabittir}$. Siklon içerisindeki sınırlandırılmış girdap hareketi de yapılan deneyler ile gösterilmiştir ki,

$$U_\theta r^{1/2} = \text{Sabittir.} \quad (1.8)$$

$$U_\theta r^{1/2} = U_{\theta R} R^{1/2} \quad (1.9)$$

Siklon içerisindeki gaz akışını üniform kabul edersek,

$$q = 2\pi r L U_r = q = 2\pi R L U_R \quad (1.10)$$

$$U_R = U_r (r/R) \quad (1.11)$$

Denklem 1.9 ve 1.11' deki ifadeler denklem 1.7' de yazılırsa;

$$d^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_f)} \left(\frac{U_R}{U_{\theta R}^2}\right) r \quad (1.12)$$

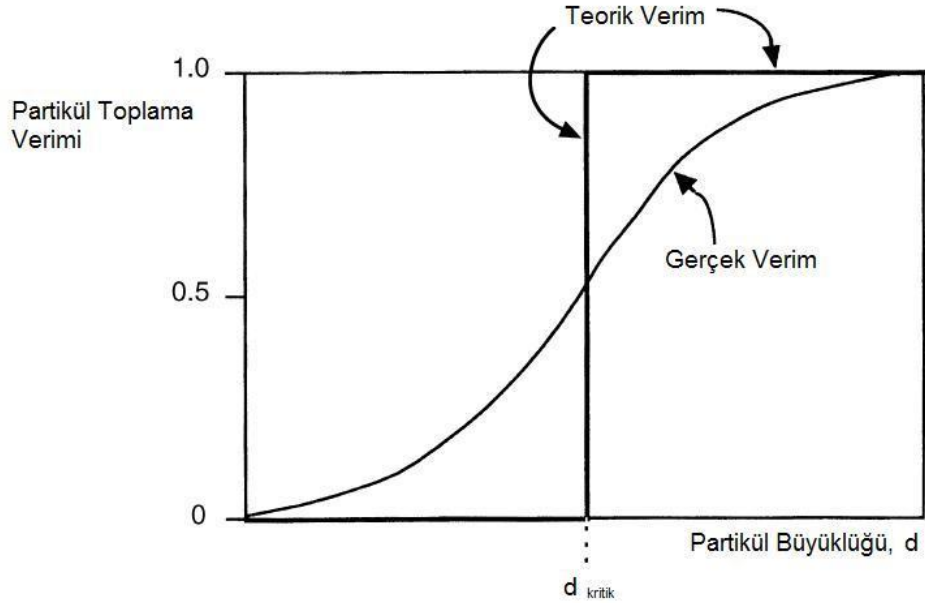
d çapındaki partikülün ayrışması için $r=R$ olmalıdır.

Bu durumda kritik partikül çapı d_{kritik} ;

$$d_{kritik}^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_f)} \left(\frac{U_R}{U_{\theta R}^2} \right) R \quad (1.13)$$

1.3. Partikül Toplama Verimi

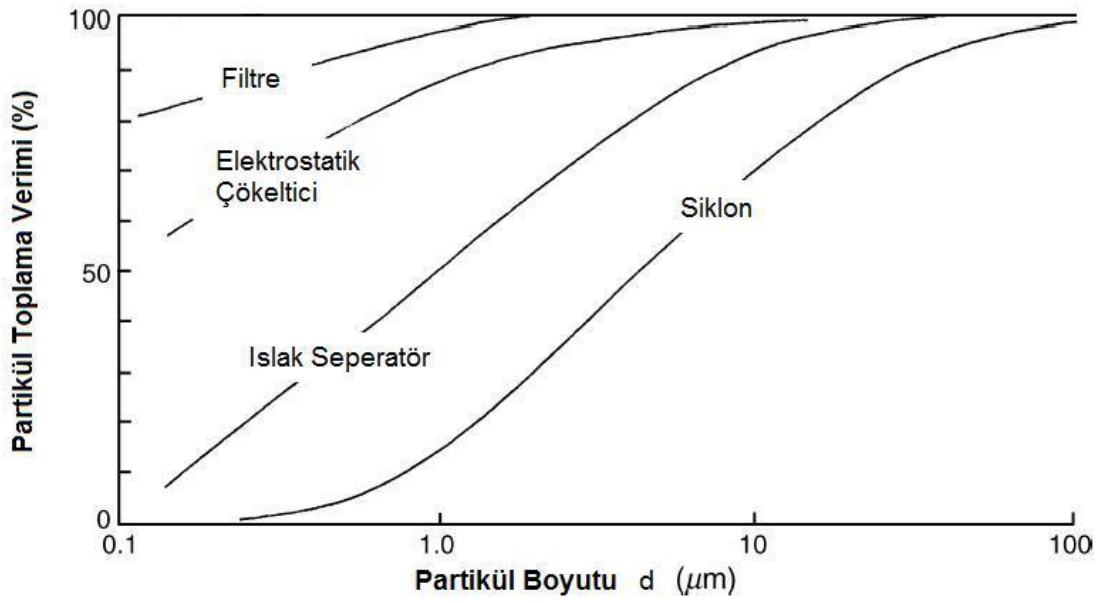
Pratikte hız sınımlarından ve partikül-partikül etkileşimlerinden dolayı d_{kritik} den büyük partiküllerin kaçırılabilceği gibi d_{kritik} den daha küçük partiküller tutulabilir ve gerçek verim eğrisi Şeki 1.4' deki gibi oluşur.



Şekil 1.4: Teorik ve Gerçekleşen Partikül Ayrırma Verimi.

KAYNAK: RHODES, M. 2008. Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons Ltd., England, 450 p.

Bir çok uygulamada farklı büyüklükteki partiküllerin ayrılması için değişik metotlar kullanılır. Genellikle 100 mikrondan büyük partiküllerin havadan ayrılması yerçekimi etkisinden dolayı daha kolaydır. 10 mikronun altındaki partiküllerin ayrılması için daha fazla enerji gerekir ve bunun için filtre, elektrostatik çöktelci gibi yöntemler kullanılır. Şekil 1.5’ de farklı yöntemlerin partikül toplama verimleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.5: Çeşitli Partikül Ayırma Yöntemlerinin Verimleri.

KAYNAK: RHODES, M. 2008. Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons Ltd., England, 450 p.

Siklon seperatörler 10 mikrondan küçük partiküllerin ayrılmasında çok uygun bir yöntem olmamakla beraber endüstride filtre ve elektrostatik çöktelci öncesi kullanılarak büyük partiküllerin ayrılması sağlanır.

2. MATERYAL YÖNTEM

Momentum, ısı ve kütle transferi proseslerini tanımlamak için kullanılan denklemler Navier-Stokes denklemleri olarak bilinirler. Bu kısmi diferansiyel denklemler 19.YY başlarında türetilmiş ve analitik olarak çözülememiştir. Fakat nümerik olarak çözülebilmektedir. Günümüzde ise bu denklemlerin çözümü bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak paket programlar yardımıyla yapılabilmektedir.

2.1. Korunum Denklemleri

Siklon içerisindeki akış türbülanslıdır. Akışın türbülanslı olup olmadığı Reynolds sayısına bakılarak kontrol edilir. Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin vizkoz kuvvetlere oranıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (2.1)$$

Denkelem 2.1' de ρ akışkanın yoğunluğu, D karakteristik çap, v karakteristik hız ve μ 'de akışkanın dinamik vizkozitesidir. Akışkan hava ve yoğunluğu 1.29 kg/m^3 ve vizkozitesi de $1.75E-5 \text{ kg/ms}$ dir. Karakteristik çap D ise siklon çapıdır ve bu çalışmada 0.305 m. 'dir. Hesaplamalarda giriş hızı 5.1 'den 25 m/s 'ye kadar farklı hızlarda alınmıştır. Bu aralıkta Re sayısı hesaplandığı zaman $114000 - 560000$ arasında Re değeri elde edilir. Boru içi akışlarda türbülans yaklaşık olarak $Re=2300$ değerinden sonra başlar (Schlichting 1979). Bu sonuca göre akış türbülanslıdır.

Ayrıca akışkan hızı çok yüksek olmadığı için sıkıştırılamazdır. Süreklilik denklemi, kartezyen koordinatlarda sürekli rejim ve sıkıştırılamaz akış için aşağıdaki şekilde yazılabilir (Wilcox 1994).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

Denklem 2.2' ye göre u_i hız bileşenlerini, x_i ise $i=1,2,3$ olmak üzere 3 yönde koordinatları göstermektedir. Momentum denklemi aynı şekilde sürekli rejim ve sıkıştırılmaz akış için kartezyen koordinatlarda aşağıdaki şekilde yazılabilir (Wilcox 1994).

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3' de p basınç ve t_{ij} viskoz gerilme tensörüdür ve t_{ij} aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$t_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4' de μ moleküler viskozite ve S_{ij} uzama oranı tensörüdür.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

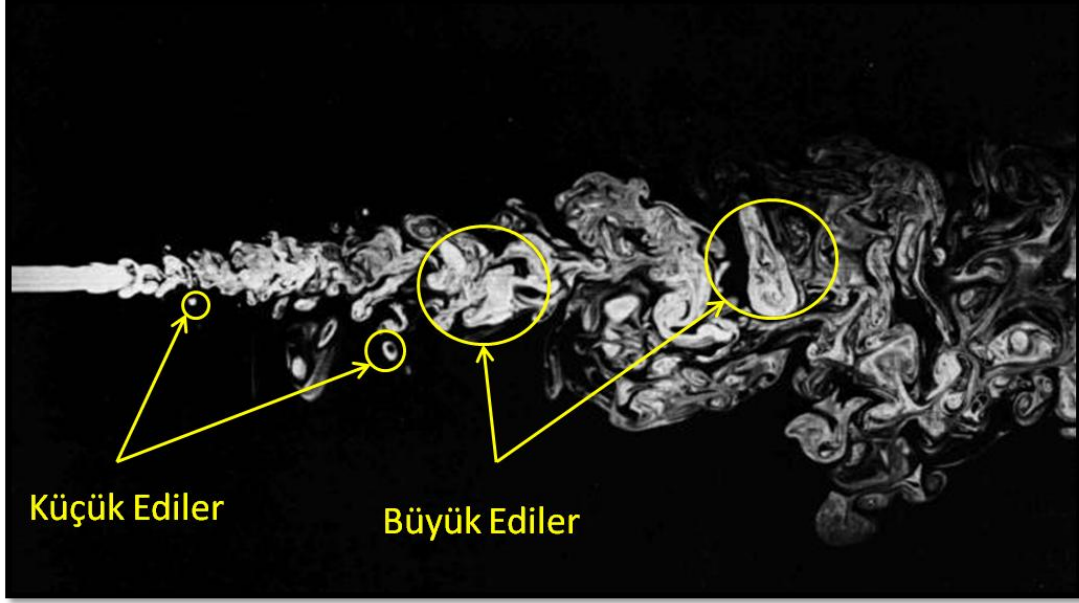
2.2. Türbülans ve Reynolds Stres Türbülans Modeli

Türbülans, akışkanının hareket halinde iken zamana ve konuma göre düzensizliğidir. Doğada bir çok akış türbülanslıdır. Kümüls bulutları, dünya atmosferinin sınır tabakası, okyanus altındaki akışlar, örneğin Gulf Stream akıntısı türbülanslıdır. Bununla beraber bir uçak kanadı etrafındaki akış ve bir çok yanma prosesi türbülanslıdır. Türbülans akışkanın bir özelliği değildir, akışın bir özelliğidir (Tennekes 1972). Türbülansı karakterize eden faktörler aşağıda verilmiştir.

- Düzensizlik: Türbülanslı akış, zamana bağlıdır, hız ve basınç gibi özellikler zamana bağlı olarak rasgele değişirler.
- Diffüsiv: Türbülanslı akışta laminer akışa göre daha güçlü karışım etkileri söz konusudur, türbülans ısı transferi ve kütle transferini artırır.
- Dissapativ: Türbülanslı akış her zaman dissapativdir. Viskoz kayma gerilmeleri deformasyon ile beraber akışkanın iç enerjisini artırarak türbülans kinetik enerjisine dönüşür.
- 3 boyutlu: Türbülanslı akış 3 boyutludur.
- Vortisler: Türbülanslı akış dönümlüdür ve bir çok vortis içerir. Vorteks stretching mekanizması türbülans yoğunluğunu artırır.

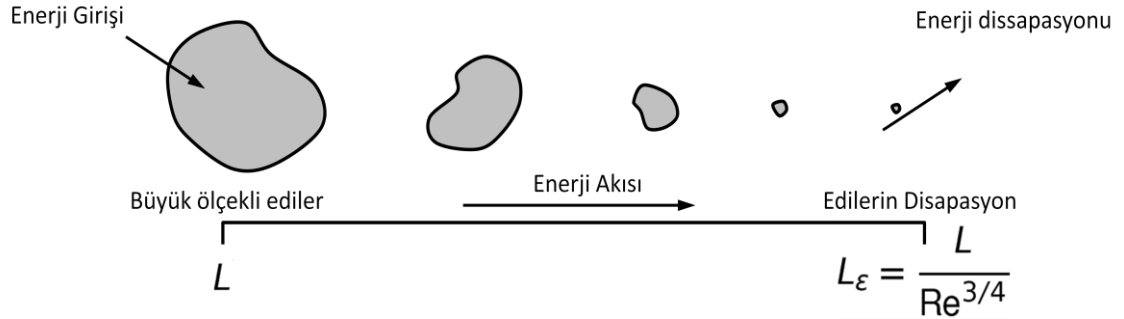
Türbülanslı akışta büyük edilerin oluşumu ve disapasyona uğraması enerji kaskadı ile ilk defa Richardson (1927) tarafından açıklanmıştır. Buna göre akış, hızın artması, çevresel şartlar ve akıştaki tedirginliklerden dolayı türbülanslı akışa geçmeye başlar. Geçiş esnasında ilk önce türbülans spotları oluşur. Daha sonra bu spotlar büyüyerek artar ve birleşerek türbülans edilerini oluşturur. Şekil 2.1' de türbülans edileri görülmektedir. Büyük ediler, yüksek enerji taşır ve vorteks stretching mekanizması ile enerjilerini küçük edilere transfer ederek kaybolurlar. Küçük ediler ise viskoz disapasyon ile kinetik enerjiyi termal enerjiye çevirerek kaybolurlar. Fakat enerji kaskadı (Şekil 2.2), disapasyona uğrayan en küçük edinin

büyüklüğü hakkında bilgi vermez. Ayrıca edî büyüklüğünün, hız ve zaman ile nasıl değiştiğini de söylemez. Re sayısı bu karakteristikleri anlamak için tek başına yeterli değildir. Kolmogorov teorisi (1941a, b), enerji kaskadında cevapsız kalan bu sorulara yanıt verir.



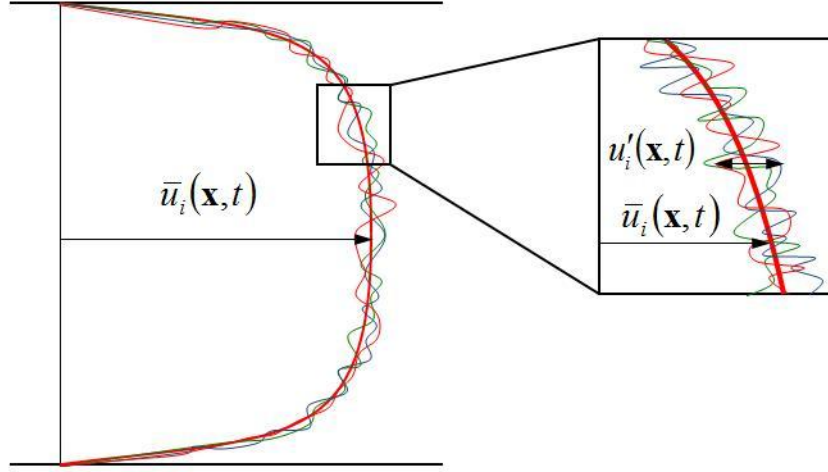
Şekil 2.1: Türbülanslı Akışta Ediler.

KAYNAK: DYKE, M. VAN. 1982. An Album of Fluid Motion. The Parabolic Press, 177 p.



Şekil 2.2: Enerji Kaskadı

KAYNAK: RICHARDSON, L.F. 1927. The Deffered Approach to the Limit, Transactions of the Royal Society of London, Series A, 226: 229-361.



Şekil 2.4: Hız Profili Üzerinde Ortalama ve Salınım Hızları.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

Buna göre anlık hız u_i , ortalama hız ve salınım bileşenleri cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) + u'_i(x, t) \quad (2.6)$$

$$\bar{u}_i = U_i \quad (2.7)$$

ve

$$\bar{p}_i = P_i \quad (2.8)$$

olarak gösterilirse zaman ortalaması alınmış süreklilik ve momentum denklemleri aşağıdaki gibidir (Wilcox 1994).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.9)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (2.10)$$

Denklem 2.10' da U_i , U_j , P ve S_{ji} i ve j yönündeki hız bileşenlerinin ortama değerleridir. $-\rho \overline{u'_j u'_i}$ Reynolds gerilmeleri tensörüdür (Wilcox 1994) ve τ_{ij} şeklinde gösterilir.

Reynolds gerilmeleri ile yeni eklenen 6 bilinmeyen terimin bilinen nicelikler ile ifade edilerek denklemlerin kapatılması gerekir. Bunun için iki yöntem kullanılır.

- Edi Viskozite Modeller (Bossinesq Hipotezi)
- Reynolds Stres Modeller

Daha önceki araştırmacılar (Boysan ve ark. 1982, Ayers ve ark. 1985, Hoekstra ve ark. 1999, Slack ve ark. 2000) yaptıkları çalışmalarda Reynolds Stres modellerin siklon içerisindeki akışı çözmeye Edi viskozite modellere göre daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada da türbülans modeli olarak Reynolds Stres Türbülans Modeli kullanılmıştır (Launder,Reece ve Rodi, 1975).

Reynolds gerilme modeli (RSM), Reynolds gerilmelerinin $(-\rho \overline{u'_j u'_i})$ doğrudan transport denklemlerinin çözülmesi esasına dayanır (Gibson ve Launder 1978, Launder 1989a,b). Bu denklemler bazı kabuller altında momentum denklemlerinin salınım büyüklüğü ile çarpılması ve Reynolds ortalamasının alınması ile elde edilirler. Kaldırma kuvvetlerinin etkisi ihmal edildiğinde Reynolds Stres transport denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$C_{ij} = P_{ij} + D_{T,ij} + D_{L,ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'de verilen bileşenler sırasıyla,

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.12)$$

Türbülans gerilmeleri üretimi P_{ij} ,

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (2.13)$$

Türbülans difüzyon terimi $D_{T,ij}$,

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)} \right] \quad (2.14)$$

Moleküler difüzyon terimi $D_{L,ij}$,

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] \quad (2.15)$$

Basınç-uzama terimi Φ_{ij} ,

$$\Phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x'_i} \right) \quad (2.16)$$

Dissapasyon terimi ε_{ij} ,

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (2.17)$$

Bu terimlerden $D_{T,ij}$, Φ_{ij} ve ε_{ij} terimleri yeni ve bilinmeyen korelasyonlar içermekte olup hesaplanabilmeleri için modellenmeleri gerekmektedir. Genelleştirilmiş gradient difüzyon hipotezinin basitleştirilmiş formu kullanılarak türbülans gerilmelerinden kaynaklanan üretim terimi,

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k} \right) \quad (2.18)$$

şeklinde modellenebilir (Lien ve Leschziner 1994). Lineer yaklaşım kullanılırsa basınç-uzama terimi üç bileşenin toplamı şeklinde yazılabilir. Bu bileşenler yavaş ve hızlı basınç-uzama bileşenleri ile cidar etkisini ifade eden $\Phi_{ij,w}$ bileşenidir (Gibson ve Launder 1978, Launder 1989a,b). Buna göre basınç-uzama terimi;

$$\Phi_{ij} = -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left[\left(P_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \overline{u'_i u'_j}) \right) - \frac{1}{3} \left(P_{kk} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \overline{u'_k u'_k}) \right) \delta_{ij} \right] + \Phi_{ij,w} \quad (2.19)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 2.19' da $C_1=1.8$ ve $C_2=0.6$ alınmıştır. Cidara dik olan normal gerilmeleri sönmülerken kayma gerilmelerini artıran $\Phi_{ij,w}$ teriminin heabı ile ilgili bilgi literatürde verilmiştir (Fluent 2009).

Disapasyon terimi ise sıkıştırılabilirlik ihmal edilerek;

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \quad (2.20)$$

alınmıştır. Bu denklemlerde geçen türbülans kinetik enerjisi $k = \frac{\overline{u_i u_j}}{2}$ ifadesinden bulunabilir.

2.3. Çok Fazlı Akışlar

Birden fazla akışkan aynı ortamda beraber hareket ederken birbirleri ile karışabilir yada ayrılabilir. Ayrılmaya etki eden yerçekimi kuvveti ve santrifüj kuvvetler ancak çok fazlı akış modelleri kullanıldığı zaman incelenebilir. Çok fazlı akışlarda her akışkan kendi fiziksel özellikleri ile temsil edilir. Bugün günümüzde ticari HAD yazılımlarında da kullanılan 5 tip çok fazlı modelden bahsedebiliriz.

2.3.1. VOF model

Volume of Fluid'in baş harfleri olan VOF, birbirleri ile karışmayan akışkanları analiz etmede kullanılır. Bu modelde akışkanlar birbirleri ile karışmaz ve çözüm ağında bir hücre tamamen tek bir akışkan ile doludur. Böylece akışkanlar arasında bir serbest yüzey bölgesi vardır. VOF model serbest yüzey akışlarında ve büyük kabarcık kolonunda kullanılır.

2.3.2. Eulerian model

Eulerian çok fazlı akış modeli birbirine karışan en az iki akışkanın analizinde kullanılır. Akışkan gaz, sıvı ve katı fazlarda olabilir. Eulerian çok fazlı akış modeli için akışkanın karışım içerisindeki hacimsel kesri için herhangi bir kısıt yoktur. Bu modelde her bir akışkan için kütle korunumu ve momentum denklemleri ayrı ayrı çözülür. Fazlar arasındaki momentum transferi momentum denklemleri ile çözülürken, kütle ve ısı transferinin çözümü için süreklilik ve enerji denklemleri kullanılır. Tüm akışkanlar için tek bir basınç alanı çözülür. Ayrıca türbülans denklemleri her bir faz için ayrı ayrı çözülür.

2.3.3. Eulerian Granular model

Bu modelde birincil faz gaz yada sıvı, ikincil faz katı partiküllerden oluşuyor ise bu durumda Eulerian modelin modifiye edilmiş bir formu olan Eulerian-Granular model kullanılır. Eulerian-Granular modeli granül yada partikül davranışını modellemek için kinetik teoriyi kullanır. Özellikle granül fazın viskozitesi, granüllerin durağandan akışkan ile hareket etmesi esnasında değişim gösterir ve bu ancak Eulerian-Granular modeli ile analiz edilebilir. Eulerian-Granular modeli akışkan yatak modellenmesinde uygulanır.

2.3.4. Karışım modeli

Karışım modeli, birbirleri ile karışan akışkanların olduğu durumlarda tercih edilmelidir. N tane akışkan yada partikül için momentum, süreklilik ve enerji denklemi çözülür, hacimsel kesir denklemleri ikincil faz için çözülür. Tipik uygulamaları sedimentasyon, siklon ayırıcılar ve kabarcık akışının modellenmesidir.

2.3.5. Ayrık faz modeli (Discrete phase model)

Ayrık faz modeli sürekli fazı çözmek için Navier-Stokes denklemlerini kullanırken, ayrık faz için ise Lagrangian partikül izleme metodunu kullanır. Sürekli faz ve ayrık faz arasındaki ısı, kütle ve momentum değişimi bu yöntemle hesaplanabilir. Sıvı içerisinde gaz kabarcıklarının yükselmesi, kumun akışkan içerisindeki dağılımı, su taneciklerinin buharlaşması ve kaynaması bu modellerle çözülebilecek örneklerdir. Ayrıca kömür ve sıvı yakıtın yanması da bu modelin kullanıldığı diğer örneklerdir. Ayrık faz modeli partikül yada ayrık fazın hacimsel kesri sürekli akışkanın %10'unu geçmiyorsa tercih edilmelidir.

