

**EKSENEL SIKLON AYIRICILARIN PERFORMANS
PARAMETRELERİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Emre ORUÇ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKSENEL SİKLON AYIRICILARIN PERFORMANS PARAMETRELERİNİN
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Emre ORUÇ
0000-0003-0825-5625

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Emre ORUÇ tarafından hazırlanan “Eksenel siklon ayırıcıların performans parametrelerinin sayısal olarak incelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Başkan : Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(orcid id: 0000-0002-7442-2746)
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Prof. Dr. Atakan Avcı
(orcid id: 0000-0002-5985-2449)
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Dr.Öğ.Üy. Furkan SÖKMEN
(orcid id: 0000-0001-8647-4861)
Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri
Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Hüseyin AKSEL EREN
Enstitü Müdürü

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

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../2020

Emre ORUÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKSENEL SIKLON AYIRICILARIN PERFORMANS PARAMETRELERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Emre ORUÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Akışkanlar dinamiğinin en önemli konularında biri de hiç kuşkusuz iki faza sahip olan akış modellerini incelemektir. Siklon ayırıcılar da genel olarak iki fazlı akışa sahip yapılardır. Teorik olarak akış parametrelerini belirlemek çok uzun ve çok fazla hesaplama gerektirse de bilgisayarların gelişmesi ile CFD temelli çözümler ile analizler çok daha kolay, hızlı ve kabul edilebilir hatalar ile sonuçlar vermektedir.

Yaptığımız bu çalışmada da eksenel bir siklon ayırıcının performans parametreleri CFD temelli ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent ile incelenmiştir. Bir, iki ve üç tur spiral sayısına sahip olan üç farklı eksenel siklon ayırıcının farklı giriş hızlarında, partikül toplama verimi ve basınç kayıpları üzerine etkileri analiz edilmiştir. Yapılan analizler tek fazlı ve iki fazlı olarak gerçekleştirilmiştir ve türbülans modeli olarak Reynold Stress Model (RSM) kullanılmıştır. Farklı helis açısına sahip siklon modelleri tasarlanmış ve incelenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre eksenel siklon ayırıcı içerisine giren akışkanın hızının ve helis açılarının siklon ayırıcının toplama verimi ve basınç kayıpları üzerine çok büyük ölçüde etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca 0,1 µm den 10 µm ye kadar olan partikül boyutları için de bu durumlar gözlemlenmiş, sonuçlar eşdeğer boyutta teğetsel siklonlarla mukayese edilmiştir. Yapılan bu çalışma optimum eksenel siklon ayırıcı çeşidini saptamak için yardımcı olabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Eksenel siklon ayırıcı, helis açısı, giriş hızı, CFD, toplama verimi, basınç kaybı, partikül boyutu

2020, ix + 102 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

NUMERICAL INVESTIGATION OF PERFORMANCE PARAMETERS IN AXIAL CYCLONE SEPARATOR

Emre ORUÇ

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

One of the most important issues in fluid dynamics is undoubtedly to examine flow models that have two phases. Cyclone separators are generally structures with two phases. Although theoretically determining flow parameters is very long and requires a lot of calculation, with the development of computers, analysis with CFD based solutions gives results with much easier, faster and acceptable errors.

In this study, the performance parameters of an axial cyclone separator were examined with ANSYS Fluent 19.1, a commercial software based on CFD. The effects of three different axial cyclone separators having one, two and three rounds of spiral numbers on particle collection efficiency and pressure losses at different inlet velocities were analyzed. The analyzes were carried out as single-phase and two-phase and Reynold Stress Model (RSM) was used as the turbulence model. Cyclone models with different helix angles have been designed and studied.

According to the results of the analysis, it has been concluded that the velocity and helix angles of the fluid entering the axial cyclone separator have a great influence on the collection efficiency and pressure losses of the cyclone separator. In addition, for the particle from 0.1 μm to 10 μm , these conditions have been observed, the results are compared with equivalent tangential cyclones. This study can help to determine the optimum axial cyclone separator type.

Key words: Axial cyclone separator, helix angle, inlet velocity, CFD, collection efficiency, pressure drop, particle size

2020, ix + 102 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım süresince, yoğun çalışma programına rağmen engin bilgi ve tecrübeleri ile yardım ve desteğini asla esirgemeyen, çalışmalarım boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda beni sabırla dinleyip yol gösteren, hayat boyu örnek alacağım danışman hocam sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan, bana inanan, sabrını ve desteğini asla esirgemeyen Merve EMİR' e, maddi ve manevi her zaman arkamda olan ve beni motive eden babam Şaban ORUÇ' a ve annem Fatma ORUÇ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak karşılaştığım sorunları aşmamda bilgi ve tecrübeleri ile her zaman bana yardımcı olan Ali SAKİN' e, yüksek lisans eğitimime başladığım andan bu yana her konuda bana yardımcı olan Mehmet Erman ÇALIŞKAN' a ve Ebubekir BEYAZOĞLU'na ve bu çalışmanın ortaya çıkmasında maddi ve manevi emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

Emre ORUÇ
.../.../2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Siklon Tipleri Ve Çalışma Prensipleri.....	9
2.2. Siklon Uygulamaları.....	12
2.3. Siklon Performansını Etkileyen Faktörler.....	13
2.4. Vorteks Akıslarda Kuvvetler.....	15
2.5. Santrifüj kuvvetler.....	16
2.6. Basınç Düşüşü.....	16
2.7. Toplam Ayrıştırma Verimi.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği.....	18
3.2. CFD Kavramı.....	19
3.2.1. Sonlu Hacimler Yöntemi.....	20
3.2.2. Sonlu Farklar Yöntemi.....	23
3.3. CFD Yönteminde Kullanılan Bazı Türbülans Modelleri.....	24
3.3.1. Türbülans modelinin seçilmesi.....	24
3.3.2. k-epsilon Türbülans Modeli.....	25
3.3.3. k- ω Türbülans Modeli.....	27
3.3.4. Reynolds Stress Model (RSM).....	28
3.3.5. Siklon Ayırıcı Modelin Oluşturulması.....	30
3.3.6. Siklon Ayırıcı İçin Çözüm Ağının Oluşturulması.....	31
3.3.7. Sınır Şartları.....	34

3.3.8. DPM (Discrete phase models)	36
4. BULGULAR	37
4.1. Siklonlarda Toplama Verimi	38
4.1.1. Model 1 için Toplama Verimi Sonuçları	38
4.1.2. Model 2 için Toplama Verimi Sonuçları	44
4.1.3. Model 3 için Toplama Verimi Sonuçları	48
4.2. Helis Açısının Toplama Verimine Etkisi	57
4.2.1. Helis Açısının Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimine Etkisi.....	58
4.2.2. Eksenel Siklon Ayırıcıda Kritik Çap ve Fraksiyonel Verim.....	67
4.3. Siklon Ayırıcı Modellerin Fiziksel Davranışlarının İncelenmesi	71
4.4. Basınç Kayıpları.....	86
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	96
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
dk	Kritik partikül çapı
U	Hız (m/s)
μ	Viskozite (Pa.s)
ε	Türbülans Edy dissipasyonu
Γ	Yayınım katsayısı
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
g	Yer çekimi ivmesi (m/s ²)
p	Basınç (Pa)
\vec{v}	Hız vektörü
\vec{A}	Yüzey alan vektörü
f	Yüzeyden oluşan kütle akışı
h	Siklon silindir yüksekliği
x, y, z	Kartezyen koordinat takımı
i, j, k	Kartezyen koordinat bileşenleri
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)

Kısaltmalar	Açıklama
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamic
CPU	Central Processing Unit
DPM	Discrete Phase Model
HAD	Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Large Eddy Simulation
RSM	Reynold Stress Model
RSTM	Reynold Stress Transport Modelling

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Siklon Ayırıcı Çalışma Prensibi	10
Şekil 2.2. Akışkan Eksenine Göre Başlıca Siklon Modelleri.....	13
Şekil 3.1. Bir CFD çalışmasında izlenmesi gereken sürecin Algoritması	20
Şekil 3.2. Hesaplanacak acmin kontrol hacimlerine bölünmesinin şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.3. Skaler Transport Denkleminin Ayırıklaştırılmasını Belirtmek İçin Kullanılan Kontrol Hacmi.....	22
Şekil 3.4. a) ZUSF zaman diyagramı, b) İki boyutlu Kartezyen koordinatlarda birim Yee hücresi.....	24
Şekil 3.5. Farklı Helis Açılarına Göre Modellenmiş Siklon Ayırıcıların Teknik Resim Görüntüsü.....	31
Şekil 3.6. Her Bir Model İçin Oluşturulan Ağ Yapıları (Mesh) Gösterimi	32
Şekil 3.7. Mesh Yapısının Detaylı Gösterimi	32
Şekil 4.1. Model 1, Giriş Hızı 5 m/s için toplama verimi eğrisi	41
Şekil 4.2. Model 1, Giriş Hızı 10 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	41
Şekil 4.3. Model 1, Giriş Hızı 15 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	42
Şekil 4.4. Model 1 için Farklı Giriş Hızlarında Verim Eğrisi.....	42
Şekil 4.5. Model 1 için 4 mikronluk Partikül Boyutunda Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi.....	43
Şekil 4.6. Model 2, Giriş Hızı 5 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	46
Şekil 4.7. Model 2, Giriş Hızı 10 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	46
Şekil 4.8. Model 2, Giriş Hızı 15 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	47
Şekil 4.9. Model 2 için Farklı Giriş Hızlarında Verim Eğrisi.....	47
Şekil 4.10. Model 2 için 4 mikronluk Partikül Boyutunda Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi.....	48
Şekil 4.11. Model 3, Giriş Hızı 5 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	51
Şekil 4.12. Model 3, Giriş Hızı 10 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	51
Şekil 4.13. Model 3, Giriş Hızı 15 m/s için Toplama Verimi Eğrisi	52
Şekil 4.14. Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Verim Eğrisi.....	52
Şekil 4.15. Model 3 için 4 mikronluk Partikül Boyutunda, Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi	53
Şekil 4.16. Toplam Toplama Verimi Grafiği.....	54
Şekil 4.17. Toplam Toplama Verimlerinin Deneysel Ve Numerik Olarak Karşılaştırılması	55
Şekil 4.18. Model 1, Model 2 ve Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi Eğrileri.....	62
Şekil 4.19. 4 µm Boyutunda Olan Partiküller için Farklı Model ve Hızlarda Toplama Verimi.....	64
Şekil 4.20. Tüm modeller için Her bir giriş hızındaki farklı partikül büyüklüklerinde toplama verimleri gösterimi	66
Şekil 4.21. Model 1 için fraksiyonel verim eğrileri	68
Şekil 4.22. Model 2 için Fraksiyonel Verim Eğrileri.....	69
Şekil 4.23. Model 3 için Fraksiyonel Verim Eğrileri.....	69
Şekil 4.24. Siklon Ayırıcı İçerisinde Belirlenen Yüzey (Temsili).....	71