Ayrık faz modeli, bir partikül üzerine gelen kuvvetler dengesinin integrasyonu ile partikülün yörüngesinin tahmin edilmesi esasına dayanır. Ayrık faz modeli lagrangian

koordinat takımında çözülür. Tek bir partikül üzerine gelen kuvvetler dengesi x-doğrultusunda ve kartezyen koordinatta aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2.21)$$

Denklem 2.21' de F_x ilave ivmelenmeyi, $F_D(u - u_p)$ ise birim partikül kütlesinin sürüklenme terimidir. F_D sürüklenme kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (2.22)$$

Denklem 2.22' de u akışkan hızını, u_p partikül hızını, μ akışkanın moleküler viskozitesini, ρ akışkan yoğunluğunu, ρ_p partikül yoğunluğunu, d_p partikül çapını göstermektedir.

Re rölatif Reynolds sayısıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (2.23)$$

Sürüklenme katsayısı (C_D) küresel partikül için;

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 2.24' de a_1 , a_2 ve a_3 sabitleri Re sayısına göre farklı değerler alır (Morsi ve Alexander 1972, Fluent 2009).

2.3.5.1. Türbülanslı akışta partikül saçılması

Akışkan ortamında partiküllerin türbülansın etkisi ile saçılması stokastik izleme yöntemi ile tahmin edilebilmektedir. Stokastik izleme yada diğer adı ile ayrık rasgele yürüme (DRW) anlık türbülans hız salınımlarının partikül yörüngesi üzerine olan etkisini içermektedir.

2.3.5.2. Stokastik izleme (DRW)

Türbülanslı akışta Fluent, ortalama akışkan hızını kullanarak partikül yörüngesini tahmin edebilmektedir. Buna ilave olarak denklem 2.24' te u hızı yerine $u = \bar{u} + u'$ yazarak türbülans hız salınımlarının etkisi de hesaba katılarak türbülans kaynaklı partikül saçılması hesaplanabilir. Stokastik izleme yönteminde partikül saçılması, anlık akışkan hızını kullanarak her bir partikülün yörüngesi boyunca yörünge denkleminin integre edilmesi ile tahmin edilir. Yörünge tahmin edilebilmesi için yeterli miktarda partikülün akış ortamına gönderilmesi gerekir ki böylece türbülansın partikül saçılması üzerine olan rasgele etkisi hesaba katılabilsin. Partikül saçılmasının tahmini için bir zaman ölçeği (T) boyunca hesaplamalar yapılmalıdır. Burada T , bir partikülün yörüngesi boyunca türbülanslı akış ortamında geçirdiği zaman olarak düşünülebilir. Partikül yörüngesi ds ise;

$$T = \int_0^{\infty} \frac{u'_p(t)u'_p(t+s)}{u_p'^2} ds \quad (2.25)$$

Bir akışta çok fazla türbülans hareketi olduğundan integrasyon zamanı partikül dağılım oranı ile orantılıdır. Partiküller için yayılım oranı $\overline{u'_i u'_j} T$ şeklinde yazılabilir. Akışkan

ile birlikte hareket eden küçük partiküller (sürüklenme hızı sıfır) için integral zamanı, Lagrangian integral zamanına dönüşür ve bu zaman ölçeği aşağıdaki şekilde ifade edilir.

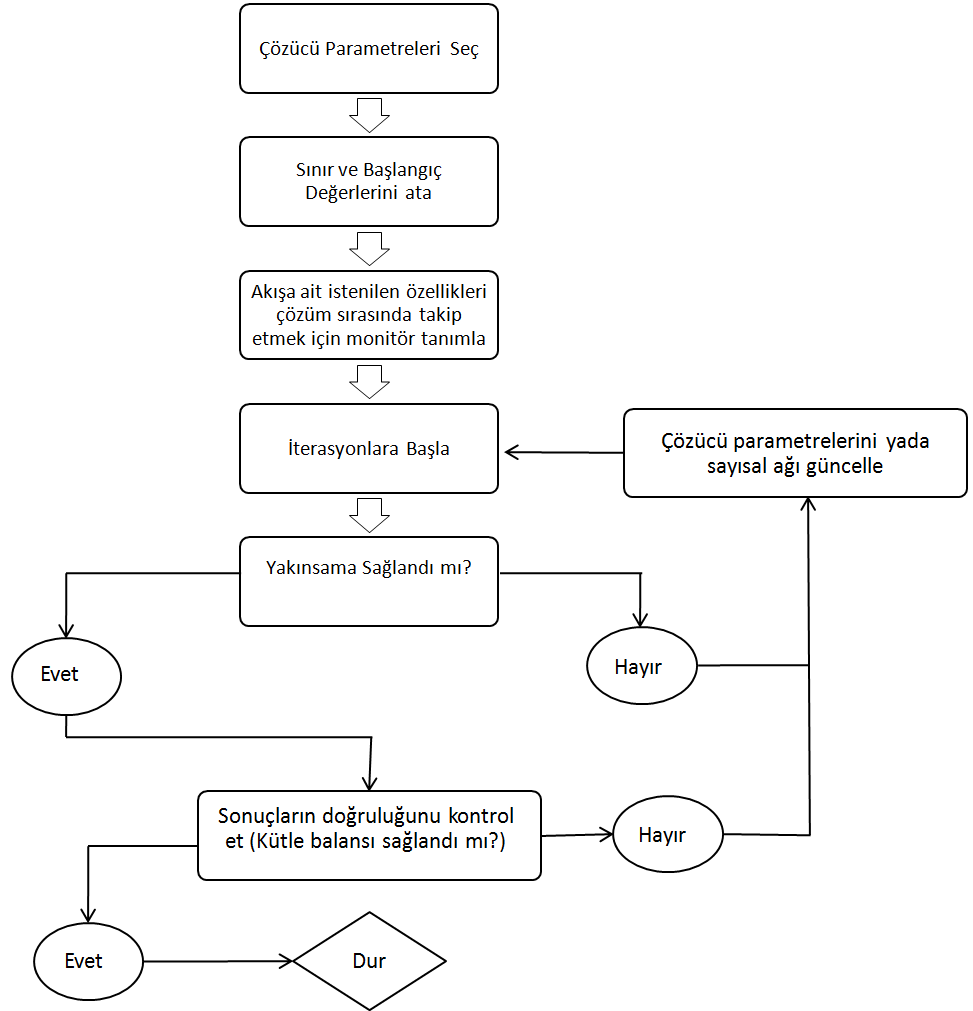
$$T_L = C_L \frac{k}{\epsilon} \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'da C_L kullanılan türbülans modeline göre 0.15-0.3 arasında seçilebilen bir sabittir.

2.4. Fluent ile Sayısal Çözüm

2.4.1. Giriş

Korunum denklemlerinin sayısal çözümü için sonlu hacimler yöntemini kullanan FLUENT v12 yazılımı kullanılmıştır. Fluent, ticari olarak da kullanılabilen bir HAD yazılımıdır. Bir problemin HAD yöntemi ile ele alınmasında aşağıdaki işlem adımları takip edilmelidir.

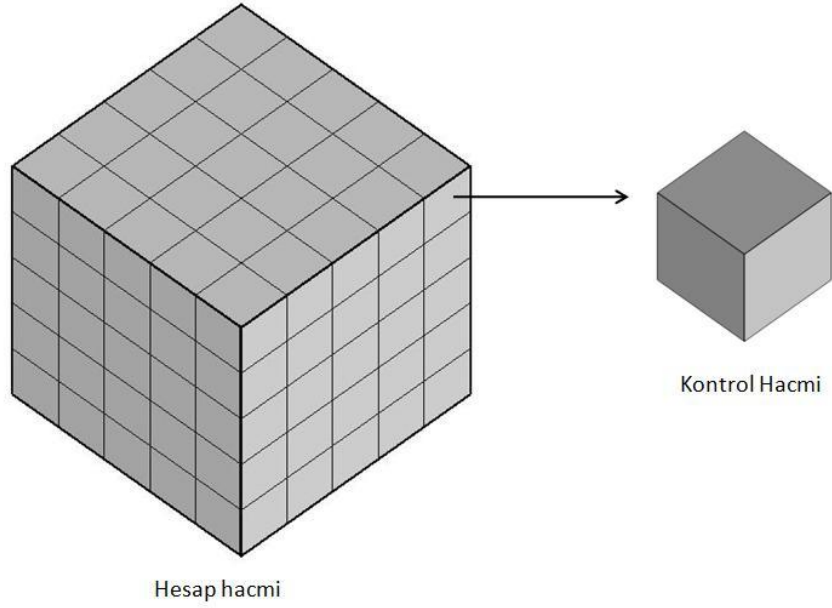


Şekil 2.5: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Çözüm Adımları.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

2.4.2. Sonlu hacimler yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerinin küçük hücrelere bölünmüş kontrol hacimleri üzerinden integre edilerek cebirsel denklemlere ayrıştırılması ile çözülmesi yöntemidir. Sonlu hacimler yöntemi ilk defa McDonald (1971) ve MacCormack ve Paullay (1972) gibi araştırmacılar tarafından Euler denklemlerinin 2 boyutlu ve zamana bağlı olarak çözülmesi ile kullanılmış, daha sonra Rizzi ve Inouye (1973) tarafından 3 boyutlu çözüm gerçekleştirilmiştir.



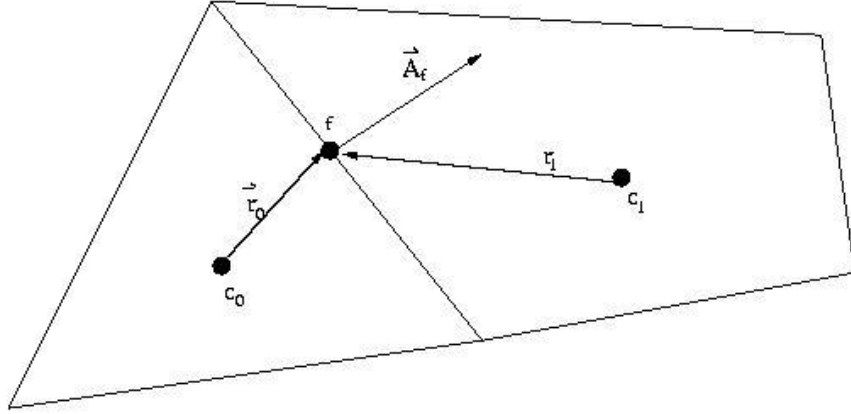
Şekil 2.6: Hesap Hacmi Üzerinden Bir Kontrol Hacminin Gösterimi.

Bu yöntemde akışın çözüleceği alan sonlu sayıda kontrol hacimlerine bölünür (Şekil 2.6). Daha sonra korunum denklemleri (kütle, momentum) cebirsel denklemlere ayrıştırılır. Ayrıştırılmış denklemler sayısal yöntem ile çözülür.

İntegral korunum denklemleri, bir ϕ skaları ve herhangi bir V kontrol hacmi için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_S \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \int_S \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.27)$$

Denklem 2.27' de ρ yoğunluk, \vec{v} hız vektörü, \vec{A} yüzey alan vektörü, Γ_ϕ , ϕ ' nin difüzyon katsayısı, $\nabla \phi$, ϕ ' nin gradyanı, S_ϕ ise her bir ϕ kontrol hacmi için kaynak terimidir.



Şekil 2.7: Kontrol Hacmi.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi hasep alanı, birden fazla kontrol hacmine bölünmektedir.

Denklem 2.27 her bir kontrol hacmi için uygulanırsa ϕ skaları ve V kontrol hacmi için transport denklemi aşağıdaki şekilde ayrık formda yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \rho \phi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (2.28)$$

Şekil 2.7' de görüldüğü gibi, N hesaplanan kontrol hacmi üzerindeki yüzey sayısı, ϕ_f f yüzeyinden olan konveksiyon terimi, $\rho \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ f yüzeyinden olan kütle akısı, \vec{A}_f yüzey alanı, $\nabla \phi_f$ ise f yüzeyi ve V kontrol hacmi için ϕ 'nin gradyanıdır. ϕ skaları için ayrık değerler hücre merkezlerinde tutulur (c_0 ve c_1). Her bir hücredeki ϕ 'nin bulunabilmesi için ϕ_f konvektif teriminin çözülmesi gereklidir. Buda uygun bir ayrıklaştırma şeması kullanılarak yapılabilir. Ayrık formda yazılmış transport denklemi (2.28) her bir hücre merkezinde ve hücreyi çevreleyen diğer hücrelerin merkezinde bilinmeyen ϕ skaları içerir. Bu lineer olmayan (2.28) denklemi aşağıdaki gibi lineerleştirilmiş formda yazılabilir.

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.29)$$

Denklem 2.29' da nb, komşu hücreyi, a_p ve a_{nb} lineer katsayıları ve b ise kaynak terimi göstermektedir (Patankar 1980). Komşu hücre sayısı grid yapısına bağlıdır, fakat tipik olarak bir hücreyi çevreleyen yüzey sayısı aynı zamanda komşu hücre sayısına eşittir. Benzer eşitlikler griddeki her bir hücre içinde yazılır. Daha sonra bu şekilde oluşturulan katsayılar matrisi Fluent tarafından Gauss-Seidel yöntemi kullanılarak çözülür.

2.4.3. Çözücü seçenekleri

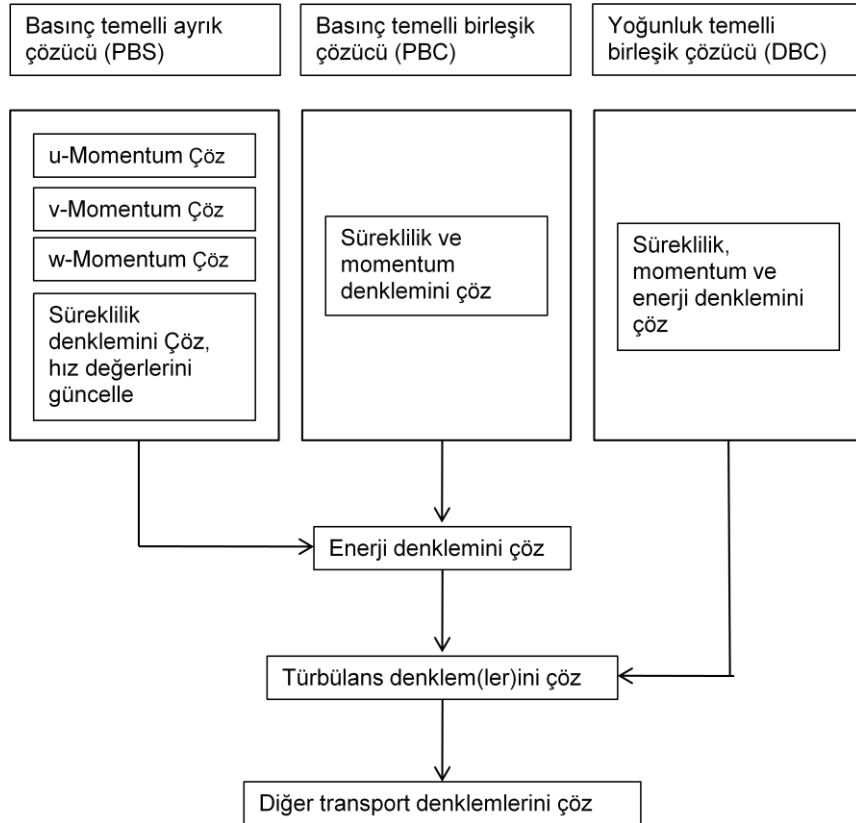
Fluent içerisinde iki adet çözücü seçeneği vardır.

- Basınç temeline dayanan çözücü (Pressure based solver, PB)
- Yoğunluk temeline dayanan çözücü (Density based solver, DB)

Basınç temelli çözücünde momentum ve basınç birincil değişkenler olarak ele alınır. Basınç ve hız alanı hesaplandıktan sonra sırasıyla enerji, türbülans ve varsa diğer transport denklemleri çözülür. Yoğunluk temelli çözücünde ise basınç, momentum ve enerji birincil öncelikli ele alınır ve aynı anda çözülür. Daha sonra türbülans ve varsa diğer transport denklemleri çözülür. Ayrıca PBS' da kendi içerisinde iki farklı şekilde ele alınıp çözülebilir.

- Basınç temelli beraber çözüm (Pressure based coupled solver, PBC)
- Basınç temelli ayırık çözüm (Pressure based segregated solver, PBS)

Şekil 2.8' de çözücü adımları detaylı olarak görülmektedir.



Şekil 2.8: Basınç Temelli ve Yoğunluk Temelli Çözümde Denklemlerin Çözüm Sırası.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

PBS çözücüsü, düşük hızlı sıkıştırılmaz akış rejimlerinden yüksek hızlı sıkıştırılabilir akış rejimleri gibi geniş bir alanda kullanılabilir (Fluent 2009). Ayrıca hafıza gereksinimi azdır. PBC çözücü tef fazlı akışlarda tercih edilirken hafıza gereksinimi PBS' ye göre 1.5-2 kat daha fazladır. Ayrıca çok fazlı akışlarda (Eulerian) kullanılamaz. Yoğunluk tabanlı (DB) solver ise yoğunluk, momentum ve enerji arasında güçlü bir etkileşim varsa tercih edilmelidir. Örneğin sıkıştırılabilir akış ile yanma beraber çözülmek istenirse bu yöntem seçilmelidir.

Bu çalışmada daha az memory gereksinimi ve geniş bir alanda kullanımından dolayı PBS çözücüsü kullanılmıştır.

2.4.4. Ayrıklaştırma (Interpolasyon metodları)

Hücre merkezlerinde tutulan değişkenler kontrol hacimlerinin yüzeylerine interpolate edilmesi gerekir.

$\sum_f^{N_{yüzey}} \rho \phi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ konveksiyon terimi için kullanılacak interpolasyon şemaları aşağıda verilmiştir.

2.4.4.1. Birinci derece upwind yöntemi

Bu yöntem, hesaplanan değişkenin hücrenin merkezindeki değerini ortalama değer olarak kabul ederek hücrenin diğer noktalarında da bu değeri kullanır. Yakınsaması çok hızlı olan bu yöntemin hassasiyeti iyi değildir. Siklon gibi girdaplı bir akışın olduğu uygulamalarda tatminkar sonuç vermez. Fakat analizlere birinci derece upwind yöntemiyle başlayarak iyi bir başlangıç şartı oluşturulur. Daha sonra yüksek dereceli yöntemleri

kullanarak yakınsak ve hassas sonuçlar elde edilir. Bu çalışmada birinci derece upwind yöntemi analizler için başlangıç şartı oluşturmak için kullanılmıştır.

2.4.4.2. İkinci derece upwind yöntemi

2.dereceden hassasiyet istendiği zaman bu yöntem tercih edilebilir. Bu yöntemde hesaplanan değişken hücre boyunca sabit alınmaz, hücre yüzey değerleri kullanılır. Yüzeydeki ϕ değişkeninin hesabı için denklem 2.30 kullanılır.

$$\phi_{f,sou} = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r} \quad (2.30)$$

Burada; ϕ hücre merkezindeki değer, $\nabla\phi$ ise hücre merkezindeki değer gradienti, \vec{r} ise yerdeğiştirme vektörüdür.

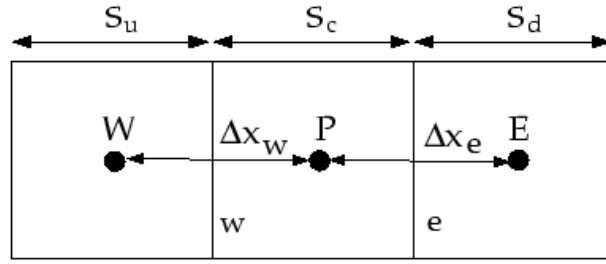
Bu yöntem genelde üçgensel elemanlar kullanıldığı zaman tercih edilmelidir.

2.4.4.3. QUICK yöntemi

Bu yöntemde değişken, ikinci derece upwind yönteminin ağırlıklı ortalaması ve değişkenin merkezi interpolasyonu kullanılarak hesaplanır.

Şekil 2.9' a göre "e" yüzeyi için herhangi bir değişkenin değeri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c+S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c+S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u+2S_c}{S_u+S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u+S_c} \phi_W \right] \quad (2.31)$$



Şekil 2.9: QUICK Yöntemi.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

Denklem 2.31' e göre $\theta=1$ iken merkezi ikinci derece interpolasyonu, $\theta = 0$ iken ise ikinci mertebe upwind değeri elde edilmiş olur. Geleneksel olarak bilinene QUICK yönteminde $\theta = 1/8$ iken Fluent çözüme bağlı olarak θ değerini sürekli olarak analiz boyunca hesaplar.

QUICK yöntemi, siklon gibi girdaplı akışların olduğu uygulamalarda iyi sonuç vermektedir. Ayrıca kare ve kübik elemanların kullanıldığı grid yapılarında tercih edilir (Slack ve ark. 2000).

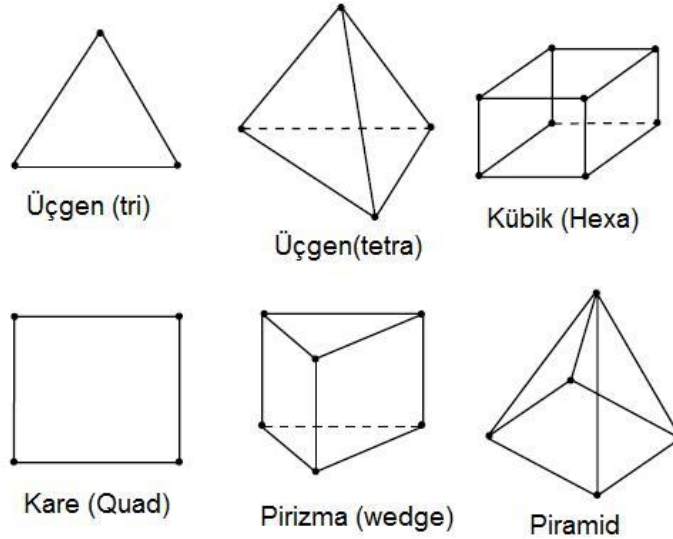
Bu çalışmada da nihai sonuçların elde edilmesinde QUICK yöntemi belirtilen avantajından dolayı tercih edilmiştir.

2.4.4.4. PRESTO (Pressure staggering option scheme) yöntemi

Presto algoritması, hücre civarında çapraz kontrol hacminde süreklilik dengesi oluşturarak, hücre merkez değerlerini kullanıp yüzeydeki basınç değerinin hesaplanmasını sağlar. Yüksek Reynolds sayılarında; basınç değerlerinin tahmin edilmesinde ve viskoz bölgelerde görülen yüksek basınç gradyanları sebebiyle hız profillerinin tahmin edilmesinde yüksek mertebeden upwind yöntemleri ile birlikte daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada girdaplı akışlar için uygun sonuçlar veren PRESTO yöntemi tercih edilmiştir.

2.5. Grid Oluşturma Yöntemi ve Grid Yapısı

Grid yada diğer bir ifade ile sayısal ağ, hesaplanacak kontrol hacminin bilinen geometrik elemanlara bölünmesi ile elde edilir. Bu sayede hesaplamalarda kullanılacak düğüm noktaları oluşturulmuş olur. Grid; kare, üçgen, kübik, prizma yada piramit şeklinde oluşturulabilir. Şekil 2.10' da sayısal ağ oluşturmada kullanılabilecek eleman tipleri görülmektedir.



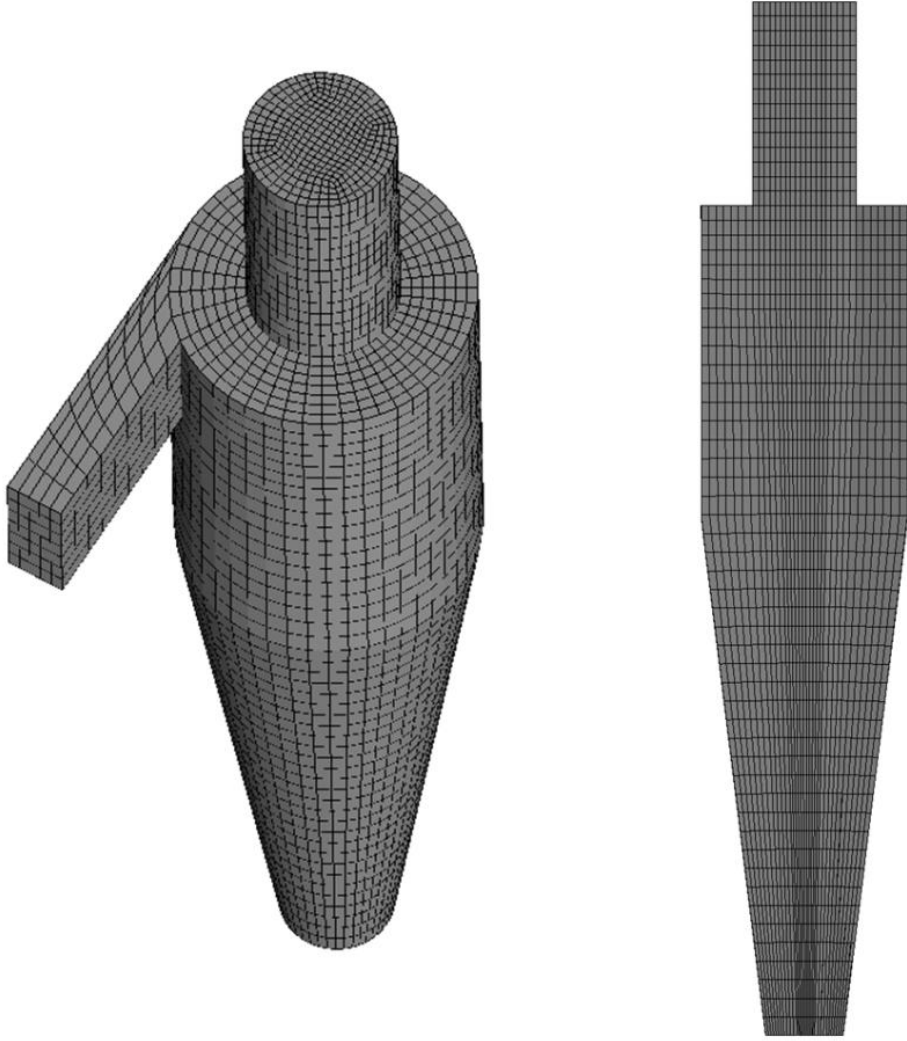
Şekil.2.10: Sayısal Ağ İçin Kullanılabilecek Eleman Tipleri.

Grid oluşturmak için kullanılacak çeşitli ticari yazılımlar mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan grid yapıları ICEM CFD v12 yazılımı ile oluşturulmuştur. Slack ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada Reynolds Stres model ve LES model için grid yapısının nasıl olması gerektiği ile ilgili bilgiler vermiştir. Buna göre RSTM model kullanılarak 40.000 civarı hücre sayısı ile siklon içerisindeki akış çözülebilmektedir. Burada önemli olan aksiyel, radyal ve teğetsel hızların doğru olarak çözülebilmesi, ayrıca basınç düşümünün de doğru olarak tahmin edilebilmesi için siklonun iç bölgesinde oluşan girdap hareketini çözebilecek bir grid yapısının oluşturulmasıdır.

Buna göre grid hazırlanırken dikkat edilmesi gerekenler

- Kübik elemanlar kullanılmalı,
- Çok uzun elemanlardan kaçınılmalı ve kullanılacak elemanlarda en-boy oranı 1:5'i geçmemeli,
- Merkezdeki girdabın çözülebilmesi için siklon merkez bölgesi diğer bölgelere göre daha fazla sayıda eleman içermeli,
- Duvarlarda sınır tabaka akışı çok kritik olmadığı için çok ince elemanlar kullanılmamalı,

Bu bilgiler dikkate alınarak oluşturulan grid yapısı Şekil 2.11' de görülmektedir.



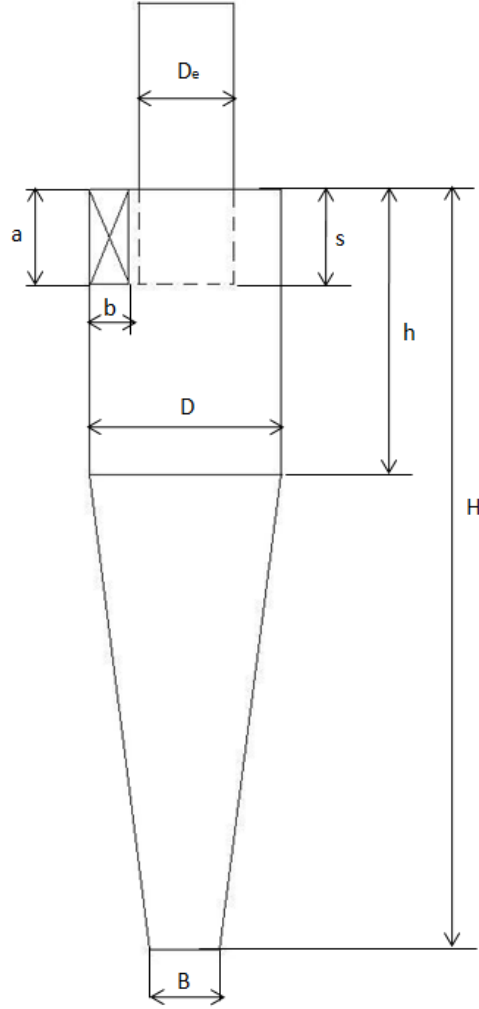
Şekil 2.11: Siklon İçin İdeal Bir Grid Yapısı.

2.6. Siklon Geometrisi

Bu çalışmada tipik bir Stairmand siklonu üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Stairmand siklonunda (Şekil 2.12) ölçüler siklon silindir çapı D ' ye bağlı olarak verilir. Çizelge 2.1' de Stairmand siklonundaki D ' ye bağlı oranlar verilmiştir.

Çizelge 2.1: Stairmand Siklon Boyutları.

Boyut	Boyut/D
Siklon çapı, D	1.0
Hava çıkış borusu çapı, D_e	0.5
Hava giriş kesiti yüksekliği, a	0.5
Hava giriş kesiti eni, b	0.2
Çıkış borusu dalma derinliği, S	0.5
Siklon yüksekliği, H	4
Silindir yüksekliği, h	1.5
Toz çıkış çapı, B	0.375

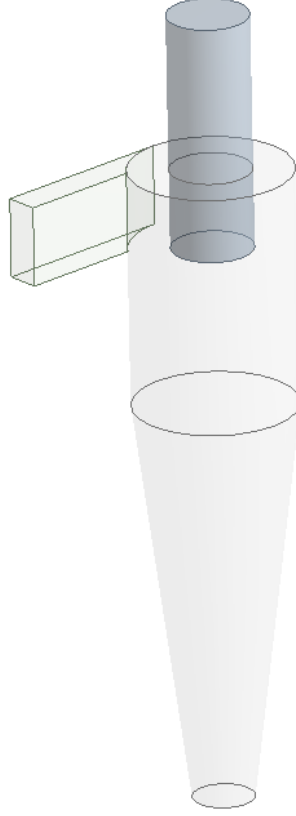


Şekil 2.12: Stairmand Siklonu.

CAD model ANSYS Workbench altında çalışan Design Modeler yazılımı ile çizilmiştir. Şekil 2.13’ de siklonun CAD modeli ve nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları Çizelge 2.2’ de görülmektedir.

Çizelge 2.2: Nümerik Çalışmada Kullanılan Siklon Boyutları (m).

a	b	s	h	H	D_e	B	D
0.152	0.061	0.152	0.457	1.22	0.152	0.114	0.305



Şekil 2.13: Siklonun CAD Modeli.

2.7. Akışkan Özellikleri ve Sınır Şartları

Tek fazlı akış analizleri için havanın Çizelge 2.3’ de verilen yoğunluk ve viskozite değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 2.3: Havanın Özellikleri.

	Dirgo ve Leith (1985)	Ayers (1983)
Yoğunluk [kg/m^3]	1.29	1.225
Viskozite [kg/ms]	1.75E-5	1.7894E-5

Hesaplamalar, giriş hızı 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s değerleri için yapılmıştır. Giriş hızı sabit ve üniform olarak tanımlanmıştır. Girişte türbülans sınır şartı olarak türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap alınmıştır. Türbülans yoğunluğu $I=0.05$ olarak kabul edilmiştir. Hidrolik çap ise aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$D_H = \frac{4A}{\zeta} \quad (2.32)$$

Denklem 2.32’de A giriş kesitinin alanı ve ζ ise giriş kesitinin çevresidir.

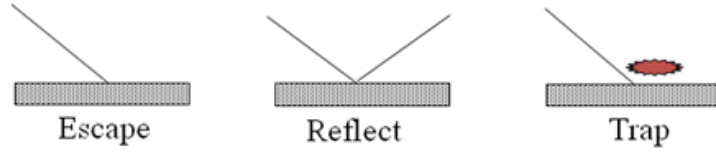
Çıkış şartı olarak “Outflow” sınır şartı tanımlanmıştır. Bu sınır şartı ile kütle dengesi sağlanacak şekilde tüm akış değişkenlerine ait difüzyon akıları sıfır alınmıştır. Cidarlarda kaymasız “Wall” sınır şartı kullanılmıştır. Bu duvarlarda hızın sıfır olduğu anlamına gelmektedir. Tek fazlı siklon analizlerinde kullanılan sınır şartlar Çizelge 2.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4: Sınır Şartları.

Sınır Şartı Tipi	Süreklilik ve Momentum Denklemi	Ayrık Faz Modeli
Inlet	Giriş Hızı [m/s]	
	Türbülans	Türbülans yoğunluğu
		Hidrolik Çap
Outflow	Çıkış Şartı	Escape (Kaçış)
Wall	Kaymasız duvar	Reflekt (Yansıtma)
Wall (Siklon dip çapı)	Kaymasız Duvar	Trap (Partikül tutma)

2.8. Partikül-Duvar Etkileşimi

Partikül-duvar etkileşimi için kullanılacak sınır şartlar Şekil 2.14’de verilmiştir.

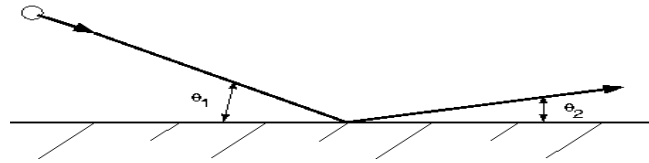


Şekil 2.14: Partikül-Duvar Etkileşimi.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide. 2009.

“Escape” sınır şartında partikül duvar içerisinden geçerek kaçabilir. Bu sınır şartı gazın girdiği ve çıktığı sınırlara uygulanır.

“Reflekt” sınır şartında Şekil 2.15’ de görüldüğü gibi Θ_1 açısı ile gelen partikül Θ_2 açısı ile duvardan yansıyor. Partikülün yansımaya şekli, partikülün yansımaya hızının normal ve teğetsel bileşenlerinin partikülün çarpma hızının normal ve teğetsel bileşenlerine bölünmesi ile elde edilir.



Şekil 2.15: Reflekt Duvarın Partikülü Yansıtma Açılı.

KAYNAK : ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide. 2009.

V_1 hızı ile gelen ve V_2 hızı ile yansıyan partikül için normal ve teğetsel komponentler aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\text{Normal komponent: } e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}}$$

$$\text{Teğetsel komponent: } e_t = \frac{v_{2,t}}{v_{1,t}}$$

Bu katsayıların 1 olması, partikülün tamamen elastik kabul edildiği anlamına gelmektedir. Bu çalışmada normal ve teğetsel komponent için katsayılar 1 alınmıştır.

Trap sınır şartında ise partikül çarptığı duvar tarafından tutulur. Siklon modelinde siklon dip çapı (toz kutusu girişi) “trap” olarak seçilmiştir.

2.9. Analiz Metodolojisi

Siklon içerisindeki akışın kompleks olması ve analizlerde yüksek hassasiyetli çözüm algoritmalarının kullanılması gerekliliğinden dolayı analizler bir adımda tamamlanmamıştır. Burada çözüme art arda yapılan analizler ile ulaşılmıştır. İlk önce siklon içerisindeki hız ve basınç alanlarının hesaplanması gerekmektedir. Kararlı bir analiz oluşturmak için çözüm algoritmaları Çizelge 2.5’ deki gibi seçilmelidir (Kaya ve Karagöz 2008).

Çizelge 2.5: Çözüm Algoritmalarının Kullanımı.

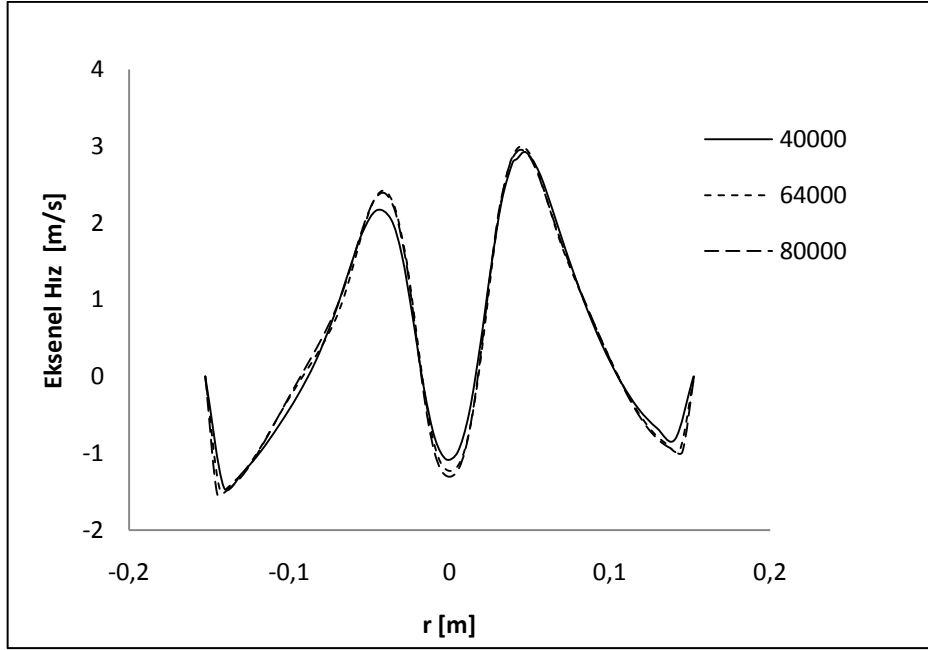
	1.Analiz	2.Analiz	3.Analiz
Basınç	Standart	Presto	Presto
Momentum	First Order	Second Order	Quick
Türbülans Kinetik Enerji	First Order	First Order	First Order
Türbülans Dissipasyon Oranı	First Order	First Order	First Order
Reynolds Stresler	First Order	First Order	First Order

Bu analizler tamamlandıktan sonra partikül toplama verimi hesabı için Fluent'in Modeller sekmesinden ayırık faz modeli (DPM) seçilmiştir. Açılan pencerede "Interaction with Continous Phase" aktif hale getirildikten sonra "Injections" butonu ile yeni bir enjeksiyon tanımlanmış ve inlet yüzeyinden üniform olarak istenilen çapta partiküller tanımlanmıştır. Partikül hızı havanın giriş hızı ile aynı seçilmiştir. Ayrıca "Turbulent Dispersion" sekmesinde "Stochastic Tracing" ile "Discrete Random Walk Model" seçilmiştir. Son olarak da sınır şartlarında duvar sınır şartları DPM için reflekt seçilerek yansıtma katsayıları 1 olarak alınmıştır. Siklonun dip kısmı olan ve toz kutusuna açılan yüzey partiküllerin tutulması için "trap" sınır şartı olarak seçilmiştir. Daha sonra "Graphics and Animations" altında "Particle Tracks" seçilerek "Trac" butonu ile siklon içerisine ne kadar partikül atıldığı ve atılan partiküllerin ne kadarının tutulduğu hesaplanmıştır. Bu verilerden yola çıkarak partikül toplama verimleri hesaplanmıştır.

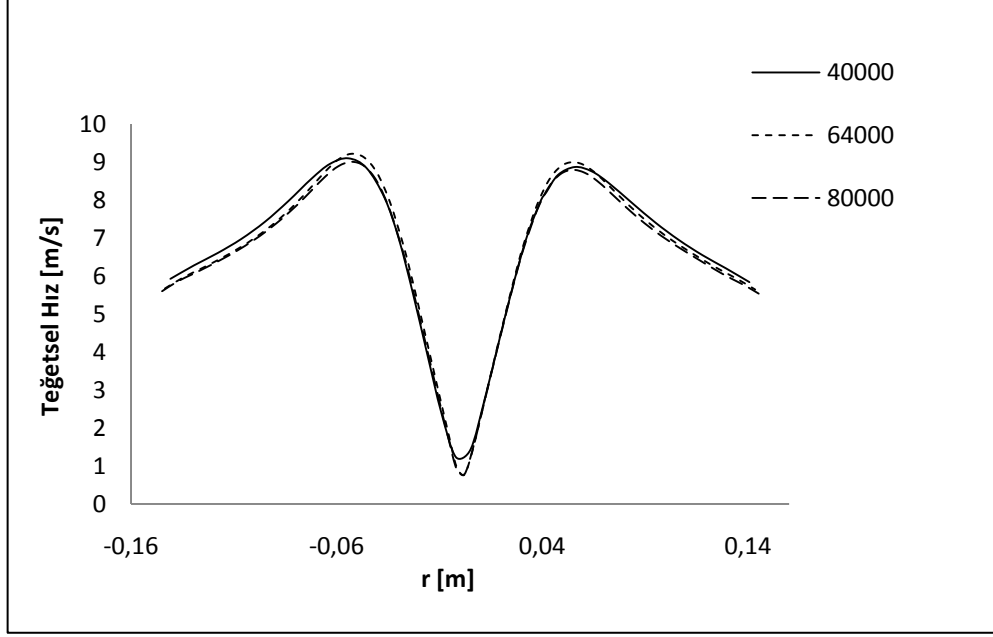
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

3.1. Grid Hassasiyet Analizleri

Gridden bağımsız sonuçlar elde etmek için $D=0.305$ m. çaplı stairmand siklonunda farklı eleman sayılarında analizler yapılmıştır. Analizler 40000, 64000 ve 80000 eleman sayılarında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi aksenal ve teğetsel hız profillerinin grid sayısı ile değişmediği görülmüştür. Bu nedenle analizlerin geri kalan kısmı 40000 eleman sayısı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1: Farklı Eleman Sayılarında Aksenal Hız Profillerinin Karşılaştırılması.

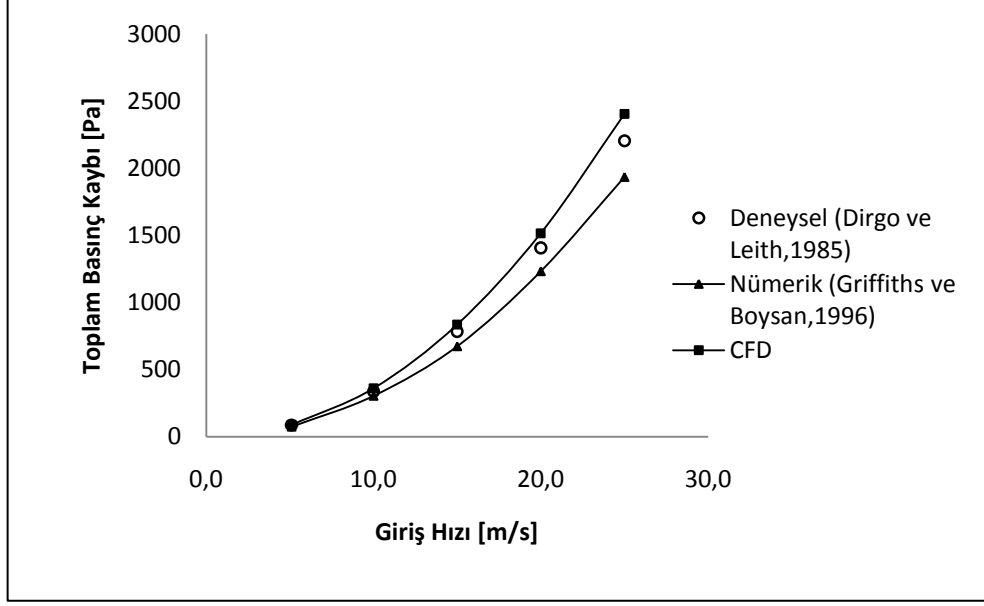


Şekil 3.2: Farklı Eleman Sayılarında Teğetsel Hız Profillerinin Karşılaştırılması

3.2. Tek Fazlı Akış Analizleri ile Yapılan Çalışmanın Doğrulanması

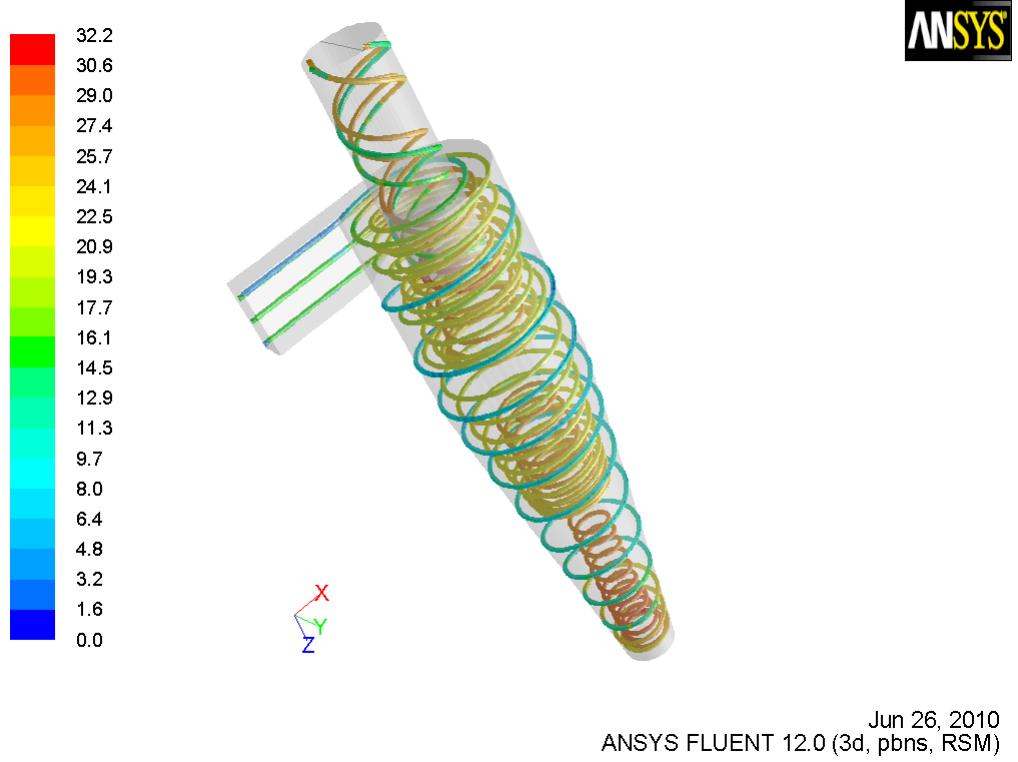
Tek fazlı analizler, teğetsel girişli ve ters akışlı bir siklonda Fluent HAD yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Hesaplamalarda 40000 eleman sayısı kullanılmış ve basınç kayıpları ve hız profilleri literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Basınç kayıplarının tahmini için $D=0.305$ m. çaplı Stairmand siklonu kullanılmıştır. Bu çalışmada giriş hızları 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s alınmıştır. Akışkan olarak sıkıştırılmaz hava kullanılmış olup havanın yoğunluğu 1.29 kg/m^3 ve viskozitesi $1.75E-5 \text{ kg/ms}$ alınmıştır. Toplam basınç kaybı hesabı için girişteki toplam basınç ve çıkıştaki toplam basınç farkı dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Dirgo ve Leith (1985) 'in yaptığı deneysel veriler ile ve Griffiths ve Boysan (1996)' in yaptığı nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve sonuçların birbirleri ile uyumlu oldukları görülmüştür.



Şekil 3.3: Siklonda Farklı Giriş Hızlarında Basınç Kayıpları.