Şekil 4.25. Model 1 için $V= 5$ m/s, $V= 10$ m/s ve $V=15$ m/s Giriş Hızlarında Siklon İçerisindeki Akışkanın Genel, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenlerinin Kontur Gösterimi.....	72
Şekil 4.26. Model 2 için $V= 5$ m/s, $V= 10$ m/s ve $V=15$ m/s Giriş Hızlarında Siklon İçerisindeki Akışkanın Genel, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenlerinin Kontur Gösterim.....	73
Şekil 4.27. Model 3 için $V= 5$ m/s, $V= 10$ m/s ve $V=15$ m/s Giriş Hızlarında Siklon İçerisindeki Akışkanın Genel, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenlerinin Kontur Gösterimi.....	74
Şekil 4.28. Siklon ayırıcı içerisinde sanal olarak çizilen doğrular (Soldan sağa 1,2,3).....	75
Şekil 4.29. Model 1, Giriş Hızı 5 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	76
Şekil 4.30. Model 1, Giriş Hızı 10 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	77
Şekil 4.31. Model 1, Giriş Hızı 15 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	78
Şekil 4.32. Model 2, Giriş Hızı 5 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	79
Şekil 4.33. Model 2, Giriş Hızı 10 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	80
Şekil 4.34. Model 2, Giriş Hızı 15 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	81
Şekil 4.35. Model 3, Giriş Hızı 5 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	82
Şekil 4.36. Model 3, Giriş Hızı 10 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	83
Şekil 4.37. Model 3, Giriş Hızı 15 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri	84
Şekil 4.38. Model 1 İçin Basınç Konturları Gösterimi	87
Şekil 4.39. Model 2 İçin Basınç Konturları Gösterimi	87
Şekil 4.40. Model 3 İçin Basınç Konturları Gösterimi	88
Şekil 4.41. Model ve Giriş Hızına Göre Giriş ve Çıkış Arası Basınç Farkları Sütun Grafik Üzerinde Gösterimi	89
Şekil 4.42. Model 1 için Farklı Giriş Hızlarında Statik Basınç Eğrileri	90
Şekil 4.43. Model 2 için Farklı Giriş Hızlarında Statik Basınç Eğrileri	91
Şekil 4.44. Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Statik Basınç Eğrileri	92
Şekil 4.45. Farklı Giriş Hızlarında Deneysel ve Numerik Sonuçların Karşılaştırılması... ..	94
Şekil 4.46. Farklı Hızlarda Farklı Siklon Ayırıcıların K Boyutsuzu Değişimi.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Siklon Ayırıcı Modellerin Ağ Yapılarının Genel Bilgileri	33
Çizelge 3.2. Her Bir Model için Sınır Şartları	34
Çizelge 3.3. Çözüm Yöntemi Parametreleri	35
Çizelge 3.4. DPM (Discrete Phase Model) parametrelerinin gösterimi.....	36
Çizelge 4.1. Model 1, 5 m/s için analiz verileri	39
Çizelge 4.2. Model 1, 10 m/s için Analiz Verileri	39
Çizelge 4.3. Model 1, 15 m/s için Analiz Sonuçları	40
Çizelge 4.4. Model 2, Giriş Hızı = 5 m/s için Analiz Sonuçları	44
Çizelge 4.5. Model2, Giriş Hızı = 10 m/s için Analiz Sonuçları	45
Çizelge 4.6. Model 2, Giriş Hızı = 15 m/s için Analiz sonuçları.....	45
Çizelge 4.7. Model 3, Giriş Hızı = 5 m/s için Analiz Sonuçları	49
Çizelge 4.8. Model 3, Giriş Hızı = 10 m/s için Analiz Sonuçları	49
Çizelge 4.9. Model 3, Giriş Hızı = 15 m/s için Analiz Sonuçları	50
Çizelge 4.10. Deneysel ve Numerik Çalışmaların Toplam Toplama Verimleri	54
Çizelge 4.11. Giriş Hızı V= 5 m/s Olan Analizler için Helis Açılarının Toplama Verimine Etkisi	59
Çizelge 4.12. Giriş Hızı V= 10 m/s Olan Analizler için Helis Açılarının Toplama Verimine Etkisi....60	60
Çizelge 4.13. Giriş Hızı V= 15 m/s Olan Analizler için Helis Açılarının Toplama Verimine Etkisi	61
Çizelge 4.14. 4 µm Boyutunda Olan Partiküller için Farklı Model ve Hızlarda Toplama Verimi Sonuçları.....	64
Çizelge 4.15. KARAKAŞ (2020) 'ye Göre Teğetsel Siklonun Deneysel Çalışma Verileri	67
Çizelge 4.16. Farklı modellerdeki aksenal siklon ayırıcılar için Kritik çap ve d/dk oranları.....	68
Çizelge 4.17. Model ve Giriş Hızına Göre Giriş ve Çıkış Arası Basınç Farkları	89
Çizelge 4.18. Deneysel ve Numerik Verilerin Farklı giriş Hızlarında Sonuçları	93
Çizelge 4.19. Farklı Boyutlardaki Siklon Ayırıcılar İçin Farklı Giriş Hızlarında K Boyutsuzu Tablosu.....	95

1. GİRİŞ

Siklon ayırıcılar gaz-katı fazında akışkan içerisinde var olan toz partiküllerini ayırmak amacıyla kullanılan yapılardır. Uzun yıllar boyunca maden ve mineral endüstrisinde kullanılmaktadır. Siklon ayırıcılar genel olarak mekanik sistemlerdir ve tek parçadan var olmaktadır. Akışkana siklon ayırıcı içerisinde bir merkez kaç kuvveti oluşturulmaktadır ve bu kuvvet etkisi altında siklon çeperlerinde sürtünmeye bağlı olarak moment kuvvetlerini yitiren toz partiküllerinin farklı bir toz toplama bölgesinde hapsedilmesine bağlı olarak çalışan sistemlerdir. Bu prensibe bağlı olarak siklonlar üç ana bölgeden oluşur. Bunlar giriş bölgesi, siklon iç hacmi ve toz toplama kabı olarak nitelendirilirler. Bu amaç doğrultusunda endüstride çok çeşitli alanlarda sıkça tercih edilen yapılardır.

Siklonlarda çoğunlukla hareketli parçalar bulunmaz. Genel olarak siklonlarda gaz giriş kısmından hemen sonra bir vorteks oluşturucu bölge, temizlenen gazın tahliye edileceği yer ve ayrıştırılan partiküllerin toplanacağı bir bölge olmalıdır. Kullanım yerlerine göre bu bölgeler siklon tasarımlarında farklılıklar gösterir. Çok çeşitli siklon modelleri olmasına rağmen endüstrilerde genel olarak kullanılan siklon modeli teğetsel girişi ve aksenal çıkışı olan modellerdir. Bu modele ters akışlı siklonlar denir. Ters akışlı siklonların yanı sıra bazı durumlarda özellikle kullanım yeri bakımından çok daha uygun olan aksenal siklon ayırıcı modelleri tercih edilir. Bu çalışmada da aksenal akış ile çalışan aksenal siklon ayırıcının farklı parametreleri üzerinde hangi etkiler sergilediğini matematiksel bir yöntemle dayanan CFD (Computational Fluid Dynamic) metodu ile bulmak hedeflenmiştir. Türkçe literatürde HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) olarak ta geçmektedir.

Eksenal akışlı bir siklon ayırıcı modelini teğetsel akışlı siklonlardan ayıran en temel özellik içlerinde genel olarak bir vorteks oluşturucu bulundurmalarıdır. Teğetsel akışlı siklonlarda akışkan (gaz-partikül karışımı) siklon gövdesine teğet olacak şekilde giriş yapmaktadır. Bu sayede siklon gövdesinin iç çeperlerinden aşağı doğru bir girdap oluşturmaktadır. Bu sayede çeperler boyunca bir merkezkaç kuvveti oluşur ve partiküller burada hareket enerjilerini kaybederler ve siklonun alt kısmında bulunan toplama noktasında hapsedilirler. Eksenal siklonlarda ise akışkan siklon gövdesine gövde boyunca

dik açı ile direk olarak girdiği için bir vorteks kazanma şansı bulunmamaktadır. Bu nedenle aksenal siklonlarda vorteks oluşturucular kullanılmaktadır. Bu sayede gövde iç çeperleri üzerinde ve gövdenin içerisinde bir vorteks bölgesi oluşur. Bu vorteks etkisi ile siklon içerisine giren gaz-katı karışımı, katı partiküllerin çeperler üzerinde hareketi esnasında enerjisini kaybederek partikül toplama bölgesine tahliyesi sağlanır. Bu vorteks oluşturucular ise çok çeşitli ve farklı şekillerde tasarlanır. Bu özellikleri sayesinde aksenal siklonlar herhangi bir hat üzerinde de (boru, tek yöne akış bölgesi vb.) kullanım olarak teğetsel siklona göre üstünlük kazanır. Fakat tasarımındaki bazı kompleks bölgelerden dolayı (örneğin vorteks oluşturucular vb.) teğetsel siklonları daha popüler hale getirmiştir.

Vorteks oluşturucuların tasarımındaki farklılıklar, aksenal çalışan siklonun içerisinde oluşan vorteks bölgelerindeki vorteks şekillerini değiştirmektedir. Bu nedenle vorteks oluşturucunun tasarımı da aksenal bir siklonun toplam verimine büyük ölçüde etki etmektedir. Genel olarak bir siklon ayırıcının performansını belirleyen birkaç farklı parametre mevcuttur. Bu parametreler, siklon ayırıcının toplam toplama verimi, basınç kaybı fraksiyonel verimi olarak belirtilebilir. Bu parametreler ışığında birçok farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler farklı siklon boyutları, farklı siklon giriş kesitleri, farklı siklon tipleri, farklı giriş açıları, birden fazla faz için içeriğindeki farklı konsantrasyonlardaki partiküller, farklı gaz ya da sıvı debisi, farklı ortam şartları ve deney içerisinde farklı konfigürasyonlar denenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Siklon ayırıcılar her ne kadar karmaşık sistemler gibi görünmese de performanslarını etkileyen birçok farklı parametreye sahiplerdir. Birçok araştırmacı bu parametrelerin siklon ayırıcıların performanslarını nasıl etkilediklerini araştırmışlar ve birçok farklı deneysel ve numerik çalışmalarda bulunmuşlardır. Yapılan deneysel ve numerik çalışmaların sonucunda siklon ayırıcıların toplama verimi, basınç kayıpları, sınıflandırma verimi gibi farklı performans parametrelerinin, siklon ayırıcıları hangi şartlarda nasıl etkilendiğini tespit etmişlerdir. Eksenel siklon ayırıcılar için yapılan bazı çalışmalar ise Gong ve ark. (2012) tarafından yapılan ve eksenel siklon ayırıcılarda helis açısının toplama verimi ve basınç düşüşlerine etkisini, (Luan ve ark. 2014) yaptıkları çalışmalarında rezistanların eksenel siklon ayırıcılar üzerindeki performans etkisini ve Wu ve ark. (2016)'da yaptıkları çalışma ile eksenel siklon ayırıcılarda çıkış borusunun farklı konstrüksiyonları ile performans etkilerini incelemişlerdir.

Dirgo ve Leith (1985) deneysel ve teorik olarak yaptıkları çalışmalarında Stairmand tarzı siklon ayırıcı modeli incelemişlerdir. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalarda sınır şartı olarak 860 kg/m³ yoğunlukta ve boyutları 1 mikrondan 7 mikrona kadar olan partiküller kullanmışlardır. Ayrıca giriş hızı olarak 5, 10, 15, 20 ve 25 m/s olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel ve teorik çalışmaların sonucuna göre Bart ve Leith-Lich teorileri teğetsel girişli siklonlarda daha iyi sonuçlar verirken Lapple ve Dietz teorilerinin verileri kabul edilebilir değerlerin dışında tespit edilmiştir.

Griffiths ve Boysan (1996) yaptıkları numerik çalışma ile üç farklı siklon ayırıcı modeli incelemişlerdir. Siklon ayırıcısının toplama performansını ve basınç düşümünü deneysel ve teorik kaynaklar ile kıyaslamışlardır. Buldukları sonuçlara göre oluşturdukları CFD analizlerinin deneysel ve teorik olan çalışmalar ile uygun gösterdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca üç farklı ampirik model ile yaptıkları kıyaslamalar sonucu mini siklonlar için

Barth modelinin diğer modellere göre daha iyi sonuçlar verdiğini ve büyük siklonlarda da Iozia ve Leith modellerinin daha efektif olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhu ve Lee (1999) yaptıkları deneysel çalışmalarında mini siklonları incelemişlerdir. Yedi farklı modelde siklon ayırıcıyı test etmişler ve siklon ayırıcıların toplama verimini ve basınç düşüşlerini test etmişlerdir. Ayrıca yedi farklı model ile siklon ayırıcıların farklı silindir boyu ve farklı çıkış borusu uzunluğunun siklon ayırıcılar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu verilere göre siklon ayırıcı içerisine giren akışkanın hızı arttıkça toplama veriminin arttığını ayrıca silindir boyunun uzaması ile de toplama veriminin arttığını gözlemlemişlerdir. Çıkış borusundaki kısıtlığın ve silindir boyundaki uzamanın basınç düşüşlerini azalttığını tespit etmişlerdir.

Slack ve ark (2000) Starimand tipi siklon üzerinde RSTM ve LES (Large Eddy Simulation) türbülans modellerini kullanarak numerik çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları deney sonuçlarını literatürde yapılmış deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda RSTM için uygun mesh ağ yapısı ve düğüm noktaları sayıları önerilmiştir. LES için daha hassas ağ yapıları yapılsa da çıkan sonuçlarda RSTM türbülans modeli ve LES türbülans modeli sonuçlarının bir birine çok yakın sonuçlar verdiklerini gözlemlemişlerdir. Fakat RSTM türbülans modeli LES türbülans modeline göre çok daha hızlı ve neredeyse aynı hassasiyette sonuçlar vermekte olduğunu ortaya koymuşlardır.

Avcı ve Erel (2003) yaptıkları çalışmalarında Siklon boyunun, siklon verimine etkisini araştırmışlardır. Siklon uzunluğunun arttıkça siklon verimini arttırmadığını, aksine siklon veriminin azaldığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları basit bir yaklaşım ile çalışma şartlarına göre her siklon için optimum bir siklon uzunluğunun tanımlanabileceği ve bu uzunluğun üzerinde siklon uzunluğunun verimi arttırmayacağı tersi olarak azaltacağı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca bu çalışma ile siklonlarda limit uzunluğun ve maksimum verimin varlığı ve bunun kuramsal hesabı basit bir yaklaşımı olduğunu göstermişlerdir.

Avcı ve Karagöz (2003) yaptıkları çalışmalarında bir siklon ayırıcının akış ve geometrik koşullarının siklon ayırıcının toplama verimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Toplama veriminin en önemli etkilerinin geometrik parametrelere, sürtünme faktörlerine, girdap uzunluklarına akış rejimlerine bağlı olarak ve akış rejimini etkileyen faktörlere bağlı olarak değiştiğini vurgulamışlardır.

Gimbun ve ark. (2005) Stairmand ve Bohnet tipi siklonların sıcaklık ve giriş hızlarının Siklon basınç düşüşü üzerine etkilerini CFD metodu kullanarak sayısal olarak analiz etmişlerdir. Analizleri süresince farklı türbülans modelleri kullanmışlardır ve bu modellerin bir biri üzerinde üstünlüklerini araştırmışlardır. Yapılan sayısal analizlerin sonuçlarını literatürdeki diğer deneysel çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmalar sonucu RSTM türbülans modeli deneysel veriler ile sadece % 3 sapma ile doğrulanırken RNG k-epsilon modelinde ise bu hata payının %14-18 arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Karagöz ve ark. (2007) yaptıkları çalışmalarda türbülans modellerinin siklon ayırıcı performansı çözümlerindeki doğrusallık etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları numerik çalışmayı literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırmışlardır ve duvar yaklaşımında bariz bir fark olmasa bile RSM (Reynold Stress Model) türbülans modelinin özellikle aksenal hızların tespitinde oldukça başarılı olduğunu dile getirmişlerdir.

Cortes ve Gil (2007) yaptıkları çalışmalarında tek fazlı ve iki fazlı şekilde olmak üzere geliştirdikleri siklon için CFD yöntemi ile numerik bir çalışma oluşturmuşlardır. Ayrıca türbülans modellerinin oluşturdukları model için uygunluğunu incelemişlerdir. Bir çok farklı deneysel çalışmayı irdeleyerek vardıkları sonuçlar doğrultusunda en uygun modelleri önermişlerdir. Ayrıca hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu kullanılarak

yapılan çalışmalarda bu modeller için en iyi sonucu veren türbülans modellerinin RSTM ve LES olduğunu vurgulamışlardır.

Teke (2010) Yaptığı Numerik çalışmasında bir siklon ayırıcının giriş kesit alanını genişleterek bu genişlemenin basınç kayıpları üzerine etkisini incelemiştir. Bulduğu sonuçları bir biri ile mukayese ettiğinde çıkış borusu çapı sabit kalmak şartıyla giriş alanını arttırarak basınç kayıplarının arttığını gözlemlemiştir. Diğer değindi nokta ise giriş hızlarının basınç kayıplarına etkisi olmuştur. Sabit giriş alanı ve sabit çıkış alanı olmak üzere 5 farklı siklon ayırıcı modeli ile 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s hızlarda yaptığı çalışmalarda giriş hızının arttıkça basınç kayıplarının da arttığını ifade etmiştir. Ayrıca siklon ayırıcı giriş kesitinin giriş alanını sabit tutarak giriş bölgesindeki en-boy oranlarını değiştirerek yaptığı analizlerde değişimin basınç kayıplarını çok etkilemediğini fakat oran arttıkça farklılaşmanın biraz daha görülür hale geldiğini vurgulamış ve bunun nedeni olarak ta teğetsel hızlardaki değişimin oluşturduğu etkiden olduğunu ifade etmiştir.

Elsayed ve Lacor (2011) yaptıkları çalışmalarında siklon giriş kesitlerinin akışkan hızına etkilerini incelemişlerdir. 5 farklı giriş konfigürasyonu ile yaptıkları çalışmada akışkan giriş hızının etkilerini giriş ölçülerinde yaptıkları değişimler ile kıyaslamışlardır. Buna göre buldukları sonuç optimum giriş kesiti için en-boy oranının 0,5-0,7 olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada türbülans modeli olarak RSM (Reynold Stress Model) kullanmışlardır.

Gong ve ark. (2012) eksenel akışlı bir siklon ayırıcı üzerinde çalışmışlardır. Eksenel siklon ayırıcı üzerindeki helisel yapının siklon ayırıcı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları numerik çalışmada RNG k- ϵ türbülans modeli ve RSM türbülans modelleri ile farklı analizler yapmışlardır ve RSM modelin k- ϵ türbülans modeline göre daha doğru sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. Ayrıca helis açısının değişiminin siklon ayırıcının toplama verimi ve basınç düşüşü üzerinde önemli ölçüde

etkisi olduğunu dile getirmişlerdir. Siklon ayırıcının helis açısının azalması ile toplama veriminin ve basınç düşüşlerinin arttığını ifade etmişlerdir.

Karagöz ve ark. (2013) yaptıkları çalışma ile ters akışlı bir siklon ayırıcıda oluşan doğal girdap uzunluğunu hesaplamak için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Buldukları sonuçları deneysel verilerle de kıyaslamışlardır. Operasyonel parametrelerin (giriş hızı, akış debisi vb.), yüzeylerin sürtünme katsayılarının, çıkış borusunun konumunun ve çıkış borusunun penetrasyon uzunluğu gibi parametrelerin doğal girdap uzunluğu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Buna göre sürtünme yüzeyinin yüksekliğinin ve giriş hızının doğal girdap uzunluğunu önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca girdap uzunluğunun girdap bulucunun çapını artırarak belirli bir noktaya kadar arttığı ve bundan sonra azaldığı gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıca mevcut modelin girdap uzunluğunu tahmin etmede literatürde bildirilen diğer modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Erbaş ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada Muschelknautz yöntemi ile geliştirdikleri modelleri analiz etmişlerdir. Siklon ayırıcının, siklon boyu, çapı, gaz giriş kesiti gibi işletim parametrelerinin, toz tutuculuğu, toz parçacık boyutu, basınç düşüşüne olan etkileri sayısal yöntemlerle araştırmışlardır. Bu parametreler neticesinde bir optimum çalışma şartlarına göre en uygun siklon ayırıcıyı belirlemeyi hedeflemişlerdir. Yaptıkları revizyonlar ile literatürdeki bazı siklon ayırıcılar üzerinde üstünlük sağladığını ve yaptıkları iyileştirmelerin diğer modellere göre ortalama %30 oranında iyileştirildiğini ifade etmişlerdir.

(Luan ve ark. 2014) bir eksenel siklon ayırıcı için siklon ayırıcı içerisindeki rezistans performansını deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Yaptıkları her iki çalışmada da farklı giriş hızları kullanarak rezistans etkisinin siklon ayırıcı içerisindeki basınç kayıplarına etkisini incelemişlerdir. Giriş hızının etkisinin rezistans performansı üzerindeki en büyük faktörlerden biri olduğunu saptamışlardır. Ayrıca deneysel ve nümerik çalışmaları arasında iyi bir senkronizasyon sağlamışlardır.