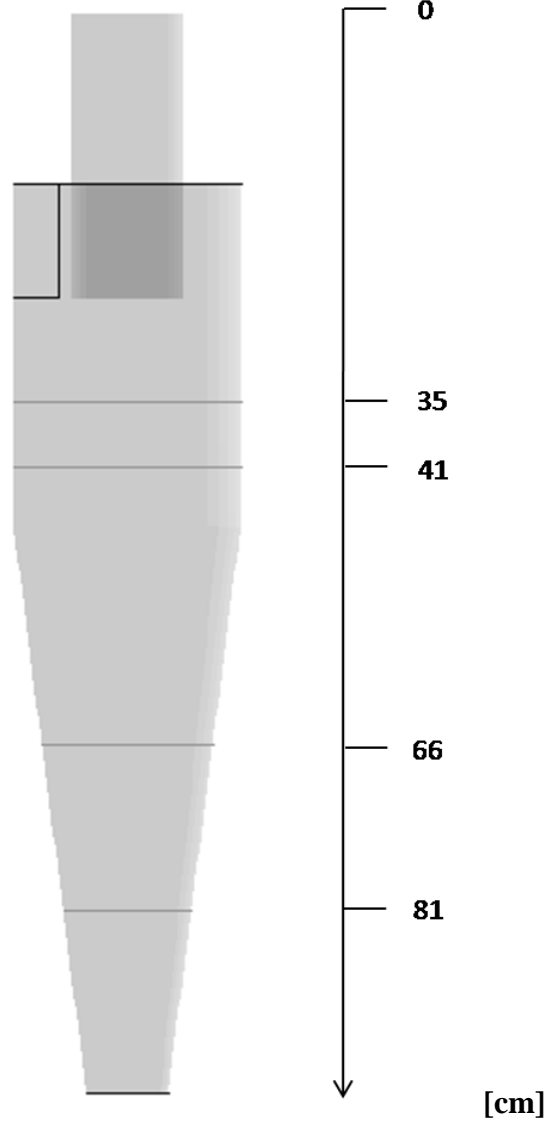
Şekil.3.3’de yapılan HAD çalışması ile elde edilen sonuçların deneysel ve nümerik sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yapılan HAD analizleri ile daha önce Griffiths ve Boysan (1996)’ ın yaptığı nümerik çalışmadan daha iyi sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Bunun nedeni 1996’dan günümüze gelene kadar yazılımda çözücü ile ilgili yapılan geliştirmelerin katkısının olduğu söylenebilir. Ayrıca elde edilen HAD sonuçlarının deneysel veriler ile de son derece uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4: Teğetsel Girişli Stairmand Siklonunda Akım Çizgileri

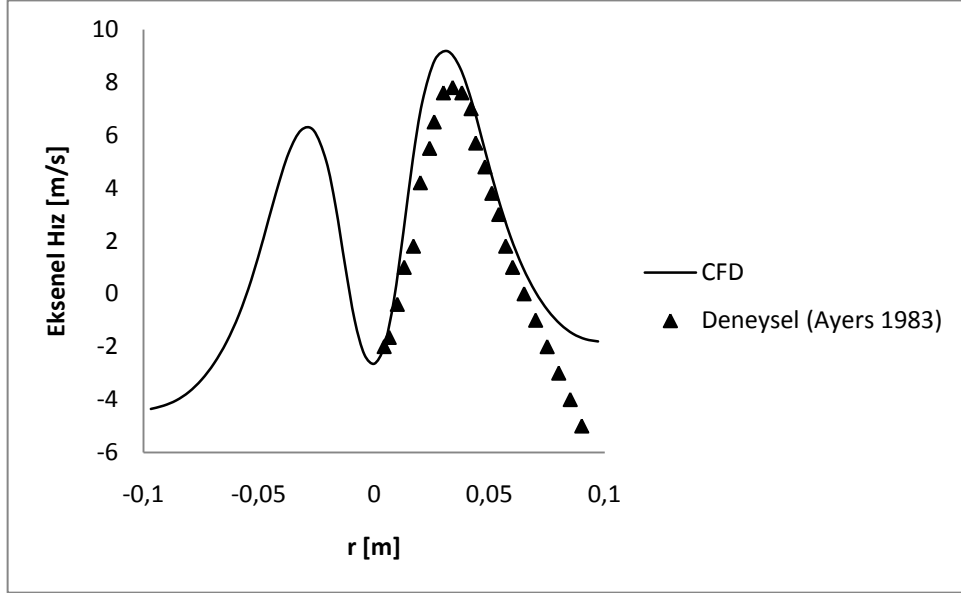
Şekil.3.4’de görüldüğü üzere siklon içerisindeki akış iç içe geçmiş iki girdap yapısından dolayı son derece karmaşıktır. Bu yüzden teğetsel ve aksenal hızların doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Teğetsel hız partikül ayrışması için gerekli santrifüj kuvvetleri oluşturur. Aksenal hız ise iç ve dış girdapların yapısını gösterir ve partiküllerin toz kutusuna doğru taşınmasını sağlar.

Hız profillerinin karşılaştırılmasında $D=0.205$ m. çaplı Stairmand siklonu kullanılmıştır. Giriş sınır şartı olarak $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ hacimsel debi verilmiştir. Çıkış sınır şartı olarak da Fluent içerisinde Outflow sınır şartı tanımlanmıştır. Akışkan olarak sıkıştırılamaz hava alınmış olup havanın yoğunluğu 1.225 kg/m^3 ve viskozitesi de $1.7894\text{E-}5 \text{ kg/ms}$ olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Ayers (1983) ile karşılaştırılmıştır ve deneysel sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.

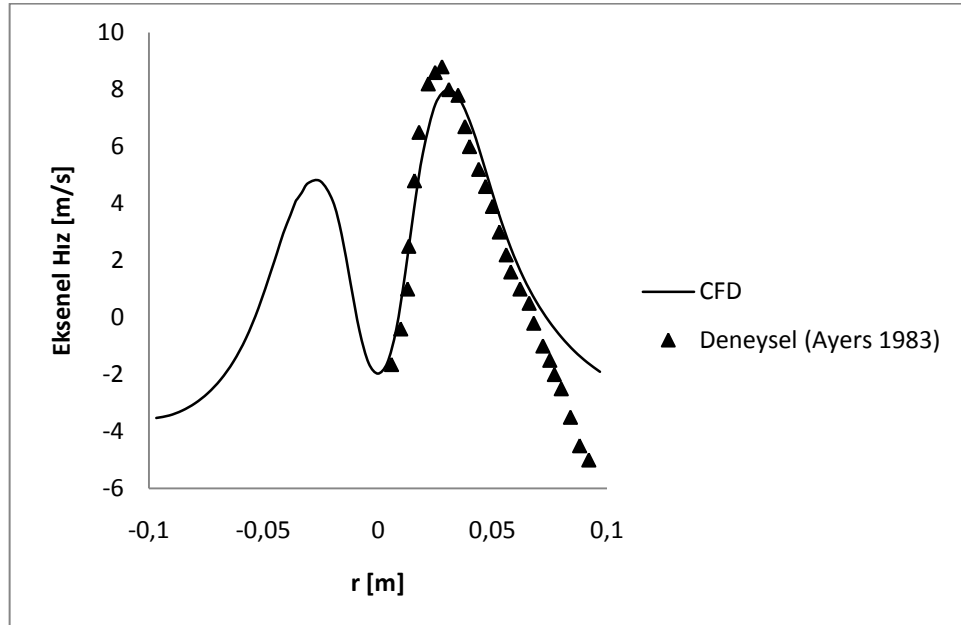


Şekil 3.5: Stairmand Siklonu Hız Profilleri Ölçüm İstasyonları.

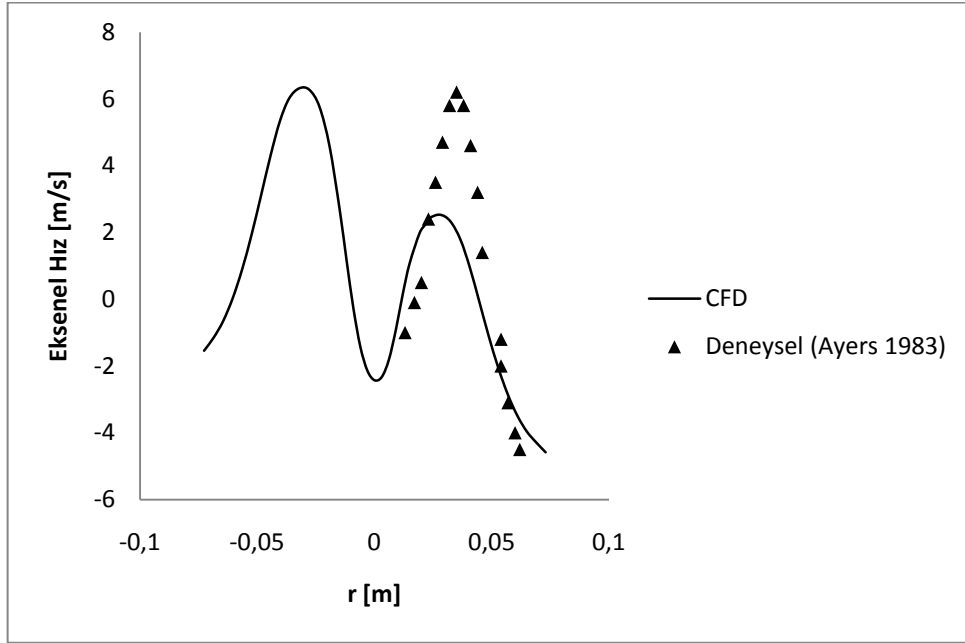
Eksenel ve teğetsel hız profilleri Şekil.3.5’de gösterildiği gibi 35, 41, 66 ve 81 cm mesafelerden alınmış ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Eksenel ve teğetsel hızlar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında sonuçların son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Bu da kullanılan sayısal ağ ve çözüm algoritmalarının uygun olduğunu göstermektedir. Sürekli rejimde Reynolds Stres Türbülans Modeli ile ve göreceli olarak kaba bir mesh ile analizler yapılmış ve pahalı olmayan bu yöntem ile siklon içerisindeki akış gerçeğe yakın bir şekilde çözülmüştür.



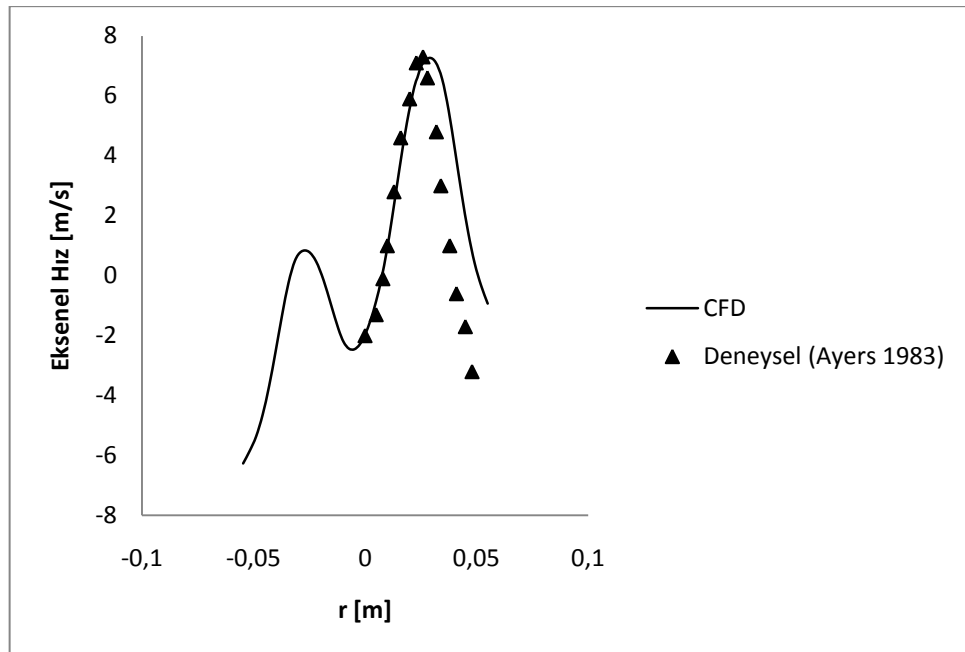
Şekil 3.6: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneyisel Veriler ile Karşılaştırılması
(z=35 cm).



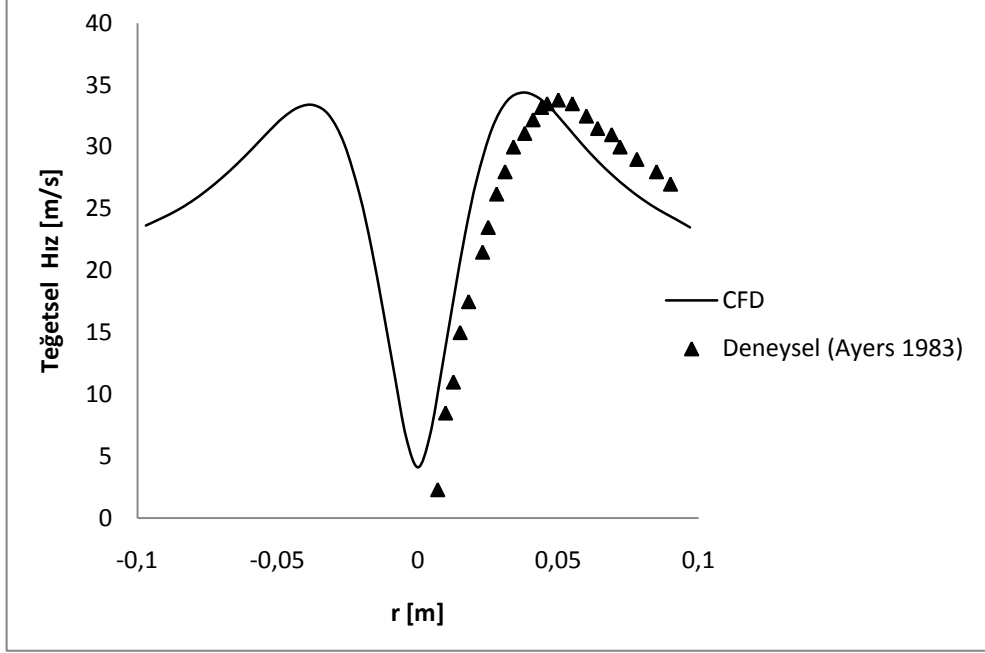
Şekil 3.7: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneyisel Veriler ile Karşılaştırılması
(z=41 cm).



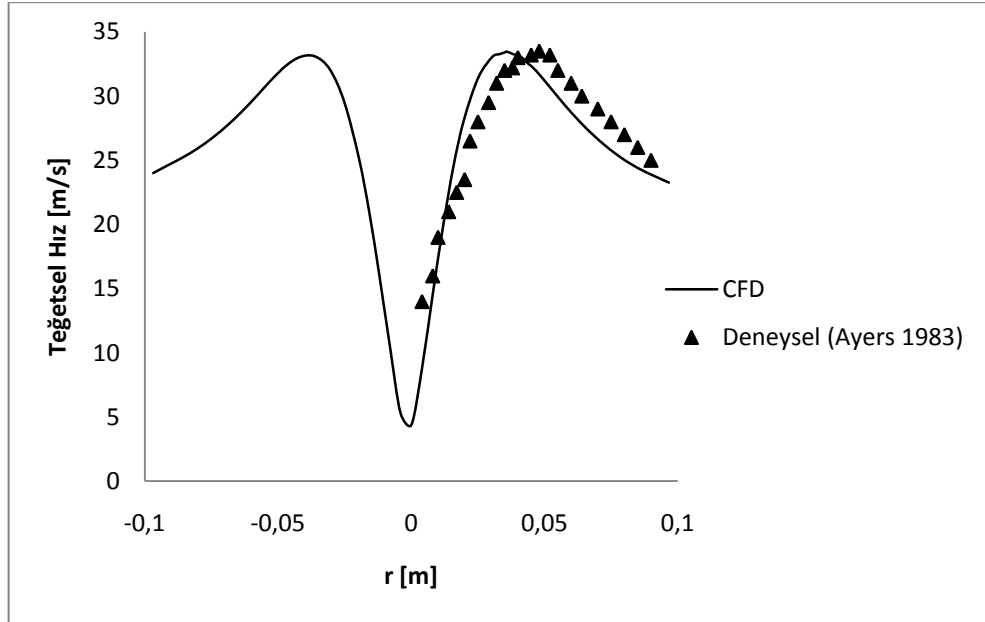
Şekil 3.8: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneyel Veriler ile Karşılaştırılması
(z=66 cm).



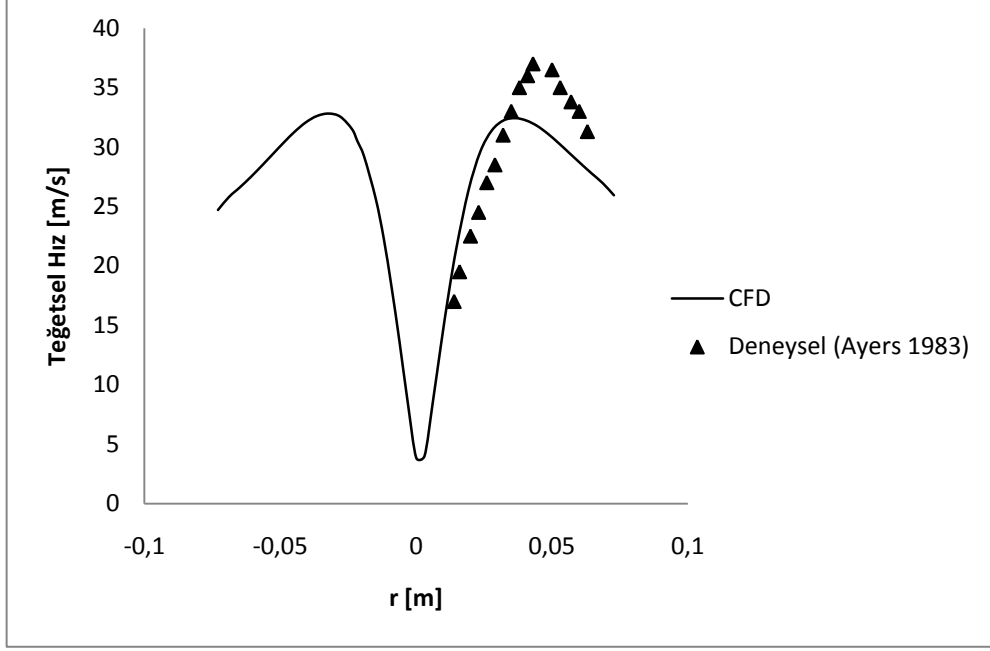
Şekil 3.9: 19 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profiline Deneyel Veriler ile Karşılaştırılması
(z=81 cm).



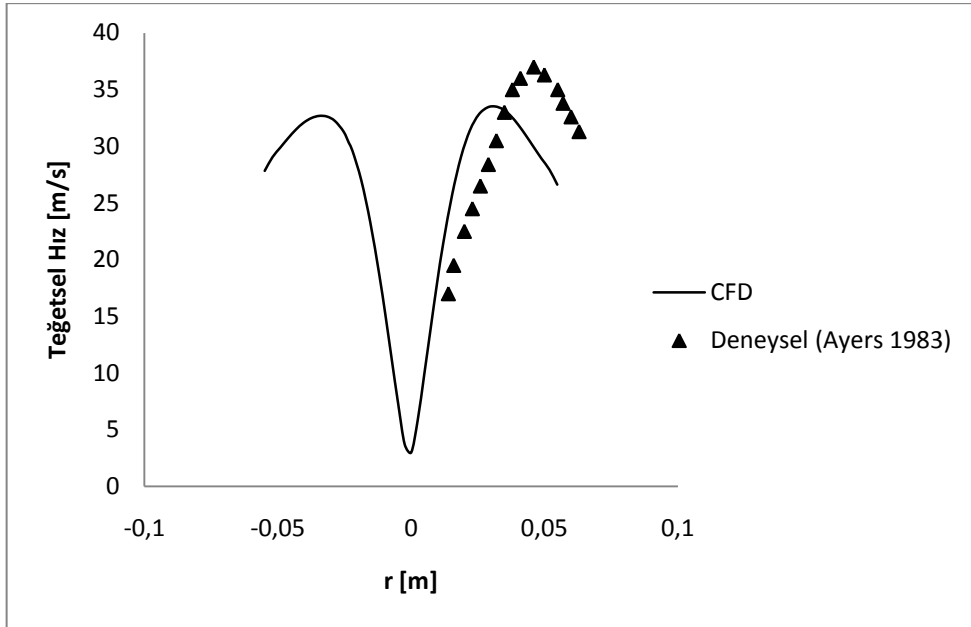
Şekil 3.10: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=35 cm).



Şekil 3.11: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması (z=41 cm).



Şekil 3.12: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması ($z=66$ cm)



Şekil 3.13: 19 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profiline Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması ($z=81$ cm).

3.3. Teğetsel Girişli Stairmand Siklonunda Giriş Kesiti Değişiminin Basınç Kayıbı ve Siklon Verimliliğine Etkisinin İncelenmesi

3.3.1. Değişken giriş kesiti

Bir Stairmand siklonunda giriş kesitinin dik kenarı a ve yatay kenarı b ile gösterilir. Bu çalışma ile b kenarı sabit tutularak a kenarının standart bir Stairmand siklonuna göre büyük ($a/D=0.7$) ve küçük ($a/D=0.3$) olması durumları incelenmiştir.

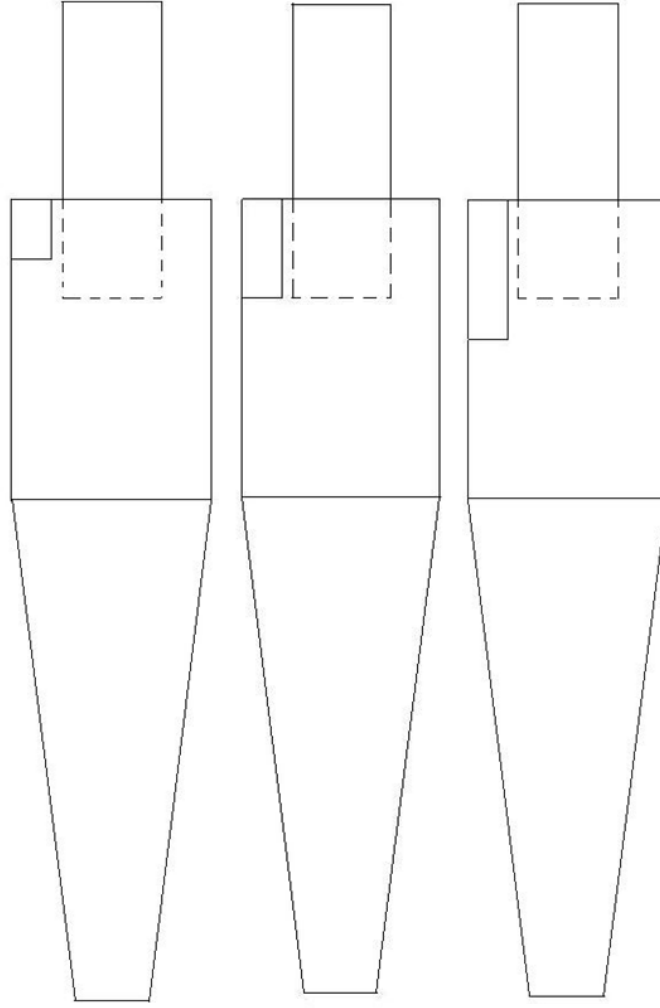
Aşağıdaki çizelgede analizlerde kullanılan siklon ölçüleri detaylı olarak verilmiştir. C2 siklonu Stairmand siklonudur.

Çizelge 3.1: Nümerik Çalışmada Kullanılan Siklonlara Ait Boyutlar.

D=0.305m.	a/D	b/D	a/b	s/D	h/D	H/D	D_e/D	B/D
C1	0.3	0.2	1.5	0.5	1.5	4	0.5	0.375
C2	0.5	0.2	2.5	0.5	1.5	4	0.5	0.375
C3	0.7	0.2	3.5	0.5	1.5	4	0.5	0.375

Çizelge.3.1' e göre C1, C2 ve C3 siklonlarının giriş kesitleri sırası ile 0.0055815, 0.0093025 ve 0.0130235 m²'dir.