Wu ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada ise eksenel bir siklon modeli için farklı vorteks bulucu tasarımları ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarında dalma borusundaki konik tasarımın ve vorteks bulucuların üzerindeki boşlukların enerji verimliliğine etkilerini araştırmışlardır. Türbülans modeli olarak RSM modelini kullanmışlardır. Entropi değerlerinden yola çıkarak enerji tüketim değerlerini belirlemişlerdir. Siklon modelini dört farklı bölgede incelemişlerdir ve toplam enerji tüketimine etkilerini bu şekilde tespit etmişlerdir. Kendi yaptıkları tasarım ile enerji tüketim miktarını ortalama %35 oranında azaltırken, maksimum ayrıştırma etkisini elde etmişlerdir.

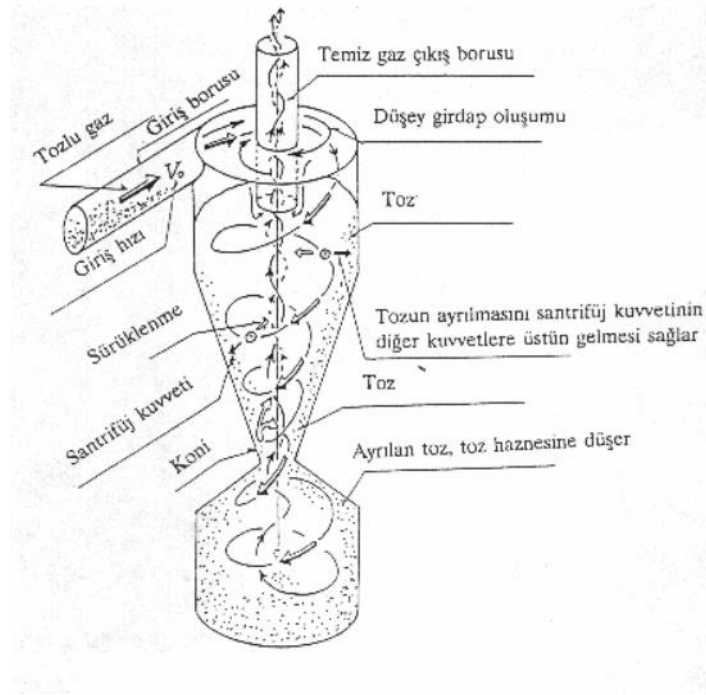
Çalışkan ve ark.(2017) Yaptığı deneysel çalışmada sanal gövdeli sınıflandırıcı özelliğe sahip bir siklon ayırıcıda sınıflandırma ünitelerinin farklı konfigürasyonlarında siklon ayırıcının toplam toplama verimine etkisini incelemiştir. Buna göre giriş hızı ve debinin oluşturduğu etkiler kadar konfigürasyon değişimlerinin toplam toplama verimi üzerinde etkili olmadığı sonucuna varmıştır. Fakat konfigürasyon değişikliklerinin sınıflandırma performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu belirtmiştir. Artan debiyle, siklonun üst kısımlarında toplanan tozların partikül boyutlarının da arttığını gözlemlemiştir.

Sakin ve Karagöz (2017) yaptıkları çalışmalarında eksenel ve ters akışlı siklon modellerini numerik olarak incelemişlerdir. İnceledikleri yeni nesil siklon ayırıcıların farklı konfigürasyonlarda performans parametrelerini mukayese etmişlerdir. Bu konfigürasyon farklılıklarını siklon ayırıcıların içerisinde bulunan bir vorteks kısıtlayıcı ile oluşturmuşlardır. Vorteks kısıtlayıcının farklı konumları üzerinde yaptıkları CFD temelli çalışma sonucu vorteks kısıtlayıcının konumu ve yüzey sürtünme uzunluğu arttıkça basınç kayıplarının azaldığını, Bu durumun ters akışlı siklon ayırıcı için de geçerli olduğunu fakat ters akışlı siklonların geometrik değişimlerden çok etkilenmediğini ifade etmişlerdir.

Karakaş (2020) yaptığı çalışmasında yüksek verimli farklı geometrilerdeki teğetsel mini siklon ayırıcıların performanslarını deneysel olarak incelemiştir. Stairmand tipi bir siklon ayırıcıyı model olarak gövde çaplarını küçültmüş ve beş farklı model oluşturmuştur. Siklon ayırıcının gövde çapının azaltılmasının ayırma verimine ve basınç kayıplarına etkilerini araştırmıştır. Siklon ayırıcının gövde çapının küçüldükçe veriminin arttığını fakat belirli bir noktadan sonra tekrar azalışa geçtiğini ifade etmiştir. Ayrıca basınç düşüşlerinin de gövde çapının azalması ile azaldığını vurgulamıştır.

2.1. Siklon Tipleri Ve Çalışma Prensipleri

Siklon ayırıcılar sıvı veya katı partiküllerden oluşan bir veya daha fazla faza sahip olan akışkan bütününden, içerisinde bulundurduğu fazları ayırmaya yarayan yapılardır. Genel olarak siklonlar katı-gaz fazında oluşan akışlarda katı fazın akışkan içerisinden ayrılmasını sağladığı gibi sıvı-gaz ve sıvı-sıvı ayırıcı modelleri ile de kullanılmaktadır. Endüstride baca gazı filtrasyonu, Kömür ocakları ve çimento imalatı gibi alanlarda sıkça karşılaştığımız siklonlar basit, düşük maliyetli ve son derece kullanımı kolay sistemlerdir. Siklonların genel çalışma prensibi bir silindir içerisinde oluşturulan girdap bölgesi ve bunun sonucu oluşan merkezkaç kuvveti ile içerisinde bulunan partiküllerin yoğunluk farkı ile silindir çeperinde sürüklenerek enerjilerini kaybedip bir toplama ünitesinde toplanması mantığına dayanır. Şematik olarak bir siklon ayırıcının çalışma prensibi Şekil 2.1 de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Siklon Ayırıcı Çalışma Prensibi

Siklonlar kullanım yerleri ve konstrüksiyonları gereği farklılıklar göstermektedir ve bu şekilde de sınıflandırılmışlardır. Genel olarak akışkan giriş bölgesine göre sınıflandırılırlar. Temel olarak bilinen üç farklı siklon modeli vardır. Bashir (2015) Bunlar teğetsel girişli siklonlar (ters akışlı siklonlar), aksenal girişli siklonlar ve teğetsel girişli ve çıkışlı siklonlardır. Endüstride karşımıza en çok çıkan model teğetsel girişli siklonlardır. Oldukça basit bir yapıya sahiptirler. Çimento fabrikaları, yem fabrikaları gibi birçok proseste kullanılmaktadırlar. Aksenal siklonlar akışkanın bir eksen boyunca siklona girip, aynı eksen de veya eksenin ters yönüne doğru çıkış gösteren bir modeldir. Bu durum bazı bölgelerde kullanım kolaylığı oluşturmaktadır. Yapıları teğetsel girişli siklonlara göre biraz daha karmaşık olabilmektedir. Çünkü giriş bölgesinde bir girdap oluşturucu konstrüksiyona sahiptir. Genel olarak filtrasyon sistemlerinden önce ön filtrasyon ekipmanı olarak kullanılır. Böylelikle filtrasyon kısmında oluşan yoğun yüklemeler azaltılmış olunur. Teğetsel girişli ve çıkışlı siklonların çalışma ilkesi ise sıvı yüklü hava kütesinin siklona alt bölgeden teğetsel giriş yapıp yukarı teğetsel çıkışa doğru oluşan girdap etkisi ile hareket ederek duvar çeperleri boyunca sıvı damlacıkların çeperde tutulması ilkesine dayanmaktadır. Siklonlar farklı kaynaklarda farklı şekillerde de sınıflandırılabilirler.

Siklon ayırıcıların başlıca avantajları ve dezavantajları şu şekilde sıralanmaktadır. (Stein., A. C., Hoffmann., L. E., 2008)

Avantajları

- Son derece basit ve genellikle tek parçadan oluşan modellerden oluşurlar.
- Yapıldıkları malzemeler genellikle endüstride sıkça kullanılan ve kolay temin edilebilen maddelerdir. Örneğin alüminyum, plastik ve çelik alaşımlar, dökme demir vb.
- Katı ve sıvı parçacık ayırıştırmasında ve bazı zamanlar karıştırmasında kullanılırlar.
- Endüstriyel olarak oluşturma maliyetleri ve bakım maliyetleri düşüktür.
- Bazı ayırıştırma durumlarında ayırıştırılan parçacıklar saklanabilir ve tekrardan kullanılabilir.
- Yüksek sıcaklık ve basınç şartlarında ve bazı çalışılması zorlu kimyasallar ile çalışılmasına olanak sağlar
- Hareketli parçalardan oluşmazlar genellikle tek parça şeklinde imal edilirler. Bu da arıza olasılığını en aza indirger.
- Kolaylıkla korozyona karşı dayanım sağlayıcı kimyasallar ile kaplanabilir.

Dezavantajları

- Partiküller sert ve aşındırıcı etki yapabilirler buda zamanla pürüzlülüğü etkiler ve çalışma şartlarını değiştirebilir.
- Diğer metotlara göre bu sistemdeki basınç kayıpları biraz daha fazlalık gösterir.
- Çok çeşitli ve farklı alanlarda kullanıldığı için uygun modeli seçmek çok önemlidir. Aksi halde siklon düzgün çalışmaz.

2.2. Siklon Uygulamaları

Siklon ayırıcı sistemler hemen hemen endüstrinin her alanında kullanılan basit ve bir o kadar etkili sistemlerdir. Parçacık ayırma işlevlerinde ilk akla gelen uygulamadırlar. Siklon ayırıcılar partiküllerin akışkan içerisinde ayırma işlemleri için kullanılsa da bazı durumlarda sınıflandırıcı ve ayırıcı olarak ta kullanılmaktadır. Sınıflandırma özelliği ile farklı partikül boyutlarında olan materyaller kendi eş değer boyutlarında sınıflandırılır ve böylelikle daha işlevsel hale gelirler. Siklon uygulamaları genel olarak şöyle sıralanabilir;

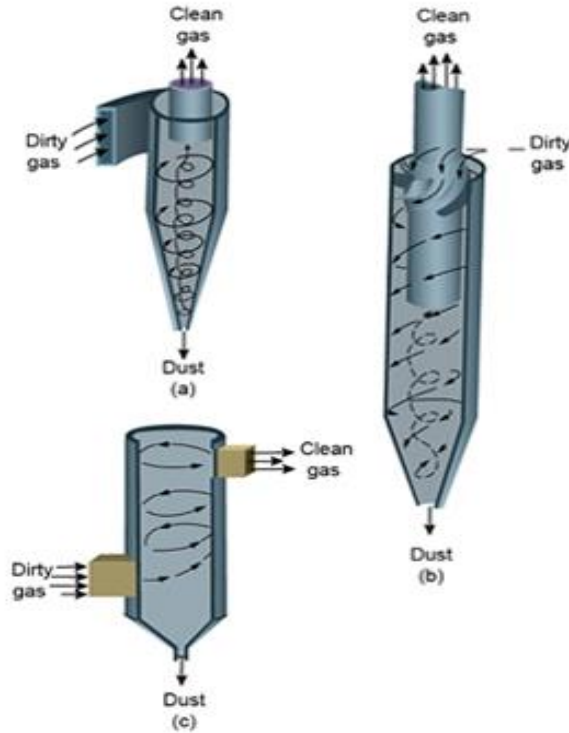
- Gıda üretim sistemlerinde
- Kömür ve mermer ocaklarında
- Elektrikli vakumlu süpürge sistemlerinde
- Maden endüstrilerinde kırma, ayırma ve öğütmede
- Elektrik güç istasyonlarında
- Sentetik deterjan üretim süreçlerinde
- Gemi yük boşaltma sistemlerinde
- Toplu taşıma sistemlerinde hava temizleyici olarak
- Bazı arazi şartlarında çalışan araçlarda

Siklon ayırıcı sistemler sıklıkla kullanılmaktadır. İlerleyen zaman ile birlikte siklon ayırıcıların kullanım yerleri de artmaktadır. İlaç endüstrisi otomotiv, uçak ve gemi endüstrilerinde sıklıkla siklon ayırıcılar ile karşılaşmaktadır. Bu yüzden bir çok farklı siklon modeli oluşturulmuş ve her bir fonksiyon için o sisteme ait özel siklonlar imal edilmeye devam etmektedirler. Her bir sistemin kendi gereksinimlerine karşı parametreler belirlenip bu şekilde en uygun siklon ayırıcı model seçilir.

2.3. Siklon Performansını Etkileyen Faktörler

Siklon ayırıcılar, içerisine giren partiküllü akışkanı (genellikle ters akışlı siklonlarda teğetsel giriş yaparak) duvar çeperlerine doğru iterek burada siklon merkezinden dışa doğru bir santrifüj kuvvet etkisinde itmektir. Daha sonra içeride santrifüj kuvvetlerin etkisiyle oluşan girdap ile akışkan ve partikül karışımı aşağı doğru hareket eder. Siklonun konik kısmına geldiğinde partiküller hareketine aşağı yönde devam ederken akışkan yukarı doğru tahliye çıkışına hareket eder. Bu sayede tozlu hava partiküllerden arınmış olur.

Eksenel akışlı siklonlarda da benzer durum mevcuttur. Burada ters akışlı siklondan farklı olarak giriş teğetsel değil ekseneldir. Bu nedenle santrifüj kuvvetleri oluşturmak için bir takım girdap oluşturucu konstrüksiyonlara ihtiyaç duyulur. Bunlar genellikle kanatçık ya da spiral tipte olmaktadır. Oluşturulan her bir konfigürasyon siklon toplama verimine etki etmektedir. Başlıca siklon tipleri şekil 2.2. de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Akışkan Eksenine Göre Başlıca Siklon Modelleri

Genel olarak bakıldığında bir siklon ayırıcının performansını etkileyen parametreleri şu şekilde sıralayabiliriz;

1)Siklon ayırıcı boyutuna göre

- Siklon ayırıcının çapı
- Konik yapının çapı
- Vorteks bulucu çapı
- Silindir yüksekliği
- Giriş yüksekliği
- Giriş genişliği
- Vorteks bulucu uzunluğu
- Siklon toplam uzunluğu

2)Akışkan Özellikleri

- Hız
- Basınç
- Viskozite
- Yoğunluk
- Sıcaklık

3)Partikül Özellikleri

- Parçacık çapı ve dağılımı
- Yoğunluk
- Kütle
- Şekil

4)Diğer Parametreler

- Sürtünme
- Vorteks bulucu şekli

2.4. Vorteks Akışlarda Kuvvetler

Girdap hareketleri siklon ayırıcılar, spray kurutucular ve yakıcılar gibi birçok endüstriyel cihazların içerisinde olmaktadır. Teğetsel hızın dağılımı iki tip girdaplı akış gösterebilir. Bunlar;

- Serbest vorteks akışlar
- Zorlanmış vorteks akışlar

Serbest akış girdabı, bir akışkanın sürtünmesiz şekilde davrandığı gibi hareket eder ve girdap teğetsel hızı, akış elemanlarının herhangi bir zorlamaya veya dış kuvvete maruz kalmaksızın akışkanın dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru hareket etmesi ile gerçekleşir. Burada akışkanın belirli bir kısmında hız dengesi değişir ve bu durum basınç farklarına yol açar. Bu nedenle akış elemanları dış kısımdan iç kısma doğru hareket etme eğilimine geçer ve bu şekilde bir moment kazanır, basınç farkının devam etmesi ile de dış bir kuvvete maruz kalmaksızın girdap oluşmaya başlar. Zorlanmış girdap akışlarda ise akış elemanlarına dış bir kuvvet etkisi ile radyal bir hız kazandırılır. Bu hız değişimi çeperden merkeze doğru artma eğilimi gösterir. Dolayısıyla merkezdeki basınç değeri düşer ve akış elemanları çeperden merkeze doğru dış kuvvetin etkisi ile açısal hız kazanır. Zorlanmış girdap akışı sabit bir açısal hıza sahip girdap olarak karşımıza çıkar.

$$v_{\theta} = \Omega r \quad (2.1)$$

Bu denklem ilk ideal girdap akışını, burada v_{θ} teğetsel hızı ve r radyal koordinatı ifade etmektedir.

2.5. Santrifüj kuvvetler

Siklon ayırıcılardaki en önemli kuvvetlerden biri de santrifüj kuvvetlerdir. Siklon ayırıcıda ayırıştırma olayı santrifüj kuvvetler sayesinde gerçekleşir. Akışkandan daha yoğun olan partiküller siklon ayırıcının tabanına doğru harekete zorlanırlar. (Hofmann ve ark. 2008). Bu kuvvet, akışkan elemanlarının merkezkaç kuvveti, statik basınçta bir gradyan üreten kuvvetle dengelenir. Kuvvet dönme eksenine etki eder ve bu elemanın yolunda kalmasını sağlar. Söz konusu sisteme etki eden bir kuvvet olan merkezkaç kuvveti, parçacık ile dönmelidir. Sabit bir koordinat sisteminde, aslında parçacığın sürekli yörüngede kalmasına yol açacak merkezi bir ivmedir.

2.6. Basınç Düşüşü

Basınç düşüşü bir sistem içerisinde bulunan akışkanın iki nokta arasında ölçülen basınç değerlerinin farkı olarak tanımlanır. Basınç kavramından bahsederken özellikle siklon ayırıcılarda statik basınç ve dinamik basınç arasındaki fark bilinmelidir. Statik basınç ölçümü için en klasik yöntem sistemin iki noktasındaki anlık basıncı ölçüp birbiri ile mukayese etmektir. Siklon ayırıcılarda da basınç düşüşü bu yöntem ile hesaplanır. Bernoulli denklemi ele alacak olunursa;

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gh = \text{sabit} \quad (2.2)$$

Burada p statik basıncı temsil ederken $\frac{1}{2}v^2$ dinamik basıncı gösterir. Ayrıca v akışkanın hızı, ρ akışkan yoğunluğunu, g yer çekimi ivmesini ve h ise yüksekliği temsil eder. Buradan sistemin ilk ve son halleri tespit edilip sayısal olarak basınçtaki değişimler izlenebilir.

Basınç düşüşü bir siklon ayırıcı için istenmeyen bir durumdur. Genel olarak siklon ayırıcının toplama performansı arttıkça basınç düşüşü de artmaktadır. Bu durumda istenmeyen bir sonuç oluşturur ve siklon ayırıcılar için bir optimizasyon gerekliliği

olduğunu gösterir. Bu nedenle de numerik çalışmalar son yıllarda özellikle doğru modelin belirlenmesinde önemli bir yer edinmiştir.

2.7. Toplam Ayırıştırma Verimi

Siklon ayırıcı çalışmalarındaki en önemli diğer husus da toplam ayırıştırma verimi ya da toplama verimi olarak ifade edilir. Toplama verimi, sisteme giren toz miktarının toz toplayıcıda tutulan toz miktarına oranı olarak hesaplanır. Bu sayede siklon toplama verimi hakkında bilgi edinmiş oluruz. Fakat toz taneciklerinin boyutları da toplama verimine etki eden en önemli parametrelerdendir. Bu nedenle hesaplar yapılırken mümkün olduğunca aynı toz boyutlarında hesaplanmaya özen gösterilir. Genel olarak Toz boyutu küçüldükçe toplama veriminde bir düşüş beklenir. Çünkü çok küçük yapıdaki toz tanecikleri çepere veya siklon ayırıcı içerisinde herhangi bir noktaya temas edemeden siklonu terk eder. Bu yüzden toplama veriminin büyük tanecikli yapılara göre düşmesi beklenir.

$$\text{siklon toplama verimi} = \frac{\text{toz toplayıcıda tutulan partikül sayısı}}{\text{sistemdeki toplam partikül sayısı}}$$

(2.3)

Denklem (2.3) de bir siklon ayırıcıdaki toplama veriminin nasıl hesaplandığını görülmektedir. Elde edilen veriler bu denkleme göre işlenir ve ardından bir grafik oluşturulur. Böylelikle siklon ayırıcıların toplama verimleri mukayese edilir. Uygun siklon yapısı ve optimum şartları saylayan siklon ayırıcı modeller bu sayede belirlenirler.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kısa yazımı HAD olan teknik, akışkan akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal olaylara dayanan problemleri bilgisayar ortamında çeşitli sayısal çözüm yöntemleri kullanarak çözümlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Genel olarak İngilizce terimi olan CFD kısaltması ile karşımıza çıkmaktadır.