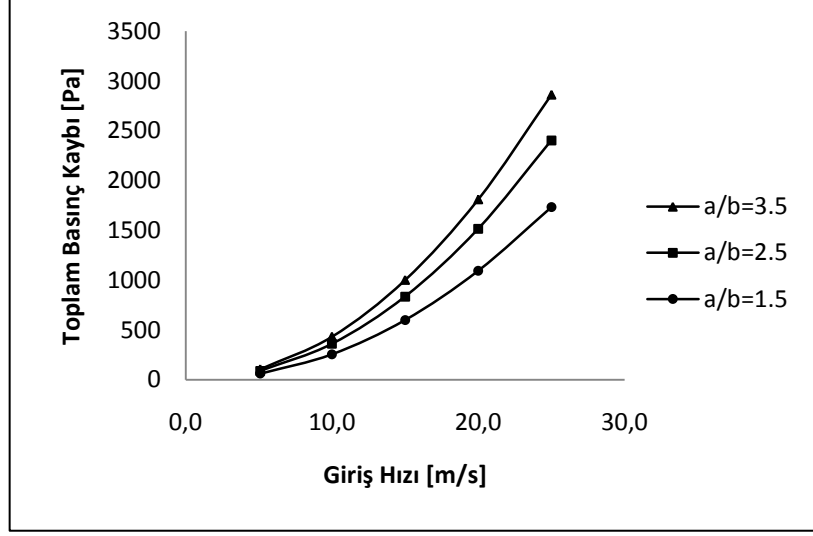
Şekil 3.14' de analizlerde kullanılan siklon geometrileri görülmektedir. Görüldüğü gibi b kenarı sabit tutulduğu için a kenarının değişmesi kesit alanı C1 siklonunda azalmakta ve C3 siklonunda artmaktadır. Bunun sonucunda aynı debi şartında C1 siklonunda giriş hızı artarken, C3 siklonunda azalmıştır.



Şekil 3.14: Nümerik Analizlerde Kullanılan Siklon Geometrileri, C1, C2 (Stairmand) ve C3.

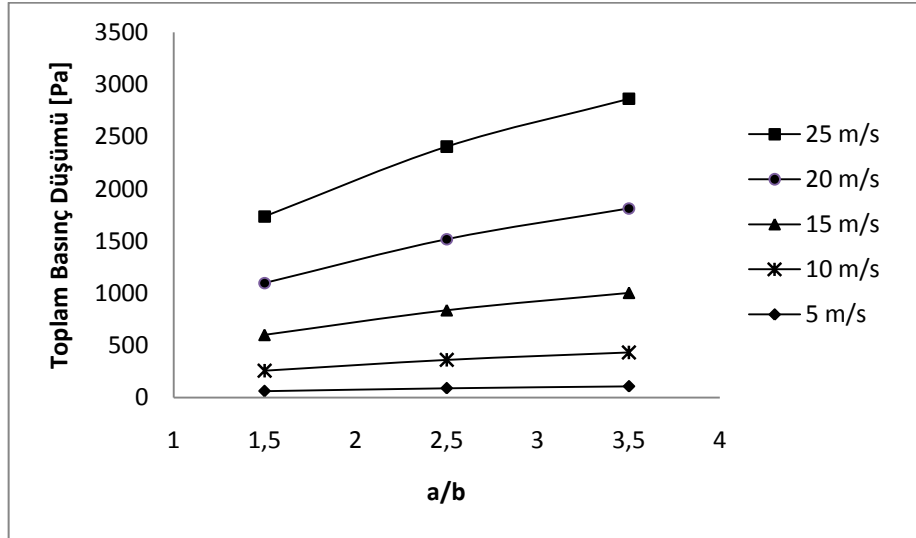
3.3.1.1. Giriş hızının basınç kayıpları üzerine etkisinin incelenmesi ($b/D=\text{Sabit}$)

Basınç kayıplarının hesaplanması için 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s giriş hızlarında analizler her siklon için gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerler Şekil 3.15' de gösterilmektedir.



Şekil 3.15: a/b Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıpları Üzerinde Etkisi

Şekil 3.15’ de görüleceği üzere farklı giriş hızlarında üç siklondaki basınç kayıpları verilmiştir. Bu sonuçlara göre aynı giriş hızlarında en fazla basınç kaybı C3 (a/b=3.5) siklonunda olmaktadır. Bunun nedeni giriş kesiti en büyük C3 siklonudur ve aynı hız şartında debi C3 siklonunda daha fazladır. Bu yüzden C3 siklonunda basınç kayıpları daha fazla gerçekleşmektedir.



Şekil 3.16: C1, C2 ve C3 Siklonları için Farklı Giriş Kesitlerinde Giriş Hızının Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi

Şekil 3.16 incelendiği zaman giriş kesitinin değişimi yüksek hızlarda daha fazla basınç kaybına neden olmaktadır. Bunun nedeni siklon içerisindeki girdapların artan giriş hızı ile beraber daha da artmasıdır.

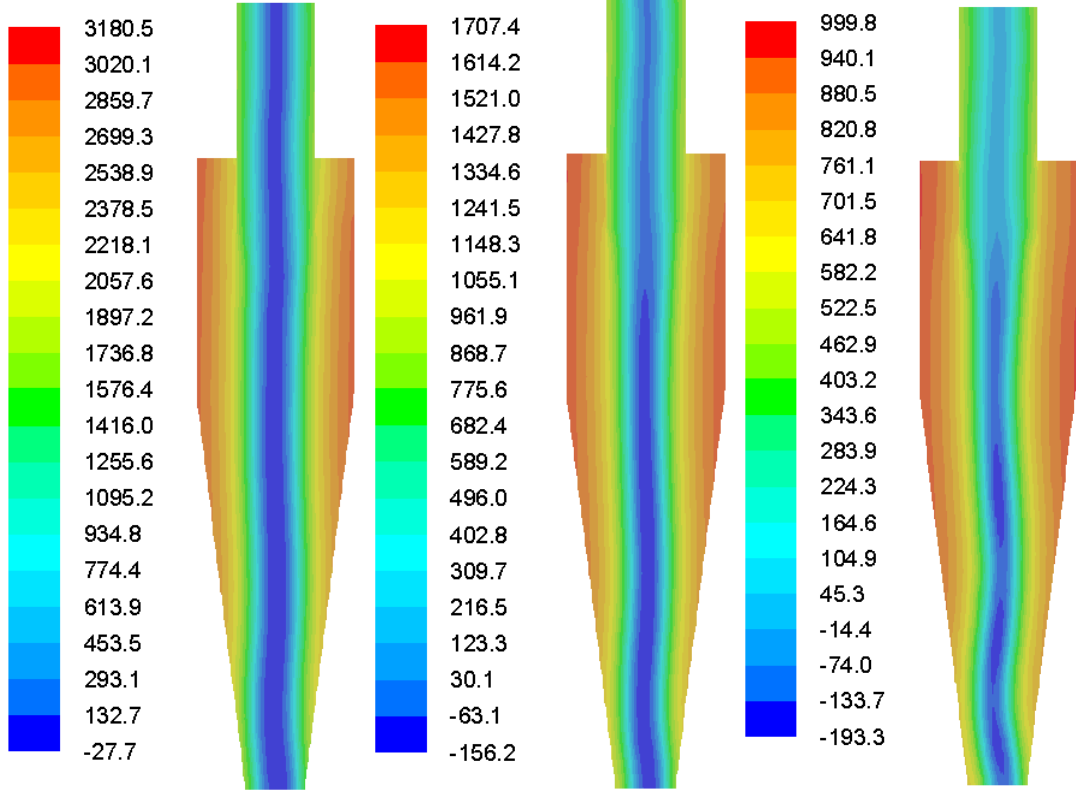
3.3.1.2. Sabit giriş debisinin basınç kayıpları üzerine etkisinin incelenmesi (b/D Sabit)

Analizler $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ sabit giriş debisi için yapılmıştır. Giriş kesiti sabit olmadığı için sabit giriş debisinde her üç siklon için farklı giriş hızları olacaktır. C1, C2 ve C3 siklonlarının giriş kesitleri sırası ile 0.0055815 , 0.0093025 ve 0.0130235 m^2 olarak hesaplanabilir. Buradan $U_{giriş} = Q/A$ formülü ile giriş hızları aşağıdaki gibi elde edilir.

Çizelge 3.2: C1, C2 ve C3 Siklonlarına Ait Giriş Hızları.

	C1	C2	C3
Giriş Hızı [m/s]	25	15	10.75

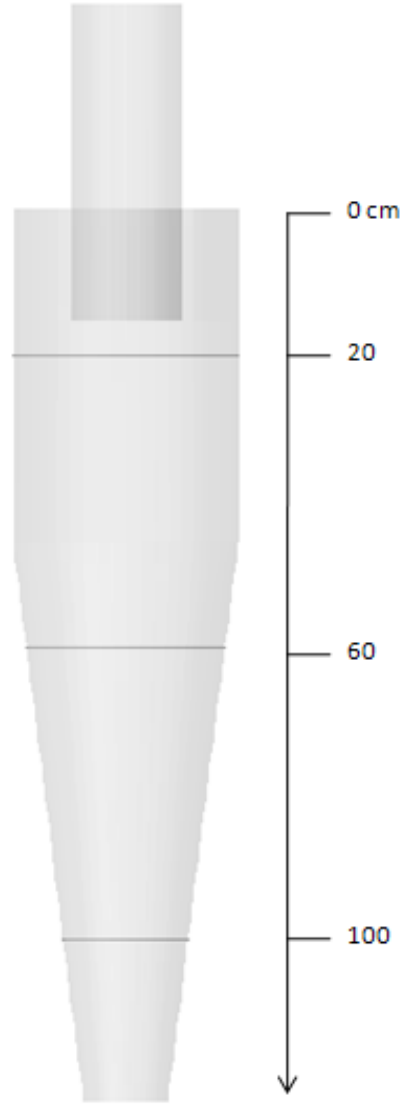
Yapılan analizler sonucunda C1 siklonundaki basınç kaybı 1780 Pa , C2 siklonunda 850 Pa ve C3 siklonunda ise 504 Pa olarak hesaplanmıştır. Buna göre aynı debi şartlarında a/b oranının artması ile basınç kaybı azalmıştır. Bunun nedeni artan kesit alanı ile beraber giriş hızının azalması ve teğetsel hız değerinin azalmasıdır. Şekil 3.17' de üç siklondaki statik basınç konturları verilmiştir. Buradan da C3 siklonundaki düşük basınç değerleri görülmektedir.



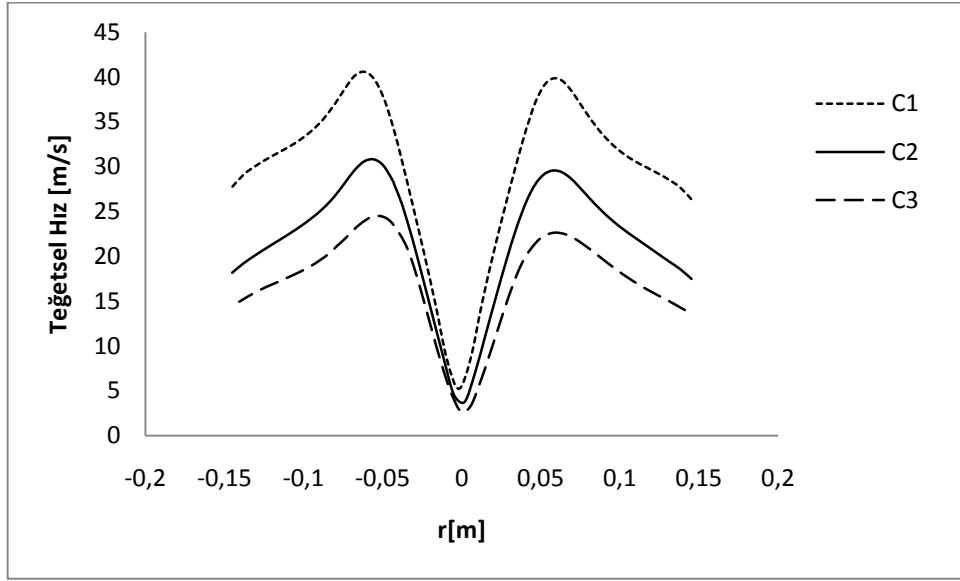
Şekil 3.17: Sabit Debide C1, C2 ve C3 Siklonları için Statik Basınç Konturu.

3.3.1.3. Sabit giriş debisinin hız profilleri üzerine etkisinin incelenmesi (b/D Sabit)

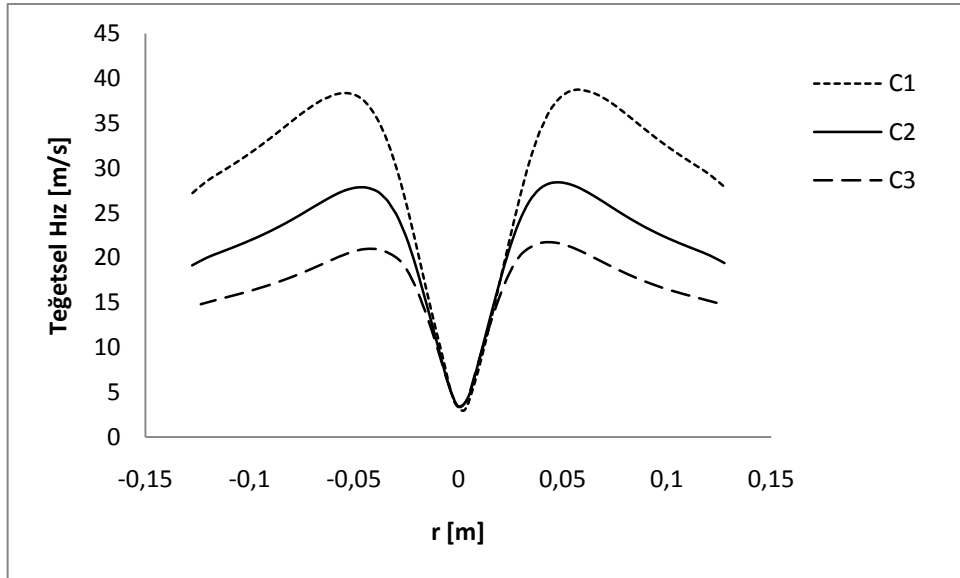
Eksenel ve teğetsel hız profilleri Şekil 3.18' de gösterildiği gibi 20,60 ve 100 cm mesafelerden alınmıştır. Elde edilen hız profilleri Şekil 3.19, 3.20, 3.21, 3.23, 3.24 ve 3.25 de birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



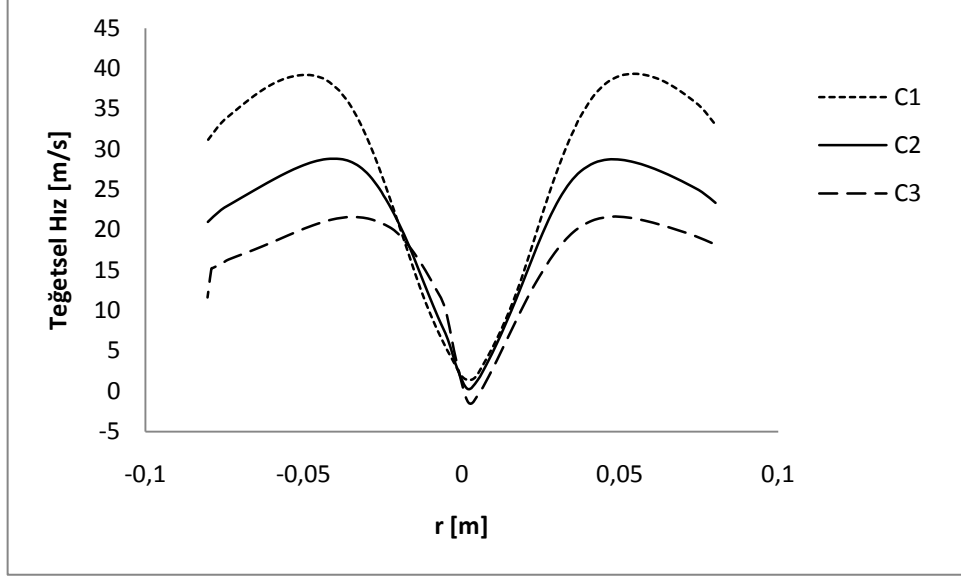
Şekil 3.18: Stairmand Siklonu Hız Profilleri Ölçüm İstasyonları.



Şekil 3.19: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri (z=20 cm).



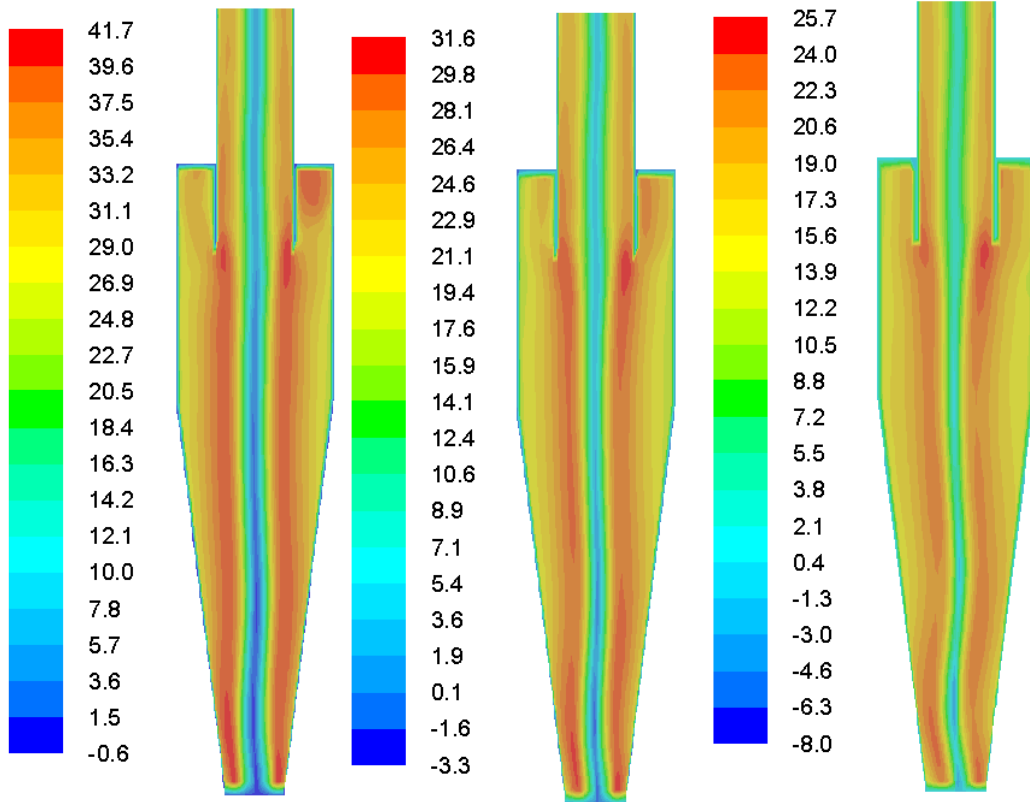
Şekil 3.20: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri (z=60 cm).



Şekil 3.21: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri (z=100 cm).

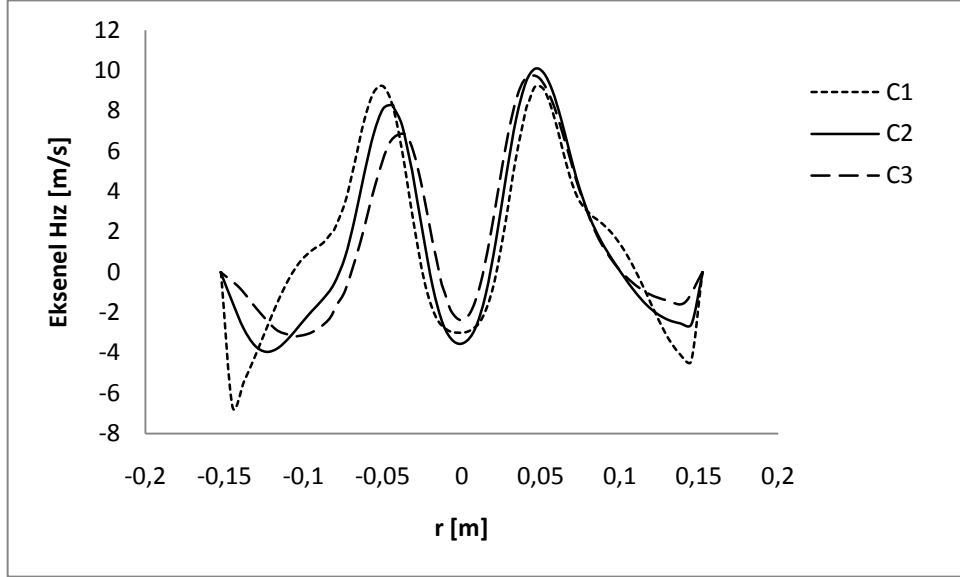
Sabit giriş debisi şartında (b/D sabit) teğetsel hızlar incelendiğinde a/b oranı arttıkça teğetsel hızın azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni artan giriş kesitinden dolayı giriş hızının azalması ve dolayısı ile merkezkaç kuvvetlerinin azalmasıdır. Merkezkaç kuvvetinin azalması partikül toplama verimi üzerinde de etkili olacağından sabit giriş debisi şartında a/b oranının artması partikül toplama verimini azaltırken a/b oranının azalması partikül toplama verimini artıracaktır.

Şekil 3.22' de teğetsel hız konturları görülmektedir.

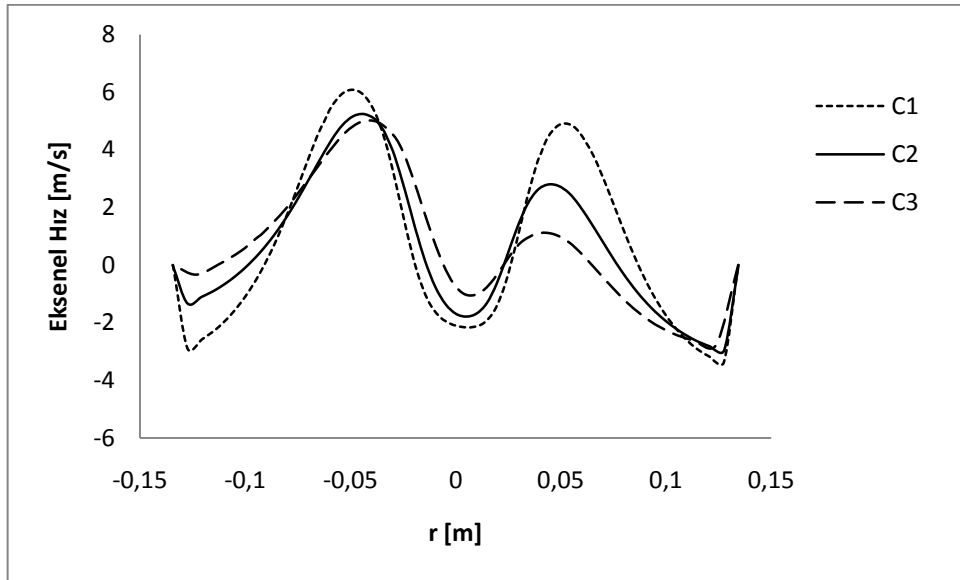


Şekil 3.22: Sabit Giriş Debisinde C1, C2 ve C3 Siklonları için Teğetsel Hız Konturu.

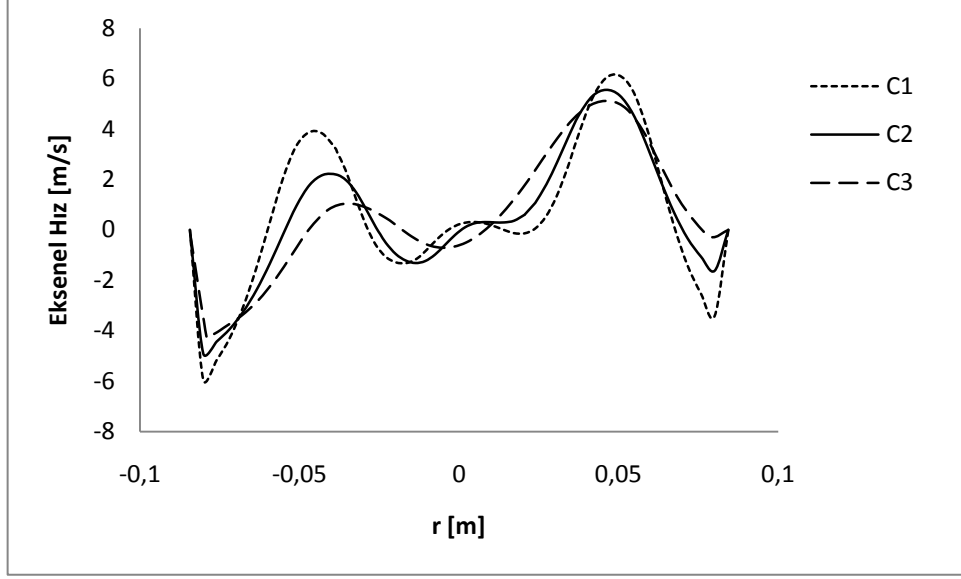
Şekil 3.22'den de görüleceği üzere en yüksek teğetsel hız C1 siklonunda bulunmuştur.