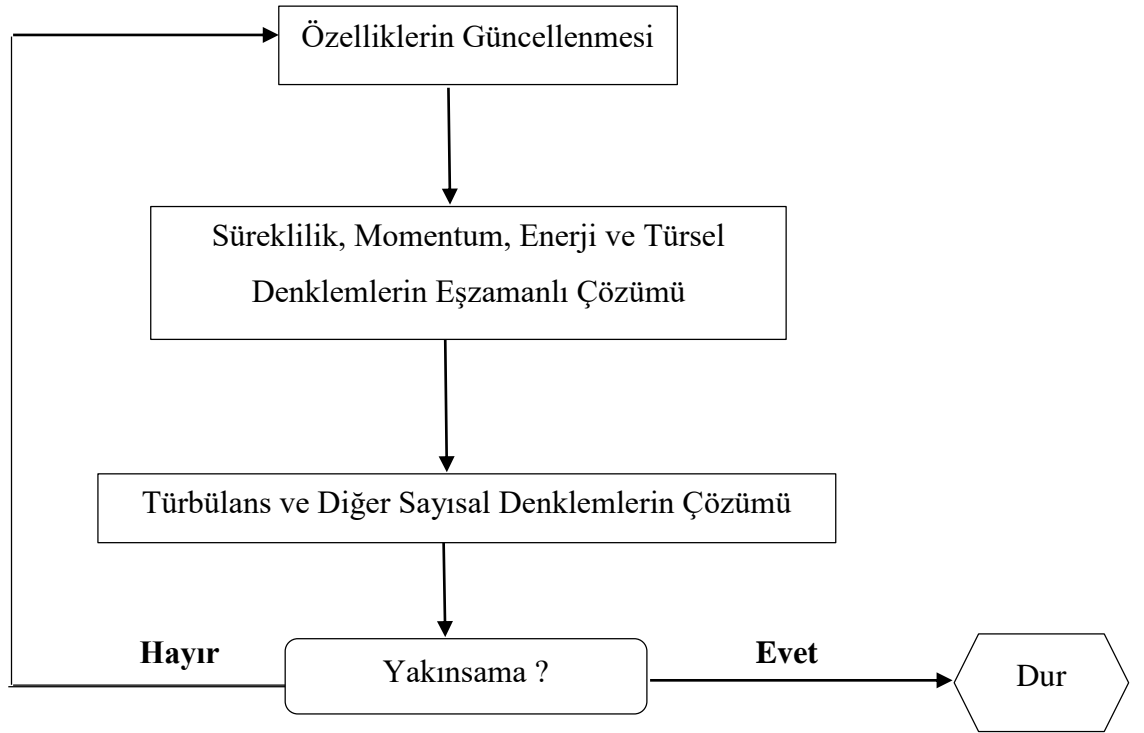
CFD yöntemi uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte kapasitesi artan bilgisayarlar sayesinde çok daha kompleks yapıların analizleri artık günümüzde mümkün olabilmektedir. Teorik olarak elde edilen denklemler ve algoritmalar başlarda elle çözümü mümkün olamayacak kadar uzun süre ve emek gerektirmekteydi. Fakat 1970'li yıllardan sonra bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte bir takım algoritmalar ve yazılımlar oluşturularak bu tarz denklemlerin belirli sınır şartları altında çözülebilmesi imkanı doğmuştur. 1970'ten sonra geliştirilmeye başlanan bu teknik günümüze kadar kat kat geliştirilerek gelmiştir. Bir çok ürünün yapının veya tasarımının imalatından önce yapılan analizler sonucu üretimden önce tasarımcıya gerek performans gerek maliyet adına bir çok veriyi bilgisayar ortamında göstermektedir. Bu yöntem sayesinde de ciddi maliyet gerektiren projeleri imal etmeden önce bilgisayar ortamında analiz ederek ciddi maliyetlerden kaçınmaya olanak sağlamaktadır.

CFD analizlerde özellikle akış analizlerinin temelini Navier-Stokes denklemleri oluşturmaktadır. Bu denklemler bir analitik çözüme sahip olmadıkları için sayısal çözümlenme yöntemleri ile çözümleri sağlanır. Ancak sonuçlar analitik bir denklemin ürünü değil sayısal bir yaklaşımın sonucu olduklarından doğrulukları yapılan analizlerde önem arz etmektedir.

CFD analizlerinde sonuca giden bir çok yöntem vardır. Bunlar içerisinde ise en popüler olanı sonlu hacimler yöntemidir. Sonlu hacimler yöntemine göre bir akış bölgesi kontrol hacminin çok çok daha alt hacimleri sayılabilecek küçük elemanlara ayrılır ve belirli sınır şartları altında iteratif bir yöntem ile çözüme gidilir.

3.2. CFD Kavramı

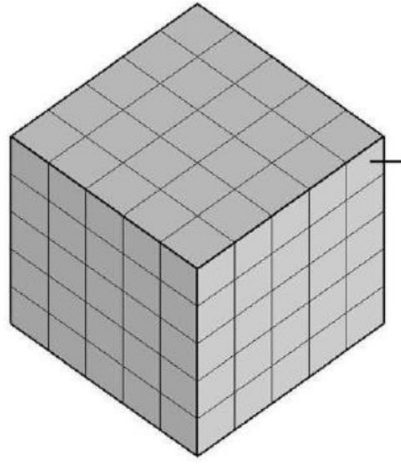
Genel olarak CFD de kullanılan denklemleri içinde barındıran ve aynı zamanda oluşturulan modelin sınır şartları doğrultusunda bilgisayarların işlemci kısmını kullanarak çözüme kavuşturan Fluent yazılımı yaptığımız çalışmada kullanılmıştır. Burada korunum denklemlerini Sonlu Hacimler Metodu yaklaşımı ile numerik olarak çözmemize olanak sağlayan yazılım ANSYS 19.1 içerisinde mevcut olan Fluent 19.1 yazılımı ile çözülmüş ve sonuçları bulgular kısmında mukayese edilmiştir. CFD metodu kullanılarak yapılan çözümlerin doğru sonuç verebilmesi için şekil 3.1 deki gibi algoritmayı takip etmesi gerekmektedir. Aksi halde verilen her bir girdiye karşı bir çıktı oluşabilir ve bu durumun doğruluğa yakınlık derecesi duruma göre farklılık gösterebilir ve yanlış sonuçlara götürebilir.



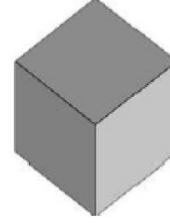
Şekil 3.1. Bir CFD çalışmasında izlenmesi gereken sürecin Algoritması

3.2.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi CFD çalışmalarında özellikle üç boyutlu (3B) çalışmalarda en çok kullanılan sayısal çözümleme tekniklerindedir. Basit olarak sonlu hacimler yöntemi belirli bir geometrinin mevcut halinin çok daha küçük alt hacimlere bölünmesi ile her bir hacim elemanının birbiri ile bağlantı kurması ile mikro çözümden makro çözüme ulaşma yöntemidir.



a) Hesaplanacak Hacim



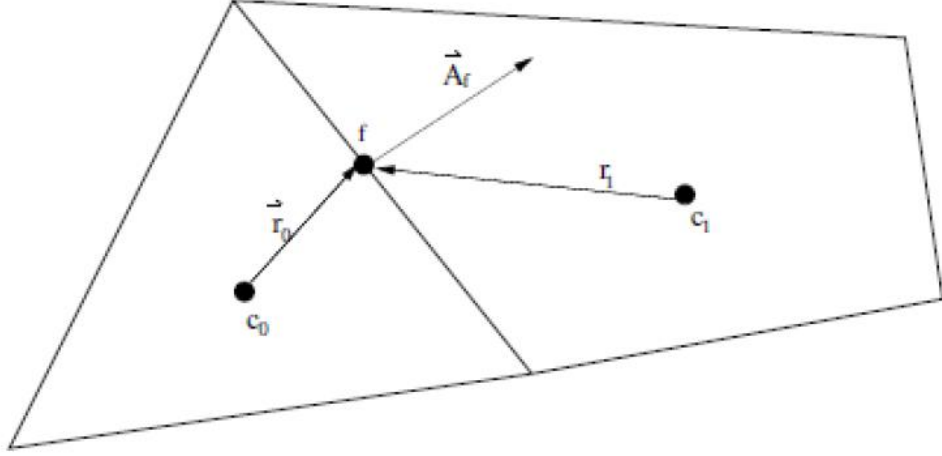
b) Kontrol Hacmi

Şekil 3.2. Hesaplanacak Hacmin kontrol hacimlerine bölünmesinin şematik gösterimi

Sonlu hacimler yönteminde genel olarak mantık sistemi oluşturan çok daha küçük kontrol hacimlerini çevreleyen hacim üzerinden yapılan hesaplar doğrultusunda sistemin genelini analiz edilme yöntemidir. Akış alanı çözülür ve nihai kontrol hacmi sayısına bölünür. Daha sonra koruma denklemleri (kütle, momentum, vb.) cebirsel denklemlere ayrıştırılır. Aynı denklemler sayısal olarak yeniden çözülür. Örnek amaçlı alınmış olan V hacmi için integral formda elde edilen denklem, denklem 3.1’de net bir şekilde gösterilebilir. (FDLELSEED,2018)’e göre;

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.1)$$

ρ yoğunluk, \vec{v} hız vektörü, \vec{A}_f 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 3.3. Skaler Transport Denkleminin Ayırıklaştırılmasını Belirtmek İçin Kullanılan Kontrol Hacmi

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

Şekil3.3 de gösterildiği gibi kontrol hacmi için N hesaplanan kontrol hacmindeki yüzey sayısıdır, Φ_f , f yüzeyinden konveksiyon terimi, $\rho, \vec{v}_f, \vec{A}_f$, f yüzeyden olan kütle akışı, \vec{A}_f yüzey bölgesi, $\Delta\phi_f$ yüzey f ve V kontrol hacmi için "n" nin gradyanıdır. Her hücrede ϕ bulabilmek için konvektif terimin ϕ çözülmesi gerekir. Ayırık biçimde yazılan taşıma denklemi, her bir hücre merkezinde kullanılır ve hücreyi çevreleyen diğer hücrelerin merkezinde bilinmeyen ölçekler ϕ içerir. Bu denklemin lineer formu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de nb komşu hücredir ve doğrusal katsayılar b ve kaynak terimidir. (PATANKAR, 1980.). Komşu hücrelerin sayısı ağ (mesh) yapısına bağlıdır, ancak tipik

olarak bir hücreyi çevreleyen yüzeylerin sayısı aynı anda komşu hücrelerin sayısına eşittir. Ağdaki her hücreye benzer denklemler yazılır. Daha sonra bu şekilde üretilen katsayılar, Gauss-Seidel yöntemi kullanılarak Fluent tarafından çözülür.

3.2.2. Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar yönteminin çözümlerine ilk olarak bilinmeyen fonksiyonun büyüklüğünün ayrıklaştırılması ile başlanır. Diferansiyel denklemi ayrık hale getirebilmek için bir boyutlu $f(x)$ fonksiyonun eşit Δx aralıklarla i ayrık parçalara bölünmesi sonucunda, diferansiyel denklem ayrık hale getirilir. $f(x)$ fonksiyonu $x = x_i$ civarında Taylor serisine açılırsa

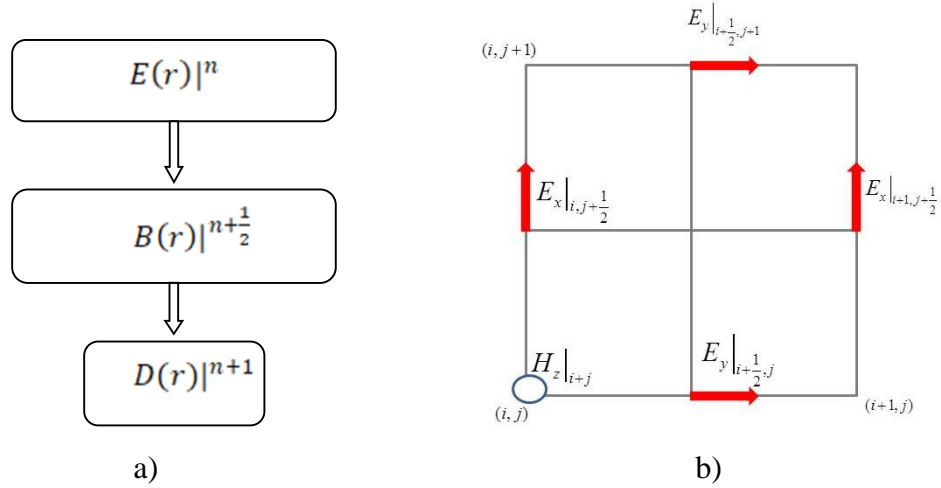
$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(x_i)}{n!} (x - x_i)^n = f(x)|_{x=x_i} + f'(x)|_{x=x_i} (x - x_i) + \dots \quad (3.3)$$

iken $x - x_i = a$ seçilmek üzere $x = x_i + a$ olarak

$$f(x_i + a) = f(x) + f'(x_i)a + \frac{a^2}{2!} f''(x_i) + \dots \quad (3.4)$$

biçiminde ifade edilebilir. Eşitlik (3.4) temelde eşitlik (3.3)'ün bir diğer gösterilimidir

ZUSF yöntemi ile zamanda iteratif olarak çözümünü gösteren akış diyagramını ve İki boyutlu Kartezyen koordinatlarda birim Yee hücresi sırası ile Şekil 3.4.a) ve Şekil 3.4.b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. a) ZUSF zaman diyagramı, b) İki boyutlu Kartezyen koordinatlarda birim Yee hücresi.

3.3. CFD Yönteminde Kullanılan Bazı Türbülans Modelleri

3.3.1. Türbülans modelinin seçilmesi

Türbülans kelime anlamı olarak herhangi bir akışkanın bir hareket haline geçmesi durumunda ortaya çıkan düzensizliktir. Bu düzensizlik kaotik ve stokastik özelliklerin değişimi olarak karşımıza çıkar. Türbülans rejimi Reynold sayısına bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Birçok bilim adamına göre türbülans konusu ele alınmış fakat herhangi bir geçerli çözüm bulunamamıştır. Buna karşılık mühendisler bazı durumlar için türbülans durumlarına

yaklaşımsal çözümler geliştirmişlerdir. Doğadaki her bir türbülans içeren olay için farklı yaklaşımsal modeller kullanılmıştır. Bu modellerden bazıları;

- Reynold Stress Model (RSM)
- Spalart-Allmaras türbülans modeli
- k-epsilon türbülans modeli
- k-w türbülans modeli
- Large eddy simulation (LES) modeli

Her bir modelin bir biri içerisinde farklı avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Genel olarak baktığımızda RSM türbülans modeli diğer modellere göre kullandığı denklem sayısı diğer modellere göre daha fazladır. Bu nedenle diğer modellere göre daha fazla CPU kullanımı ve daha fazla zamana ihtiyaç duyulur. Diğer modeller ise bir biri üzerine üstünlükleri vardır. Burada türbülans modelini seçerken yapacağımız çalışmanın genel olarak niteliklerini iyi tanımalıyız. Bunun için literatürden yararlanmakta gerekebilir. Çünkü bir çok farklı model için deneysel ve teorik olarak yapılan çalışmalar birbiri ile karşılaştırılmış ve bir istatistiksel sonuç ile seçeceğimiz model için bizlere bir kaynak oluşturmuştur. Yaptığımız çalışmada da siklon ayırıcı içerisindeki türbülans olayları çok yoğun olmakla birlikte genel kurgu bu türbülans bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu yüzden standart modellerin dışında daha fazla çözücü denkleme sahip olan RSM modeli seçilmiştir. Ayrıca yapılan bir çok siklon ayırıcı çalışmasında da diğer türbülans modelleri ile RSM modeli karşılaştırılmış ve gerçeğe en yakın sonuçlar RSM modelinden alınmıştır.

3.3.2. k-epsilon Türbülans Modeli

Standart k-epsilon modeli iki denklemlilik bir türbülans modeli olup iki denklem arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi

(k) ve dissipasyon oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3.6)$$

Şeklinde yazılabilir. Buradan diffüzyon terimleri;

$$\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon \quad (3.7)$$

Hız gradyanlarından dolayı oluşan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.8)$$

Olup buradaki türbülans viskozitesi, türbülans kinetik enerjisi ve dissipasyon oranı cinsinden yazılacak olursa;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.9)$$

Yazılabilir. Bu modelde $R=0$ olup diğer ampirik sabitleri: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$,

$C_\mu = 0.09$, k ve ε için tanımlanan türbülans Prandtl sayıları $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ dir.

3.3.3. k- ω Türbülans Modeli

K-Omega modeli, K-Epsilon modeline alternatif olan iki denklemlilik bir modeldir. Çözölen transfer denklemleri türbölanslı kinetik enerji ve özgül dağılıma hızı olarak tanımlanan, yani birim türbölanslı kinetik enerji başına dağılıma oranı olarak adlandırılan bir miktar içindir.

K-omega (k- ω) modeli en yaygın kullanılan modellerden biridir. Bu, türbölanslı enerjinin taşınımı ve yayılması gibi tarih etkilerini hesaba katmak için akışın türbölanslı özelliklerini temsil eden 2 ek taşıma denklemini içerir. Taşıma değişkeni k türbölanstaki enerjiyi belirler ve ω türbölans ölçeğini belirler.

Temel k- ω modeli, formölasyonun viskoz alt katmandan iç kısımdan duvarlara kadar çalıştığı sınır katman problemleri için kullanılabilir - bu nedenle k- ω SST modeli, düşük delikli akış uygulamaları olarak kullanılabilir. SST, Kayma Gerilmesi Transportu anlamına gelir. SST formölasyonu ayrıca serbest akışta bir k-e davranışına geçer, bu da modelin k- ω probleminin giriş serbest-akış türbölans özelliklerine karşı çok hassas olmasını önler. K- ω SST modeli ayrıca olumsuz basınç gradyanlarında ve ayırma akışındaki iyi davranışını açıklar. K- ω SST modeli, durgunluk bölgeleri ve kuvvetli ivme olan bölgeler gibi büyük normal gerginliğe sahip bölgelerde bazı türbölans seviyeleri üretir. Bu etki normal bir k-e modelinden çok daha az belirgindir. SST modeli, temel kesme geriliminin ters basınç gradyan sınır katmanlarında taşınmasını hesaba katma yeteneğine sahiptir.

Türbölans enerjisi k için;

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (3.10)$$

Burada U ortalama akış hızı ve I ise türbölans yoğunluğudur. Türbölans şiddeti türbölans seviyesini verir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$I \equiv \frac{u'}{U} \quad (3.11)$$

Burada u , türbülanslı hız dalgalanmalarının kök-ortalama-karesi ve U ortalama hızdır. Çalkantılı hız dalgalanmalarının kök-ortalama-karesi;

$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3} (u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)} = \sqrt{\frac{2}{3} k} \quad (3.12)$$

Ortalama U hızı aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$U \equiv \sqrt{U_x{}^2 + U_y{}^2 + U_z{}^2} \quad (3.13)$$

K-Omega modelinin orijinal haliyle en büyük dezavantajı, sınır tabakası hesaplamalarının serbest akıştaki değerlerine çok duyarlı olmasıdır. Bu, K-Epsilon modelleri için mevcut olmayan bir sorun olan iç akışlar için giriş sınır koşullarına aşırı duyarlılığa dönüşür.

3.3.4. Reynolds Stress Model (RSM)

İzotropik girdap-viskozite hipotezini ayırarak, Reynolds stresleri RSM için taşıma denklemlerini çözerek, denklem ve kayıp oranı ile birlikte Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine yakın denklemlerdir..

Reynolds stres modeli (RSM), ANSYS FLUENT tarafından sağlanan en karmaşık türbülans modeli olarak düşünülebilir. RSM, düzeneğin eğrilik etkisini döndürme, girdap ve gerinim hızı hızlı değişikliklerinin diğer denklem modellerinden daha iyi ve daha çok

daha yakınsak bir şekilde açıkladığından, karmaşık akışlar için doğru tahminler verme potansiyeli vardır. Bu, 3D tarafından çözülen yedi ek taşıma denklemine kıyasla, 2B akışlar için başka bir beş taşıma ek denklemine ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, RSM uygunluk tahminleri, Reynolds gerilmeleri için tam taşıma denklemlerinde çeşitli model terimlerinde kullanılan kapatma varsayımları ile sınırlıdır.

Yayıma oranı terimlerinin ve basınç geriliminin modellenmesi özellikle zordur ve genellikle RSM tahminlerinden ödün veren doğruluktan sorumlu kabul edilir. Bununla birlikte, RSM, ilgi akışının özellikleri Reynolds stresli anizotropinin sonucu olduğunda kullanılabilir.

Örnek olarak siklon akışları, dönen akış geçitleri, yanıcılarda oldukça dönen akışlar ve stres kaynaklı ikincil kanal akışları verilebilir.