Şekil 3.23: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri (z=20 cm).



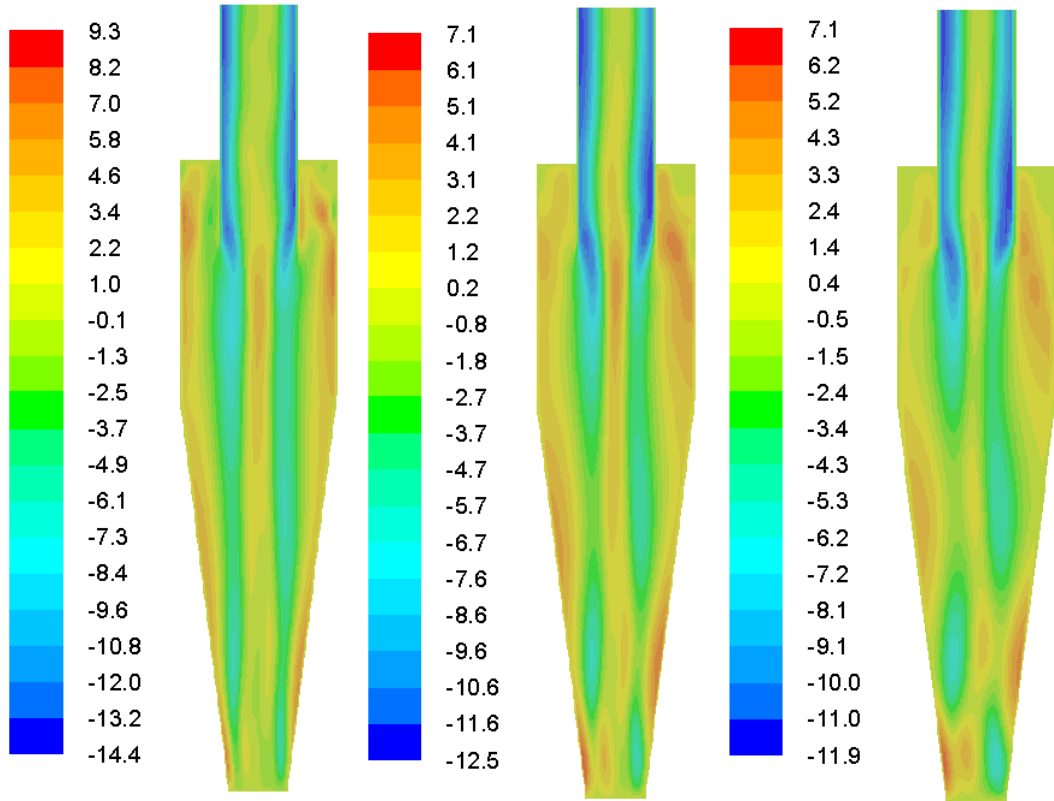
Şekil 3.24: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri (z=60 cm).



Şekil 3.25: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri (z=100 cm).

Teğetsel hızlarda olduğu gibi a/b oranı azaldıkça eksenel hız artmaktadır. a/b oranı ile giriş kesitini azalması, aynı debi şartında giriş hızının artmasına neden olacaktır. Yüksek giriş hızı da eksenel hızları artırmıştır. Şekil 3.23, 3.24 ve 3.25' den görüleceği üzere dış girdaptaki artış ile partiküller aşağı doğru rahat bir şekilde sürüklenerek siklon tarafından tutulacak ve siklonun partikül toplama verimi artacaktır.

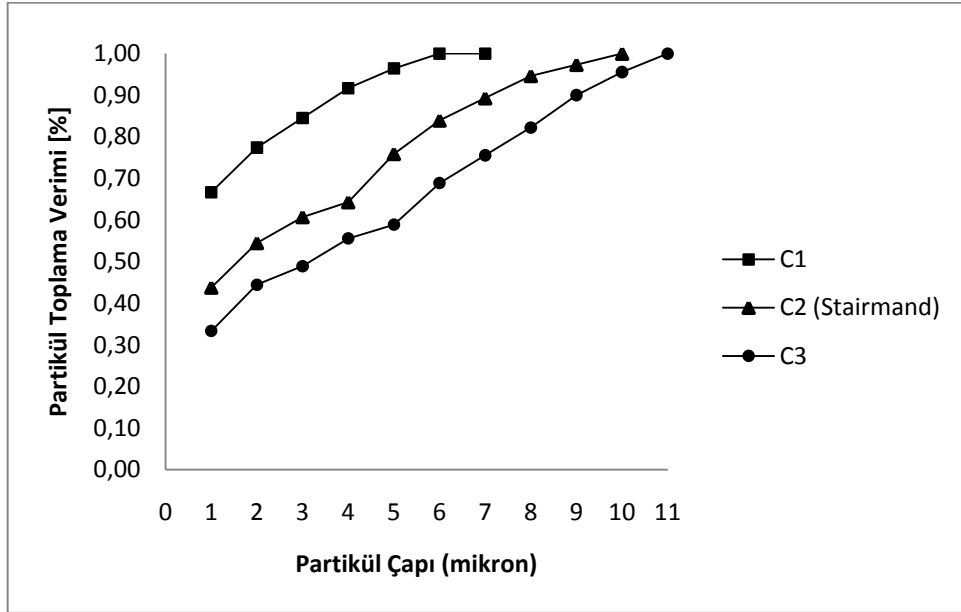
Şekil 3.26' da aksenal hız konturları görülmektedir.



Şekil 3.26: Sabit Giriş Debisinde C1, C2 ve C3 Siklonları için Aksenal Hız Konturu.

3.3.1.4. Sabit giriş debisinin partikül toplama verimi üzerine etkisinin incelenmesi

Partikül toplama verimlerinin hesabı için $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ sabit giriş debisi için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde $860 \text{ kg}/\text{m}^3$ yoğunluğa sahip partiküller kullanılmıştır. Partikül çapları 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve $10 \text{ }\mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.27' de görülmektedir.



Şekil 3.27: 15 m/s Giriş Hızı için Partikül Toplama Verimleri.

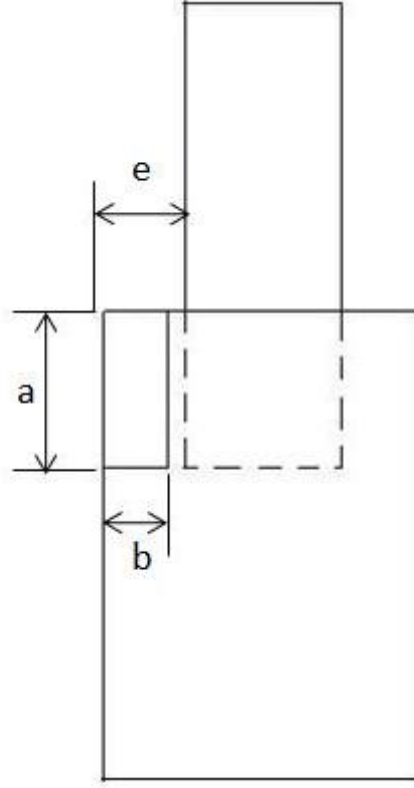
Partikül verimleri karşılaştırıldığında C1 siklonunda verimin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni giriş hızının yüksek olmasından dolayı merkezkaç kuvvetinin artması ve partiküllerin cidara savrulurak dış girdap yardımı ile aşağı doğru sürüklenmesidir.

3.3.2. Sabit giriş kesiti

Bu çalışma giriş kesiti Stairmand siklonunun giriş kesiti sabit alınarak farklı a ve b değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre a kenarı artarken b kenarı da kesit alanı sabit kalacak şekilde azaltılmıştır. Boyutsuz ölçüler Çizelge 3.3' de verilmiştir. Hesaplamalar 0.14 m³/s sabit giriş debisi için yapılmıştır. Sonuçlar basınç kayıpları, hız profilleri ve partikül toplama verimleri üzerinden karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.3: Nümerik Çalışmada Kullanılan Siklonlara Ait Boyutlar.

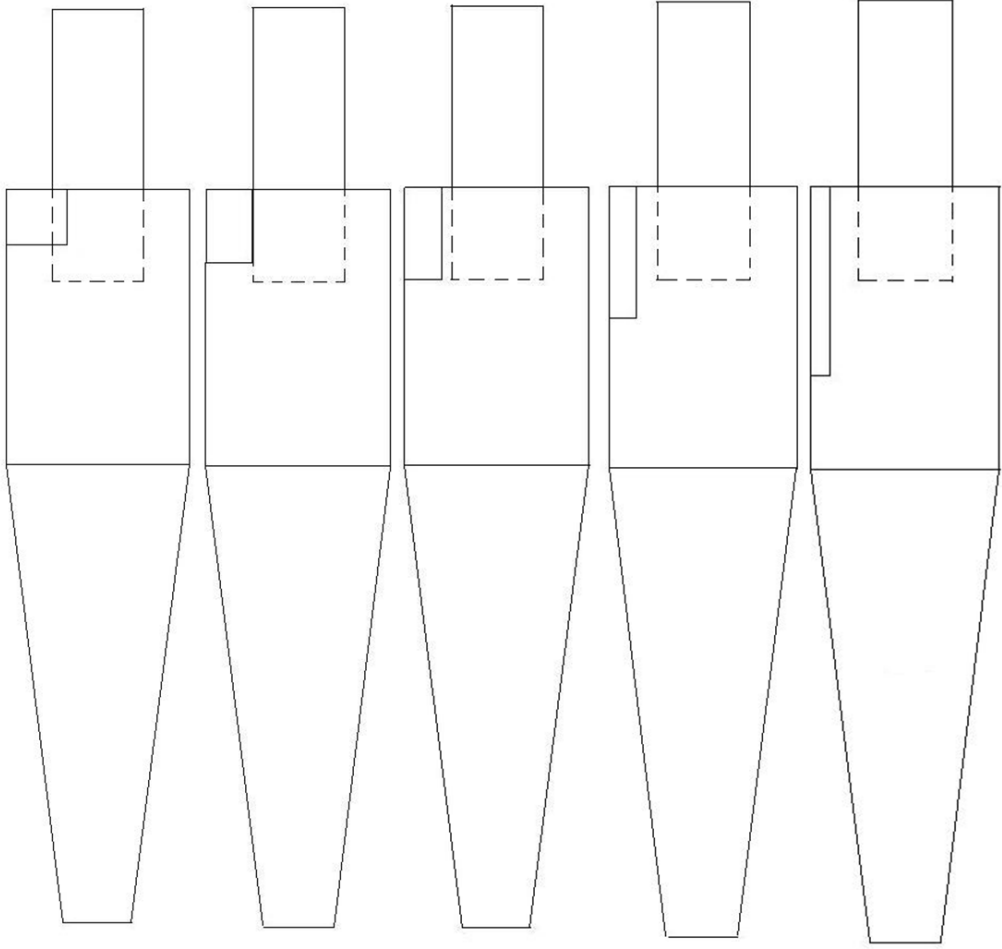
D=0.305 m	a/D	b/D	a/b	e/a	e/b
S1	0.3	0.333	0.9	0.83	0.75
S2	0.4	0.25	1.6	0.63	1
S3 (Stairmand)	0.5	0.2	2.5	0.50	1.25
S4	0.7	0.142	4.93	0.36	1.76
S5	1	0.1	10	0.25	2.5



Şekil 3.28: Stairmand Siklonu Giriş Kesiti

Şekil 3.28’de a,b ve e ölçülerinin Stairmand siklonu üzerindeki yerleri görülmektedir.

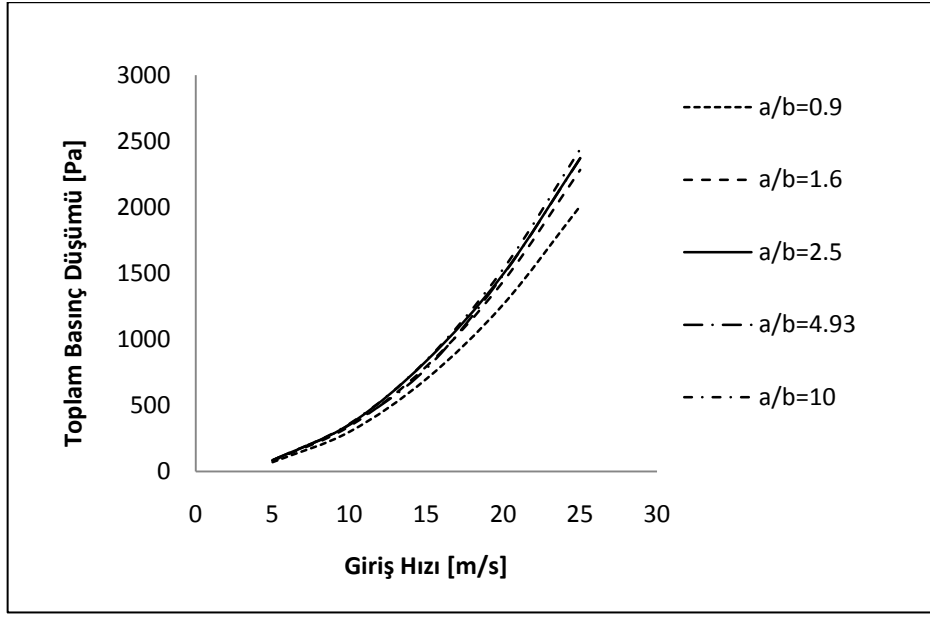
Giriş debisi ve giriş kesitleri sabit olduğu için tüm siklonlarda giriş hızı aynıdır. Bu değer hesaplandığında 15 m/s değeri elde edilir. Şekil 3.29’de hesaplamalarda kullanılan siklon geometrileri görülmektedir. Tüm siklonlarda giriş kesitleri sabittir.



Şekil 3.29: Nümerik Analizlerde Kullanılan Siklon geometrileri (Soldan sağa doğru S1, S2, S3 (Stairmand), S4 ve S5).

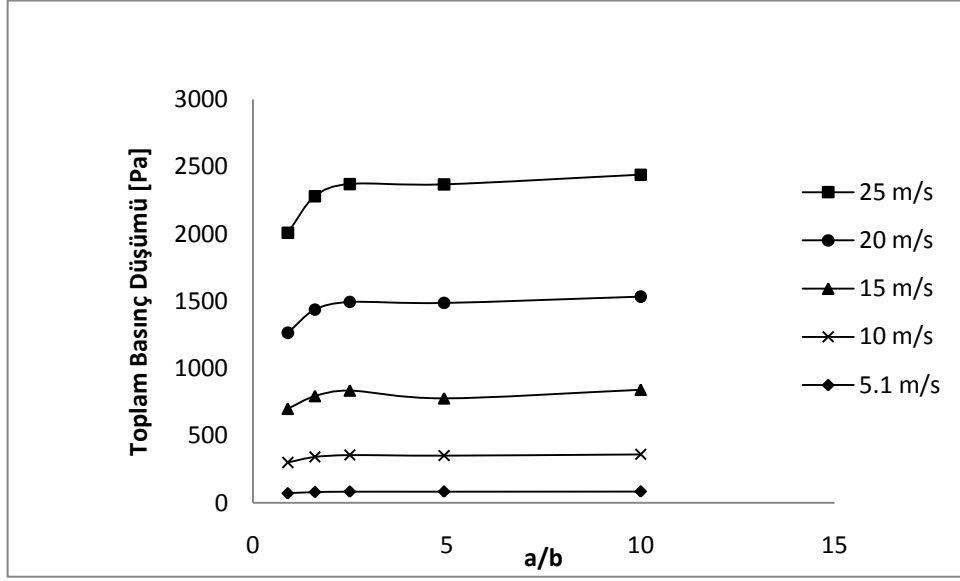
3.3.2.1. Giriş hızının basınç kayıpları üzerine etkisinin incelenmesi

Basınç kayıplarının hesaplanması için 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s giriş hızlarında analizler her siklon için gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerler Şekil 3.29’ da görülmektedir.



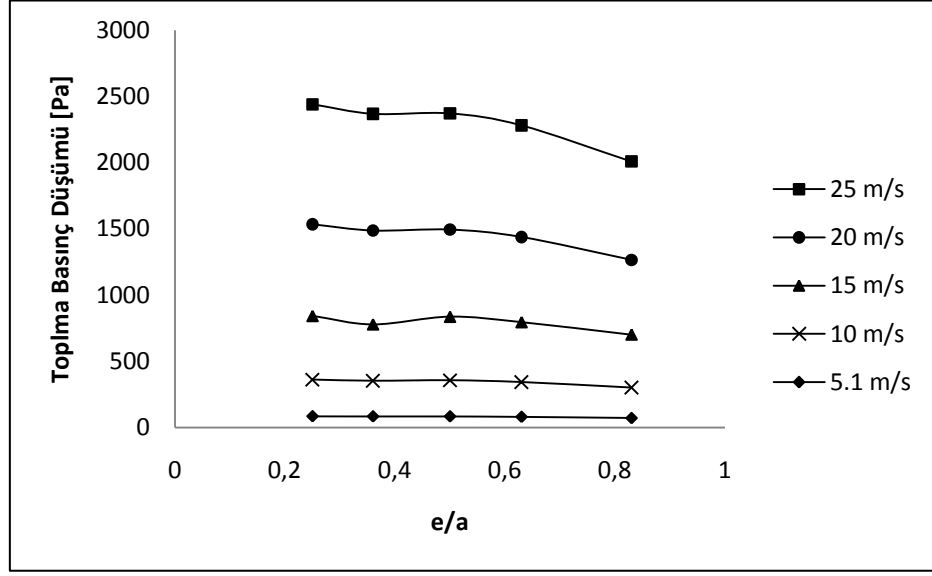
Şekil 3.30: a/b Oranının Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi

Şekil.3.30 'dan görüleceği üzere a/b oranının artması ile basınç kayıpları artmaktadır, fakat S1 siklonu (a/b=0.9) dışında diğer siklonlar arasındaki fark ihmal edilebilecek mertebededir. Bunun nedeni S1 siklonunda teğetsel hızın daha düşük olmasıdır (Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38).



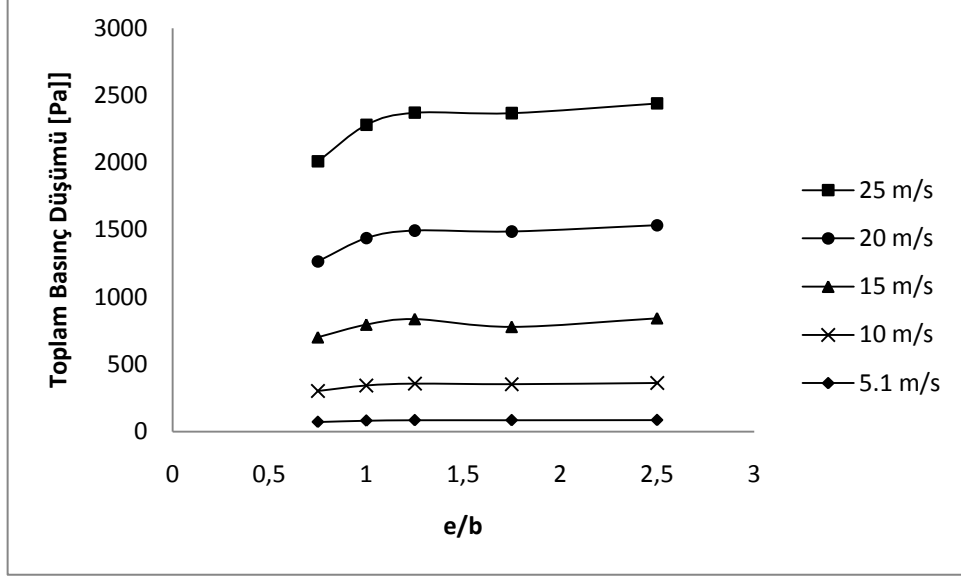
Şekil 3.31: a/b Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi.

Şekil 3.31’ de farklı giriş hızlarının basınç kayıplarına etkisi incelendiğinde a/b=2.5’e kadar basınç kaybı artarken a/b=2.5’den sonra basınç kayıpları çok değişmemektedir.



Şekil 3.32: e/a Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi.

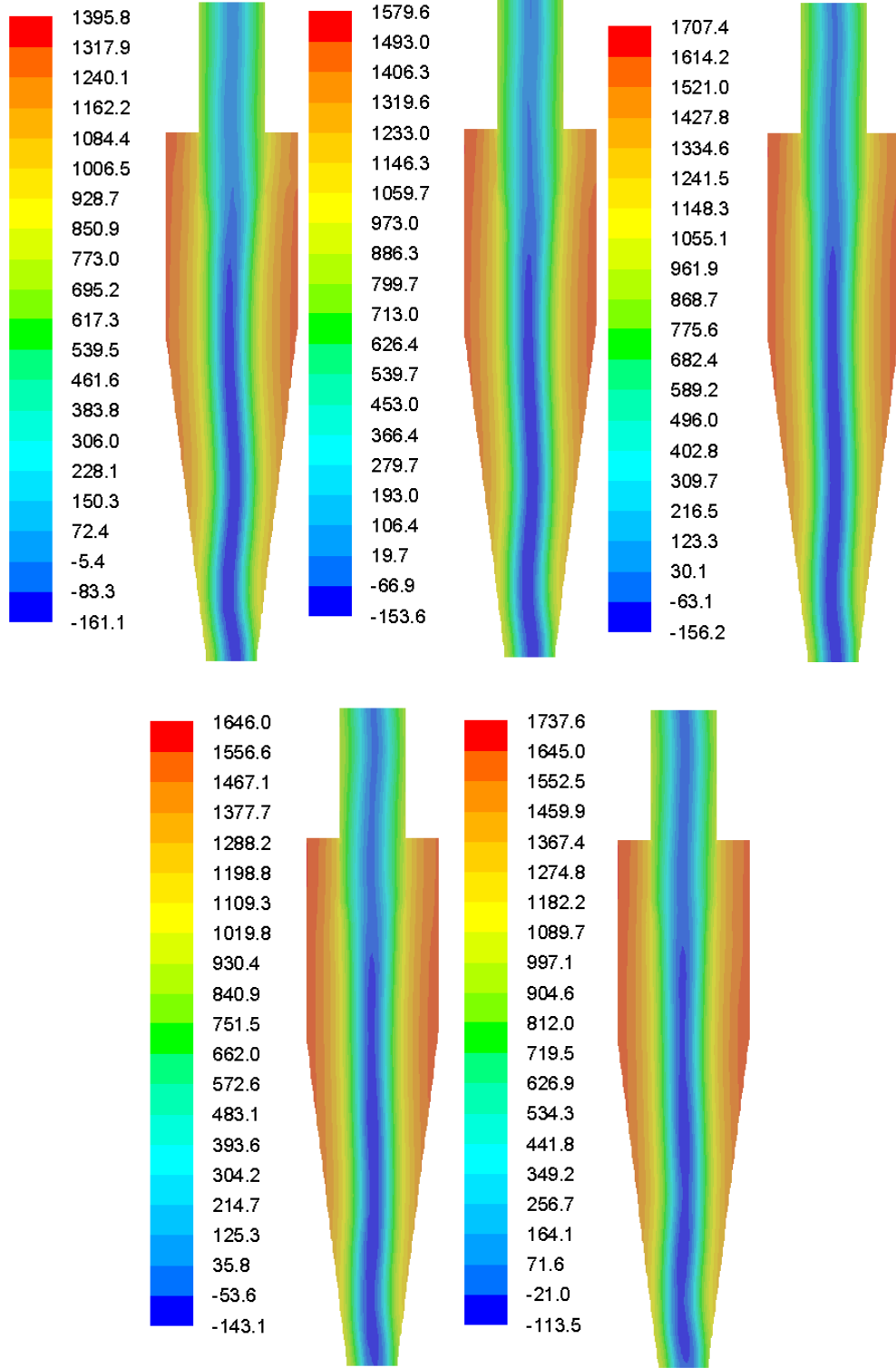
e/a oranının toplam basınç kayıplarına etkisi Şekil 3.32’de görülmektedir. Buna göre e/a oranı arttıkça basınç kayıpları 5.1, 10 ve 15 m/s hızlarda ihmal edilebilecek düzeyde azalırken 20 ve 25 m/s hızlardaki düşüş daha fazladır. Düşük e/a oranında giriş kesiti ince-uzun şekildedir ve bu formda teğetsel hız profilleri artmaktadır.



Şekil 3.33: e/b Oranının Farklı Giriş Hızlarında Toplam Basınç Kayıplarına Etkisi.

e/b oranının toplam basınç kayıplarına etkisi Şekil 3.33’de görülmektedir. Buna göre e/b oranı arttıkça basınç kayıpları 5.1, 10 ve 15 m/s hızlarda ihmal edilebilecek düzeyde artarken 20 ve 25 m/s hızlardaki artış daha fazladır. Düşük e/b oranında giriş kesiti dar-geniş şekildedir ve bu formda teğetsel hız profilleri azalmaktadır.

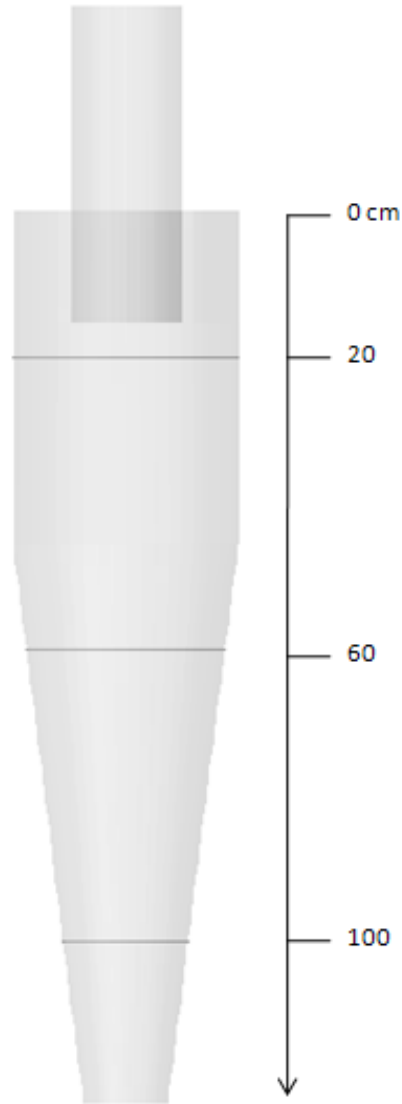
Şekil 3.34' de statik basınç konturları görülmektedir.



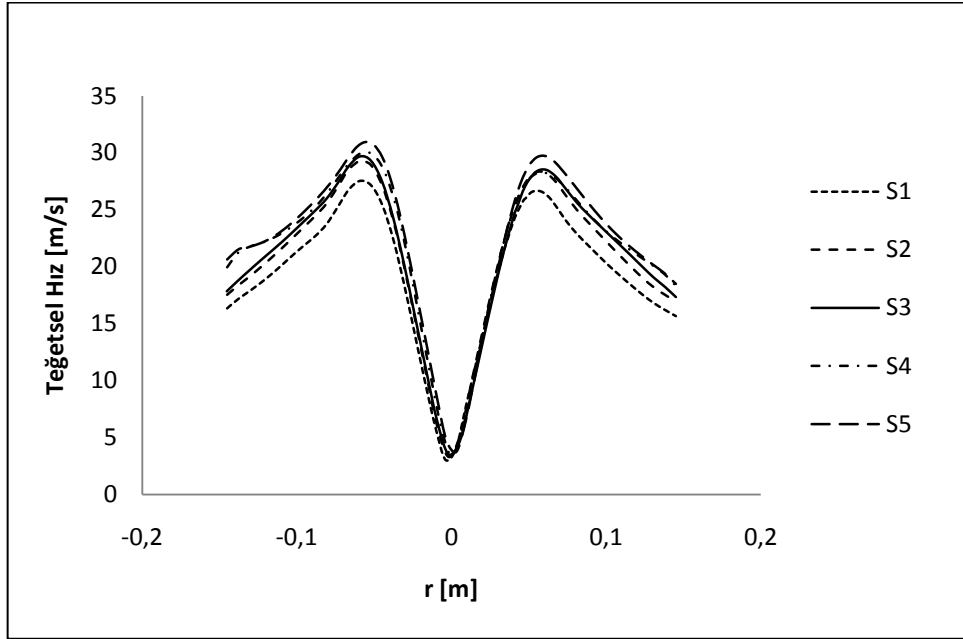
Şekil 3.34: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Statik Basınç Konturu.

3.3.2.2. Kesit boyut oranının hız profilleri üzerine etkisinin incelenmesi

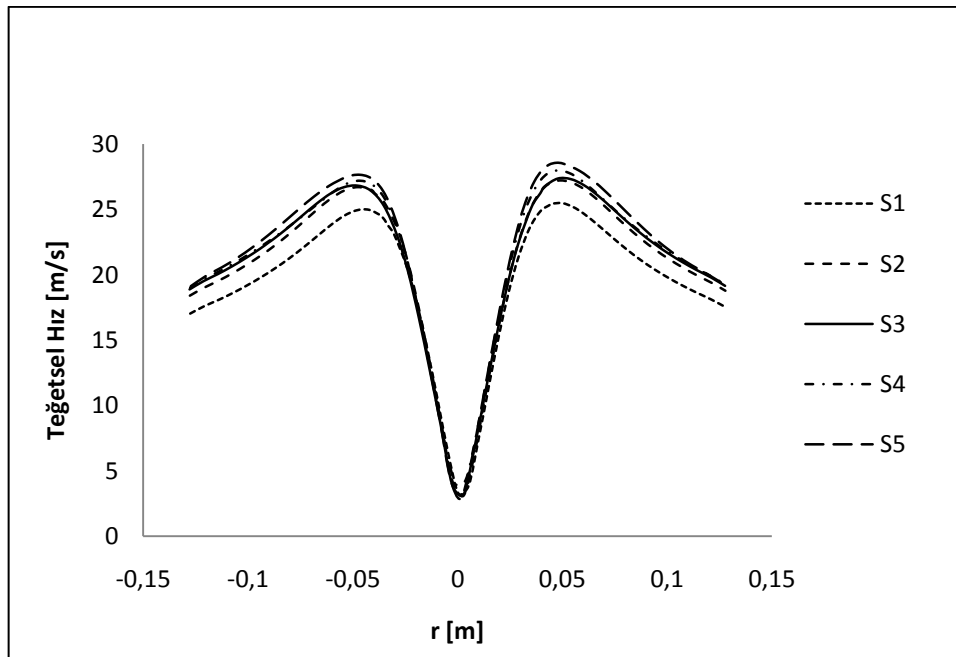
Eksenel ve teğetsel hız profilleri Şekil 3.35’de gösterildiği gibi 20, 60 ve 100 cm mesafelerden alınmıştır. Elde edilen hız profilleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



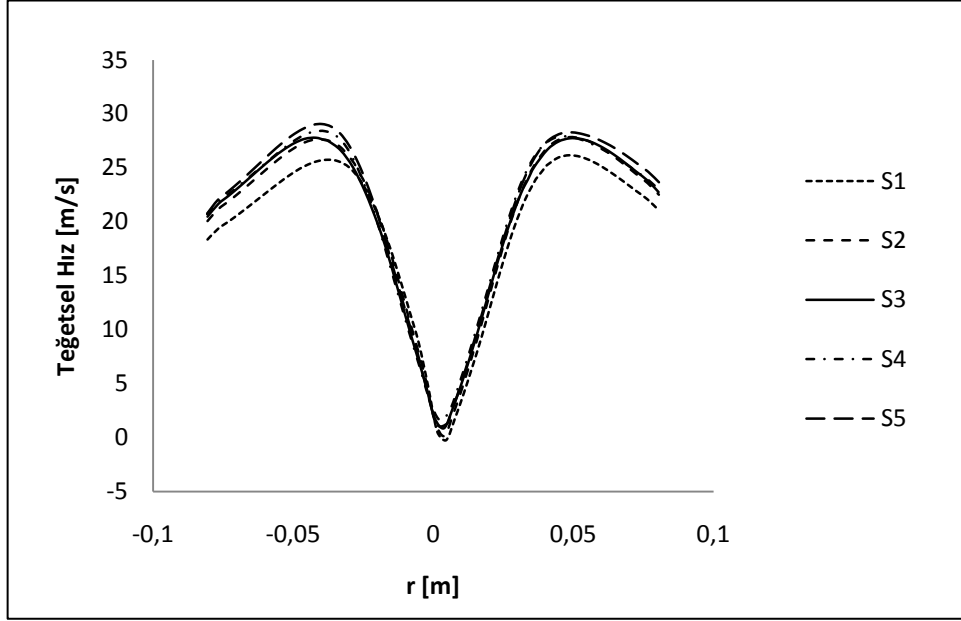
Şekil 3.35: Stairmand Siklonu Hız Profilleri Ölçüm İstasyonları.



Şekil 3.36: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=20$ cm).



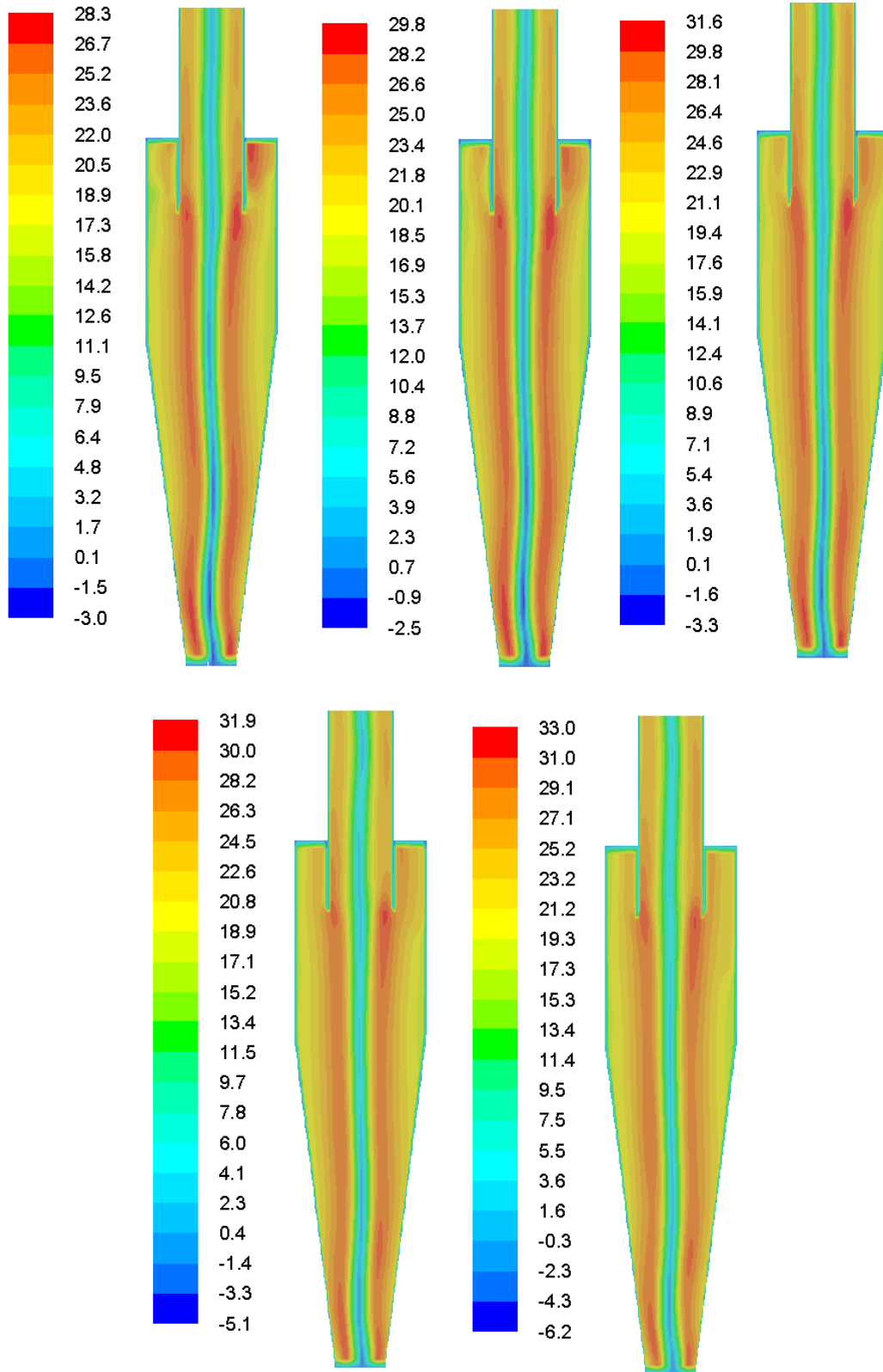
Şekil 3.37: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri ($z=60$ cm).



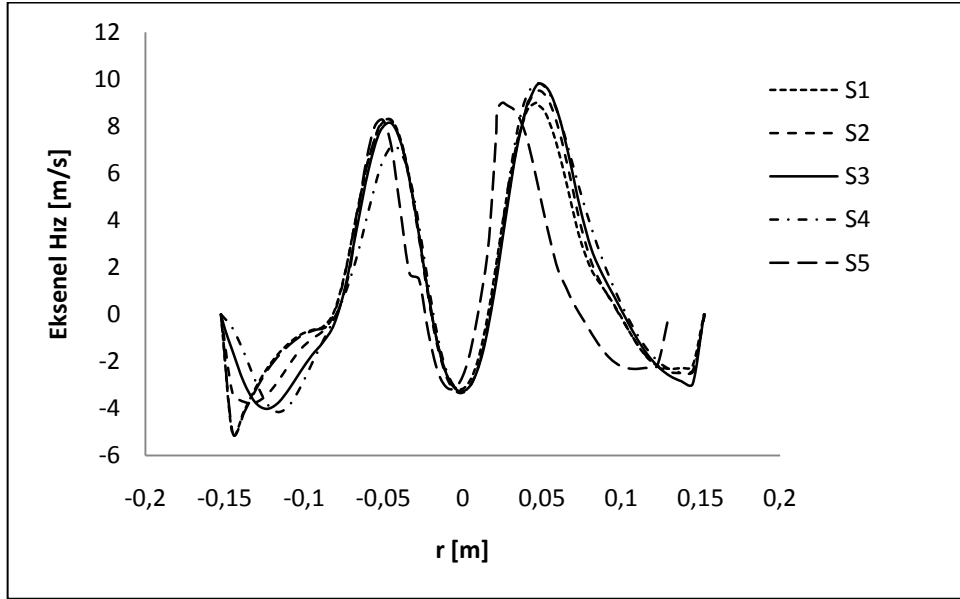
Şekil 3.38: 15 m/s Giriş Hızı için Teğetsel Hız Profilleri (z=100 cm).

Sabit giriş kesiti ve sabit debi şartında teğetsel hızlar incelendiğinde a/b oranı arttıkça teğetsel hızın arttığı görülmektedir. Bunun nedeni merkezkaç kuvvetlerinin artmasıdır. Merkezkaç kuvvetinin artması partikül toplama verimi üzerinde de etkili olacağından sabit giriş kesiti ve sabit debi şartında a/b oranının artması partikül toplama verimini artıracaktır.

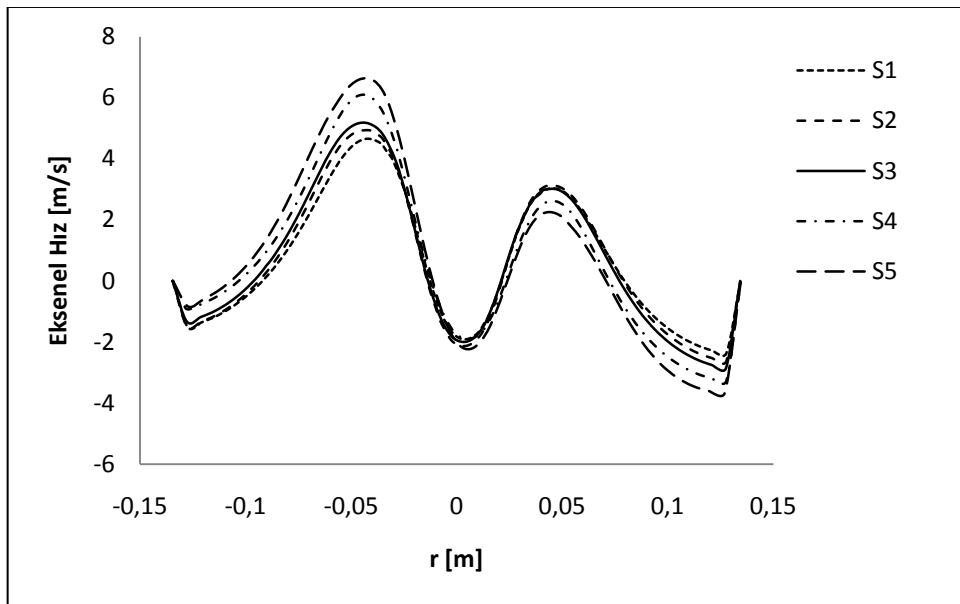
Şekil 3.39' da teğetsel hız konturları görülmektedir. Konturlarda teğetsel hızlardaki artış net bir şekilde görülmektedir.



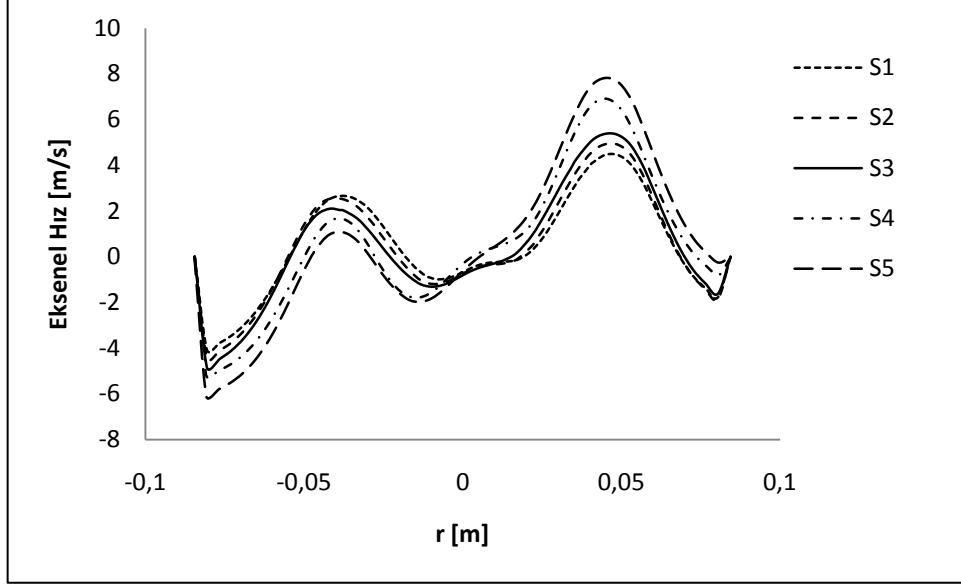
Şekil 3.39: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Teğetsel Hız Konturu.



Şekil 3.40: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri (z=20 cm).



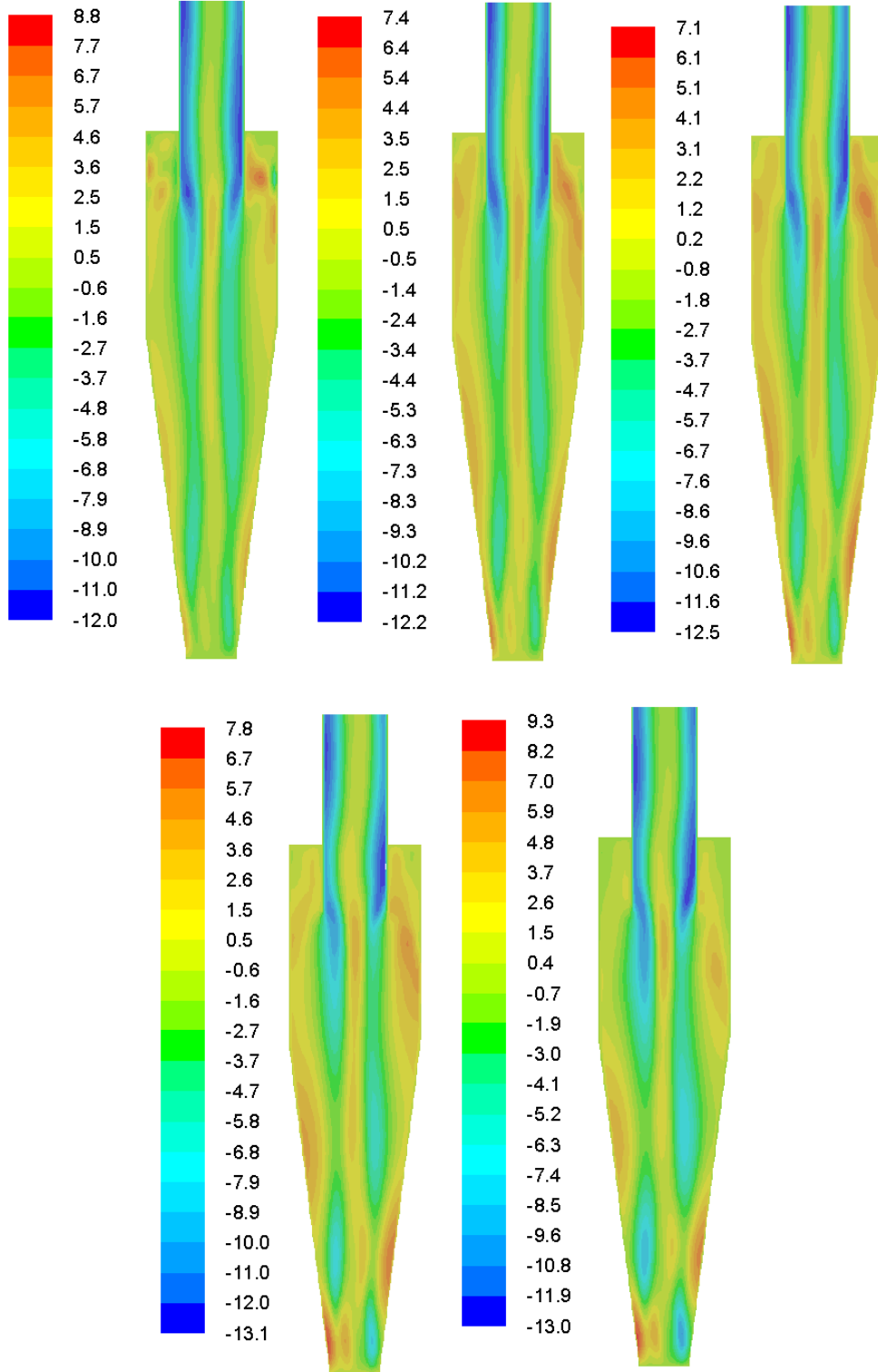
Şekil 3.41: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri (z=60 cm).



Şekil 3.42: 15 m/s Giriş Hızı için Eksenel Hız Profilleri (z=100 cm).

Teğetsel hızlarda olduğu gibi a/b oranı arttıkça eksenel hız artmaktadır. Şekil 3.40, 3.41 ve 3.42' dan görüleceği üzere dış girdaptaki artış ile partiküller aşağı doğru rahat bir şekilde sürüklenerek siklon tarafından tutulacak ve siklonun partikül toplama verimi artacaktır.

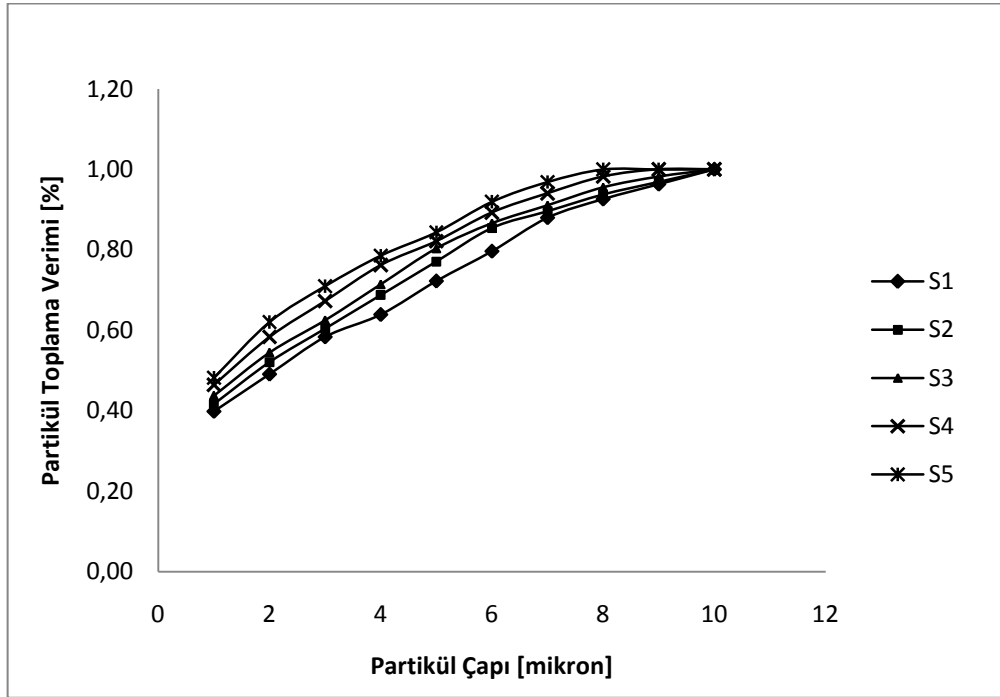
Şekil 3.43' de aksenal hız konturları görülmektedir.



Şekil 3.43: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Aksenal Hız Konturu.

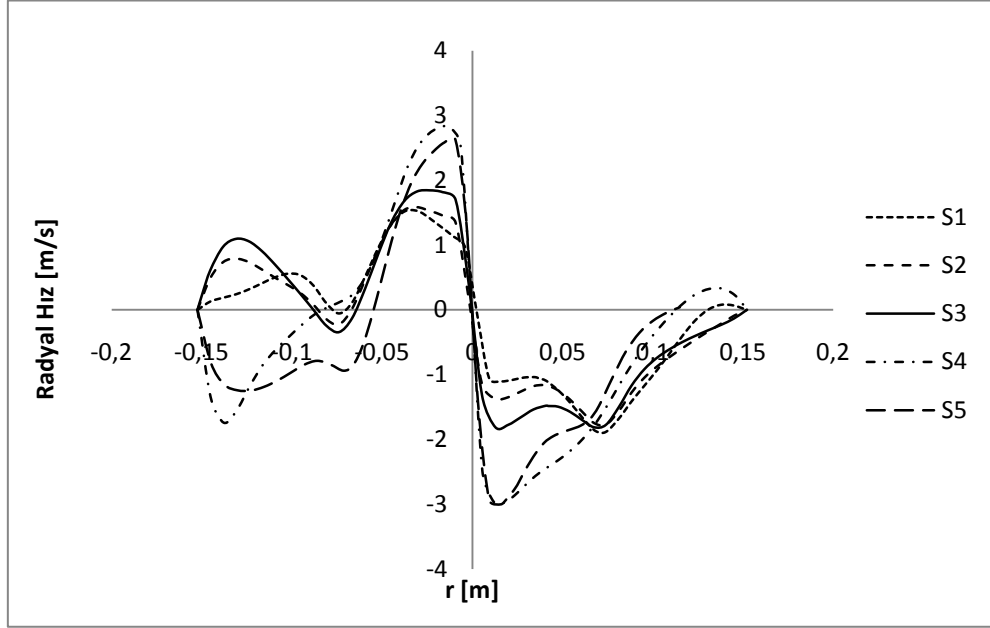
3.3.2.3. Sabit giriş kesiti ve debisinin partikül toplama verimi üzerine etkisinin incelenmesi

Partikül toplama verimlerinin hesabı için $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ sabit giriş debisi için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde $860 \text{ kg}/\text{m}^3$ yoğunluğa sahip partiküller kullanılmıştır. Partikül çapları 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve $10 \text{ }\mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.44' de görülmektedir.



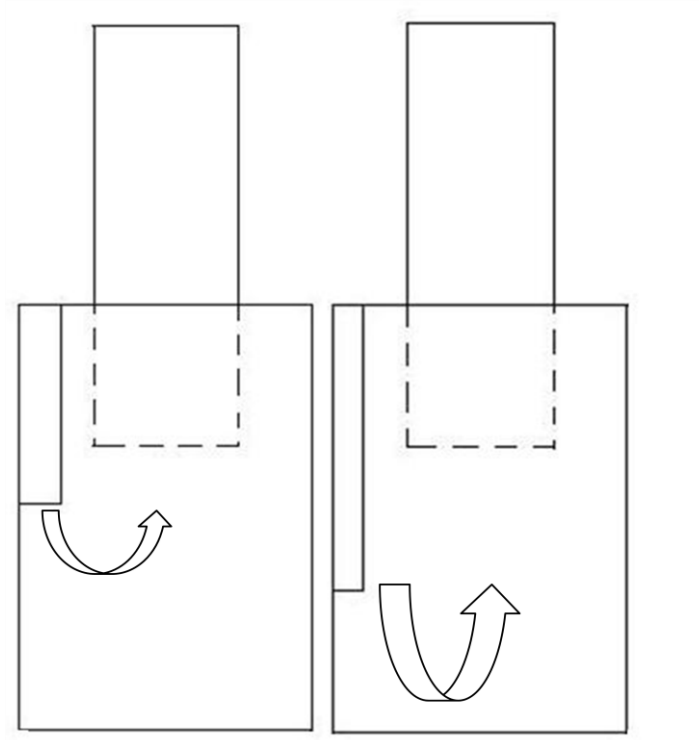
Şekil 3.44: S1, S2, S3, S4 ve S5 Siklonları için Partikül Toplama Verimleri.

Şekil 3.44' de görüldüğü gibi giriş kesitinin sabit tutularak a/b'nin artırılması ile partikül toplama veriminde artış elde edilmiştir. Bunun nedeni siklonda a boyunun uzaması ile beraber daha fazla partikülün direk olarak siklon silindir yüzeyine çarparak aşağı doğru ilerlemesidir. Ayrıca aksenal ve teğetsel hız profilleri de siklon verimi artırıcı yönde değişmiştir.



Şekil 3.45: a/b Oranının Radyal Hızlara Etkisi (z=20 cm)

Şekil 3.45’da radyal hızlar incelendiği zaman S4 ve S5 siklonlarından (Şekil 3.46) havanın kısa yol bularak dalma borusundan kaçtığı gözlemlenmiştir. Buda partikül toplama verimini azaltacaktır.



Şekil 3.46: S4 ve S5 Siklonlarında Akışkanın Kısa Yol Üzerinden Siklonu Terk Etmesi

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada teğetsel girişli Stairmand siklonunda hız ve basınç alanı Reynolds Stres Türbülans modeli ile çözülmüştür. Hesaplamalarda ticari bir HAD yazılımı olan Fluent kullanılmıştır. Analizler tek fazlı ve çift fazlı olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Tek fazlı analizlerde basınç kaybı ve hız profilleri hesaplanmış ve bulunan sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Çift fazlı analizlerde ise giriş kesitinin değişimi incelenmiş ve partikül toplama verimi üzerine etkisi belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında son derece yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Hesaplamalarda Slack ve ark. (2000) tarafından önerilen sayısal ağ yapısı kullanılmıştır. Bu ağ yapısında tüm geometri hexa elemanlar ile oluşturulmuştur. Siklonun iç bölgesi göreceli olarak daha küçük elemanlar ile oluşturularak iç girdabın doğru hesaplanması amaçlanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen teğetsel ve eksenel hız profilleri Ayers (1983) ile karşılaştırılmış ve son derece yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan sayısal ağ yapısı ile ilgili öneriler sunulmuştur.

Hesaplamalarda Reynolds Stres Türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model Slack ve ark. (2000), Gimbun ve ark. (2005) ve Karagöz ve Kaya (2009) tarafından kullanılmış ve girdaplı akışlar için uygun olduğu ifade edilmiştir. Tek fazlı akış analizlerinde elde edilen basınç kayıpları Dirgo ve Leith' in (1985) yaptığı deneysel çalışma ile karşılaştırıldığında çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma Reynolds Stres Türbülans modelinin girdaplı akışlar için uygunluğunu desteklemektedir.

Siklon içerisindeki akışın iç içe geçmiş iki girdap yapısından dolayı son derece karmaşıktır. Bu yüzden teğetsel ve aksenal hızların doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Siklon araştırmalarında geometrik parametrelerin değişimi akışın yapısını değiştirebileceğinden aksenal ve teğetsel hızların değişiminin incelenmesi gereklidir. Çünkü aksenal ve teğetsel hızlar direk olarak partikül toplama verimini etkilemektedir. Yapılan bu çalışmada giriş borusunun değişiminin basınç düşümü, hız profilleri ve partikül toplama verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Giriş kesiti temelde iki farklı şekilde ele alınmıştır. Birinci kısımda giriş kesit alanının değişimine izin verecek şekilde a ölçüsünün standart Stairmand siklonuna göre azalması yada artması durumu incelenmiştir. Standart Stairmand siklonunda a/D boyutsuz sayısı 0.5 iken yapılan çalışmada a/D için 0.3 ve 0.5 durumları incelenmiştir. Bu şartlarda 3 farklı model giriş debisi sabit olacak şekilde sayısal olarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre $a/D=0.3$ iken teğetsel hız artmaktadır. Bunun nedeni giriş kesitinin azalması ile giriş hızı artmış ve bu da merkezkaç kuvvetlerini artırmıştır. Merkezkaç kuvvetinin artması partikül toplama verimi üzerinde de etkili olacağından sabit giriş debi şartında a/D oranının azalması partikül toplama verimini artıracaktır. Aksenal hızlar incelendiği zaman teğetsel hızlarda olduğu gibi a/D oranı azaldıkça aksenal hız artmaktadır. Aksenal hız incelendiğinde dış girdaptaki artış ile partiküller aşağı doğru hızlı bir şekilde sürüklenerek siklon tarafından tutulacak ve siklonun partikül toplama verimi artacaktır. Ayrıca oluşturulan 3 farklı siklon geometrisi farklı giriş hızlarında çözümlenerek giriş hızının basınç kayıplarına olan etkisi incelenmiştir. Analizler 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s hızları için yapılmış ve a/D oranı arttıkça basınç kayıpları artmaktadır. Ayrıca a/D oranı büyüdükçe giriş hızının artışı ile basınç kayıplarındaki artış yükselmektedir. Bunlara ilave olarak yapılan çift fazlı analizler ile 3 siklondaki partikül toplama verimleri hesaplanmıştır. Lagrangian metodunu kullanan ayrık faz modeli ile yapılan analizlerde a/D oranının azalması siklon verimini artırmıştır. Bunun nedeni giriş hızının yüksek olmasından dolayı merkezkaç kuvvetinin artması ve partiküllerin cidara savrulurak dış girdap yardımı ile aşağı doğru sürüklenmesidir. Bulunan bu sonuç aksenal ve teğetsel hız profilleri ile de elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Yapılan çalışmanın devamında Stairmand siklonunun giriş kesiti sabit alınarak farklı a ve b değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre a kenarı artarken b kenarı da kesit alanı sabit kalacak şekilde azaltılmıştır. Giriş hızının etkisi incelendiğinde elde edilen basınç kayıpları 5 siklon için de yakın bulunmaktadır. Sabit giriş kesiti ve sabit debi şartında teğetsel hızlar incelendiğinde a/b oranı arttıkça teğetsel hızın arttığı görülmektedir. Bunun nedeni merkezkaç kuvvetlerinin artmasıdır. Merkezkaç kuvvetinin artması partikül toplama verimi üzerinde de etkili olacağından sabit giriş kesiti ve sabit debi şartında a/b oranının artması partikül toplama verimini artıracaktır. Teğetsel hızlarda olduğu gibi a/b oranı arttıkça aksel hız artmaktadır. Dış girdaptaki artış ile partiküller aşağı doğru hızlı bir şekilde sürüklenerek siklon tarafından tutulacak ve siklonun partikül toplama verimi artacaktır. Yapılan çift fazlı analizlerde giriş kesitinin sabit tutularak a/b' nin artırılması ile partikül toplama veriminde artış elde edilmiştir. Bunun nedeni siklonda a boyunun uzaması ile beraber standart Stairmand ölçüsüne göre daha fazla partikül siklon silindir yüzeyine çarpmış ve merkezkaç kuvveti ile de toz kutusuna doğru ilerleyerek tutulmuştur.

Yapılan bu çalışma ile siklon giriş kesitinin siklon performansı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar siklon giriş kesitinin siklon performansı üzerinde önemli mertebede etkili olduğunu göstermektedir. Ancak giriş etkisi verim ve basınç düşümüne etkisi doğrusal değildir. Ayrıca yüksek giriş kesitinde siklon içerisinde giren havanın yeteri kadar dönmeden çıkış borusundan kaçtığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı optimum giriş yüksekliğinin tespiti için diğer geometrik ölçülerinde hesaba katılması gerekmektedir.

Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak HAD analizleri araştırmacıların sık kullandıkları bir yöntem haline gelmiştir. Bu yöntemle siklonlarda basınç kaybı ve hız profillerinin tahmini hızlı ve güvenilir bir şekilde ulaşılabileceği yapılan çalışma ile gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışma ticari olarak kullanılan Fluent yazılımı ile çok fazlı bir akış analizinin nasıl yapılacağı ile ilgili detaylı bilgiler de içermektedir.

KAYNAKLAR

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

AVCI, A. and I. KARAGOZ. 2000. A Mathematical Model for the Determination of A Cyclone Performance, Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, 27(2): 263-272.

AVCI, A. ve I. KARAGOZ. 2001. Theoretical Investigation of Pressure Losses in Cyclone Separators. Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 28(1): 107-117.

AVCI, A. ve I. KARAGOZ. 2003. Effect of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators. Aerosol Science, 34: 937-955.

AYERS, W.H. 1983. Theoretical Modelling of Cyclone Performance, Filtech Conference.

AYERS, W.H., F. BOYSAN, J. SWITHENBANK and B.C.R. EWAN. 1985. Theoretical Modelling of Cyclone Performance, Filtration and Separation, 22(1): 39-43.

BARTH, W. 1956. Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheiden auf Grund neuerer Untersuchungen, BWK. 8: 1-9.

BARTH, W., L. LEINEWEBER. 1964. Evaluation of design of cyclone separators, Staub. Reinhalt. Luft, 24: 41-55.

BOHNET, M. 1995. Influence of the Gas Temperature on the Separation Efficiency of Aerocyclones. Che. Eng. and Pro., 34: 151-156.

BOYSAN, F., W.H. AYERS and J. SWITHENBANK. 1982. A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 60: 222-230.

CASAL, J. and J.M. MARTINEZ-BENET. 1983. A Better Way to Calculate Cyclone Pressure Drop., Chem.Eng., 99-108.

CHAN, T. and M. LIPPMAN. 1977. Particle Collection Efficiencies of Air Sampling Cyclones:An Ampirical Theory., Environ.Sci.Technol., 11: 377-382.

CHUAH, T.G., J. GIMBUN and S.Y.C. THOMAS. 2006. A CFD Study of the Effect of Cone Dimensions on Sampling Aerocyclones Performance and Hydrodynamics, Powder Tech., 162: 126-132.

CORTES, C., A. GIL. 2007. Modeling the Gas and Particle Flow Inside Cyclone Seperators, Progress in Energy and Combustion Science, 33: 409-452.

COKER, A.K.,1993. Understand Cyclone Design, Chem. Eng. Progr., 28: 51–55.

DIETZ, P. W. 1981. Collection efficiency of cyclone separators, AIChE J., 27: 888-892.

DIRGO, J. and D. LEITH. 1985. Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions, Aerosol Sci.Tecnol., 4: 401-411.

DIRGO, J.1988. Relationships Between Cyclone Dimensions And Performance, Doctoral Thesis, Havarad University, USA.

DYKE, M. VAN. 1982. An Album of Fluid Motion. The Parabolic Press, 177 p.

FRASER, S.M., A. M. ABDEL RAZEK and M.Z. ABDULLAH. 1997. Computational and Experimental Investigations in a Cyclone Dust Seperator, ProQuest Science Journals, 211(4): 247.

GIBSON, M. M. and B.E. LAUNDER. 1978. Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 86(3): 491-511.

GIL, A., C. CORTES, L.M. ROMEO and J. VELILLA. 2002. Gas-Particle Flow Inside Cyclone Diplegs with Pneumatic Extraction, *Pow. Technol.*, 128: 78–91.

GIMBUN, J., T.G. CHUAH, A. FAKHRU'L-RAZI and S.Y. CHOONG THOMAS. 2005. The Influence of Temperature and Inlet Velocity on Cyclone Pressure Drop: A CFD Study, *Chem.Eng. Process.*, 44: 7–12.

GIRIFITHS, W.D. and F. BOYSAN. 1996. Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modeling of the Performance of A Number of Cyclone Samplers, *J. Aerosol Sci.*, 27: 281-304.

GONG, A.L. and L.Z.E. WANG. 2004. Numerical Study of Gas Phase Flow in Cyclones with the Repds., *Aerosol Science and Tec.*, 38: 506-512.

HOEKSTRA, A.J., J.J. DERKSEN and H.E.A. VAN DEN AKKER. 1999. An Experimental and Numerical Study Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones, *Chem. Eng. Sci.*, 54: 2055-2065.

HOFFMAN, A.C., M. DE GROOT, W. PENG, H.W.A. DRIES and J. KATER. 2001. Advantages and Risks in Increasing Cyclone Seperatore Length, *AIChE Journal*, 47(11): 2452-2460.

HOFFMAN, A.C. and E.S. LOUIS. 2008. *Gas Cyclones and Swirl Tubes*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg.

IOZA, D.L. and D. LEITH. 1989. Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency, *Aerosol Sci.Technol.*, 12: 598-606.

IOZA, D.L. and D. LEITH. 1990. The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency, *Aersol Sci. Technol.*, 12: 598-606.

KARAGÖZ, İ. ve A. AVCI. 2005. Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Seperators. *Aerosol Sci Technol.*, 39(9): 857-865.

KARAGÖZ, İ. ve F. KAYA. 2007. CFD Investigation of the Flow and Heat Transfer Characteristics in A Tangential Inlet Cyclone, *Int. Com. in Heat and Mass Trans.*, 34(9-10): 1119-1126.

KARAGÖZ, İ. ve F. KAYA. 2009. Numerical Investigation of Performance Characteristics of A Cyclone Prolonged with A Dipleg, *Chemical Engineering Journal*, 151: 39-45.

KAYA, F. ve İ. KARAGOZ. 2007. Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi, *Uludag Üni.Müh.-Mim.Fak.Dergisi*, 1:85-96.

KAYA, F. ve İ. KARAGOZ. 2008. Performance Analysis of Numerical Schemes in Highly Swirling Turbulent Flows in Cyclones, *Current Sci.*, 94(10):1273-1278.

KOLMOGOROV, A.N.A. 1941a. Dissipation of Energy in Locally Isotropic Turbulence, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 32: 19-21.

KOLMOGOROV, A.N.A. 1941b. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 30: 299-303.

LAPPLE, C.E. 1951. Processes Use Many Collector Types, *Chem. Engineering*, 58: 144-151.

LAUNDER, B.E., G.J. REECE and W. RODI. 1975. Progress in the Development of a Reynold Stress Turbulence Closure, *J. Fluid.Mech.*, 68(3):537-566.

LAUNDER, B.E and D.B. SPALDING. 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London.

LAUNDER, B.E. 1989a. Second-Moment Closure and Its Use in Modelling Turbulent Industrial Flows, International Journal of Numerical Methods in Fluids, 9: 963-985.

LAUNDER, B.E. 1989b. Second-Moment Closure: Present...and Future? , Inter. J. Heat Fluid Flow, 10(4): 282-300.

LEITH, D. and W. LICHT. 1972. The Collection Efficiency of Cyclone the Particle Collectors New Theoretical Approach, AIChE Symp.Ser., 68: 196-206.

LIDEN, G. and A. GUDMUNDSSON. 1997. Semi-Empirical Modeling to Generalise The Dependence of Cyclone Collection Efficiency on Operating Conditions and Cyclone Design. J. Aerosol Sci., 28: 853-874.

LIDEN, G. and L.C. KENNY. 1991. Comparison of Measured Respirable Dust Sampler Penetration Curves With Sampling Conventions, Annals of Occupational Hygiene, 35: 485–504.

LIEN, F.S. and M.A. LESCHZINER. 1994. Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure, Computers and Fluids, 23(8): 983-1004.

MCDONALD, P.W. 1971. The Computation of Transonic Flow through Two-Dimensional Gas Turbine Cascades, ASME Paper 71-GT-89, Gas Turbine Conference and Products Show, Houston, Texas.

MACCORMACK, R. W. and A. J. PAULLAY. 1972. Computational Efficiency Achieved by Time Splitting of Finite Difference Operators, AMA, 72, 154.

MORSI, S.A. and A.J. ALEXANDER. 1972. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, *J. Fluid Mech.*, 55(2): 193-208.

MOTHES, H. and F. LÖFFLER. 1988. Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators, *Int. Chem. Eng.*, 28: 231–240.

MUSCHELKNAUTZ, E. 1970. Auslegung Von Zyklonabscheidern in Der Technischen Praxis, *Staub Reinhalt*, 30:187–195.

PATANKAR, S.V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corp., New York, 197 p.

RAMACHANDRAN G., D. LEITH, J. DIRGO and H. FELDMAN. 1991. Cyclone Optimization Based on a New Empirical Model for Pressure Drop, *Aerosol Science and Technology*, 15: 135- 148.

REYNOLDS, O. 1895. On the Dynmical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 186, 123.

RHODES, M. 2008. *Introduction to Particle Technology*, John Wiley & Sons Ltd., England, 450 p.

RICHARDSON, L.F. 1927. The Deffered Approach to the Limit, *Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 226: 229-361.

RIZZI, A. W. and M. INUOYE. 1973. Time Split Finite Volume Method for 3D Blunt Body Flows, *AIAA J.*, 11: 1478-1485.

SHEPHERD, G.B. and C.E. LAPPLE. 1939. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors, *Ind. Eng. Chem.*, 31.

SLACK, M.D., R.O. PRASAD, A. BAKKER and F. BOYSAN. 2000. Advances in Cyclone Modeling Using Unstructured Grids, *Chemical Engineering Research and Design*, 78(8): 1098-1104.

TENNEKES, H. and J.L. LUMLEY. 1972. *A First Course in Turbulence*, The MIT Press, England, 300 p.

WANG, J.J., L.Z. WANG and C.W. LIU, 2005. Effect of a Stick on the Gas Turbulence Structure in a Cyclone Separator, *Aerosol Science and Technology*, 39:713–721.

WILCOX, D.C. 1994. *Turbulence Modelling for CFD*, La Canada, California: DCW Industries, Inc.

XIANG, R., S.H. PARK and K.W. LEE. 2001. Effects of Cone Dimension on Cyclone Performance, *J. Aerosol Sci.*, 32: 549–561.

XIANG, R.B., and K.W. LEE. 2005. Numerical study of flow field in cyclones of different height, *Chemical Engineering and Processing*, 44:877–883.

ZHU, Y. And K.W. LEE. 1999. Experimental Study on Small Cyclones Operating at High Flow Rates, *J. Aerosol Sci.*, 30: 1303–1315.

ÖZGEÇMİŞ

9 Ocak 1980'de Ankara'da doğan Mehmet TEKE, ilk, orta ve lise eğitimini Ankara'da tamamlamıştır. 1997 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başlamıştır. 2001 yılında bu bölümden, Termodinamik Bilim dalından mezun olmuştur. 2002 Aralık döneminde Kısa dönem Er olarak askerlik hizmetini tamamlamıştır. Eylül 2003 ve Mayıs 2005 yılları arasında PRESMAK A.Ş' de proje mühendisi olarak çalıştıktan sonra FİGES A.Ş' ye geçmiştir. Bu firmada CFD Proje ve Uygulama Mühendisi olarak göreve başlamıştır. 2009'un başından itibaren CFD Projeler Sorumlusu olarak halen görevini sürdürmektedir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başladığım günden itibaren her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile çalışmamı yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ' e teşekkür ederim. Ayrıca çalıştığım konu ile ilgili olarak bilgilerini esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Atakan AVCI 'ya teşekkür ederim. Tez süresi boyunca gösterdikleri anlayış ve desteklerinden dolayı, Genel Müdürümüz sayın Dr. Tarık ÖĞÜT' e ve FİGES A.Ő. çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Tezi tamamlama sürecinde bana verdiği manevi destekten ötürü eşim Şengül TEKE'ye teşekkür ederim. Son olarak beni bu günlere getiren aileme teşekkür ederim.