The Reynolds stresses transport equations, $\overline{u_i u_j}$ may be written as follows:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{u_i u_j} \right)}_{\text{Local time derivative}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left(U_k \overline{u_i u_j} \right)}_{C_{ij}=\text{convection}} = & \underbrace{-\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{u_i u_j u_k} + \frac{P \overline{u_j}}{\rho} \delta_{ik} + \frac{P \overline{u_i}}{\rho} \delta_{jk} \right)}_{D_{T,ij}=\text{Turbulent diffusion}} + \\
 & \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i u_j} \right]}_{D_{L,ij}=\text{Molecular diffusion}} - \underbrace{\left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij}=\text{Stress production}} + \\
 & \underbrace{\frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}_{\varphi_{ij}=\text{Pressure strain}} - \underbrace{2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k}}_{\varepsilon_{ij}=\text{Dissipation}}
 \end{aligned}$$

(3.14)

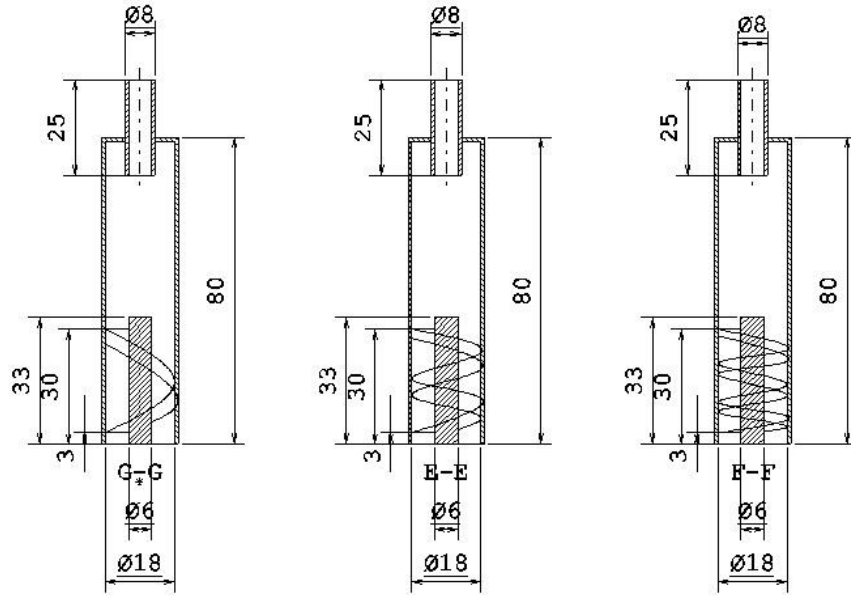
Burada türbülans difüzyon, konveksiyon, basınç gerilmeleri ve dissipasyon terimleri için kapalı denklem sisteminde bir modelleme gerekmektedir. Diğer terimler içinse herhangi bir modelleme gerekmez.

3.3.5. Siklon Ayırıcı Modelin Oluşturulması

Model olarak seçtiğimiz siklon ayırıcılar endüstride diğer siklon ayırıcı modellere göre daha az kullanılmakta olan bir modeldir. Genellikle motorlu taşıtlarda ve toplu taşıma uygulamalarında kullanımı görülmektedir. Bu çalışmada da ölçüleri Şekil 3.5. de verilen tasarımı tamamen bize ait olan üç farklı helis açısına sahip olan aksenal siklon ayırıcılar modellenmiştir.

Yapılan analizler 3 farklı helis açısı ile tasarlanmış siklonlar için üç farklı giriş hızı ile analiz edilmiştir. Tasarımlar bir CAD (computer aided design) programı yardımı ile üç boyutlu halde tasarlanmıştır. Daha sonra yapacağımız analiz bölgesi siklon içerisindeki akışkan ile ilgili olduğundan program yardımı ile tekrardan içerideki akışkan model olacak Şekilde tasarım yapılmıştır.

Yapılan her üç tasarımda da siklon boyu ve gövde çapları aynı olup değişkenlik gösteren parametre sadece helis açıları olmuştur. Siklon gövdesi ölçüsü aynı zamanda giriş bölgesi ölçüsüne de eşdeğerdir ve 18mm çapında tasarlanmıştır. Siklon boyu ise (ıkış borusu hariç, girişten partikül toplama bölgesine kadar olan kısım) 80 mm olarak tasarlanmıştır. Giriş kısmından 3 mm sonra helisel bölge başlamaktadır ve helis başlangıç ve bitiş uzunluğu 27mm olarak tasarlanmıştır.

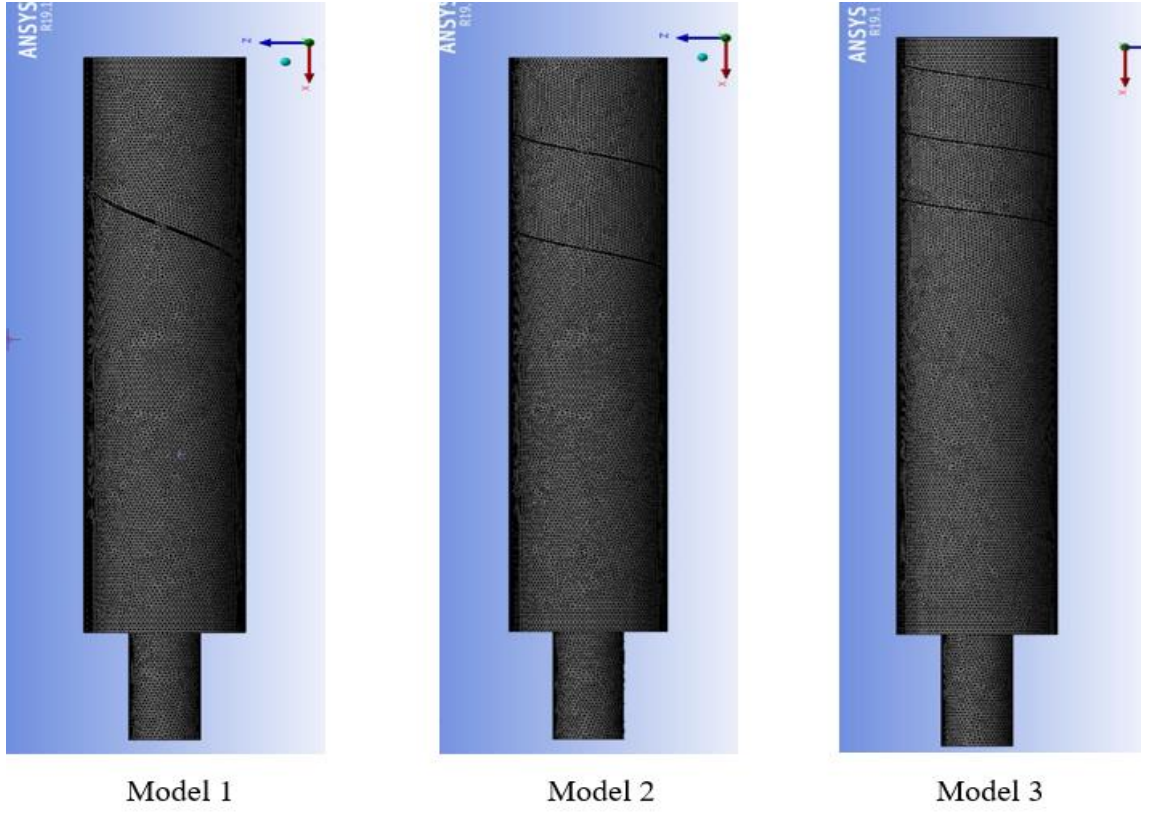


Şekil 3.5. Farklı Helis Açılara Göre Modellenmiş Siklon Ayırıcıların Teknik Resim Görüntüsü

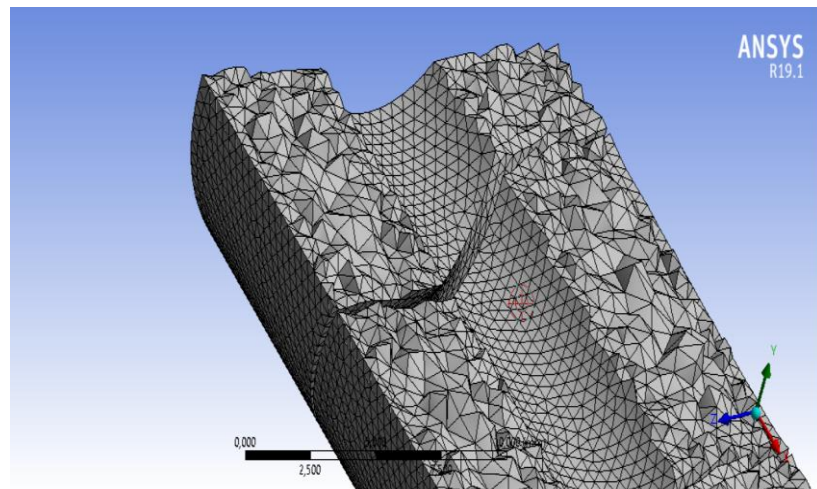
3.3.6. Siklon Ayırıcı İçin Çözüm Ağının Oluşturulması

Yapılan her üç model için çözüm ağları farklılık göstermektedir. Bunun nedeni de Spiral açılarındaki farklılıkların geometride oluşturduğu ufak değişikliklerden kaynaklanmasından dolayıdır. Genel olarak çözüm ağlarımızı tetrahedral çözüm ağlarından oluşmaktadır. Hexahedron mesh yapıları hem çözüm süresi bakımından, hem daha az eleman sayısı ile tetrahedron ağ yapılarına göre avantajlı olsa da genel olarak hexahedron ağ yapıları daha karmaşık yapıdaki geometriler için uygun olamamaktadır. Bunun nedeni genellikle dikdörtgensel prizmalar şeklindeki yapıları desteklemesidir. Buna karşın tetrahedron ağ yapıları ise özellikle aerodinamik yapılar gibi daha kompleks geometriye sahip olan yapılarda tercih edilmektedir. Bizim de yaptığımız çalışmada tetrahedron çözüm ağı yapılarını tercih edilmiştir. Çünkü içerisinde barındırdığı spiral

bölgeden dolayı kompleks bir yapı haline gelmiştir. Bu nedenle tetrahedron yapılar seçilmiştir. Şekil 3.6’da her bir model için oluşturulmuş çözüm ağları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Her Bir Model İçin Oluşturulan Ağ Yapıları (Mesh) Gösterimi



Şekil 3.7. Mesh Yapısının Detaylı Gösterimi

Ayrıca Çizelge 3.1 de her bir model için oluşturulmuş ağ yapıları hakkında genel olarak bilgi verilmiştir. Genel olarak mesh yapıları bir biri ile benzerlik gösterse de farklılık oluşturan kısımlar spiral bölgelerinin olduğu kısımlardır.

Çizelge 3.1. Siklon Ayırıcı Modellerin Ağ Yapılarının Genel Bilgileri

Ağ Yapısı Özellikleri	Model 1	Model 2	Model 3
Eleman Tipi	Tetrahedron	Tetrahedron	Tetrahedron
Eleman Sayısı	615368	630465	646576
Düğüm Sayısı	119683	123135	126795
Max. Skwnees	0,83	0,82	0,81
Min orthogonal	0,17	0,18	0,19
Max. Eleman boyutu	1 mm	1 mm	1 mm
Ortalama Eleman Boyutu	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm
Çözüm Ağı Yüzey Sayıları	Model 1	Model 2	Model 3
Giriş	1	1	1
Çıkış	1	1	1
Toplama Bölgesi (trap)	1	1	1
Çevreleyici Duvarlar	10	12	14
Çıkış Borusu Bölgesi	3	3	3

Her bir model için ağ yapıları sayıları arttırılarak analizler yeniden kontrol edilmiştir. Buradaki amaç yapılan çalışmanın ağ elemanları sayısından bağımsızlığını göstermektir. Model 1 için 790453, 932218 ve 1050882 ağ elemanı sayılarında, model 2 için 811767, 958528 ve 1078386 ağ elemanı sayılarında ve model 3 için 831527, 982919 ve 1107427 ağ elemanı sayılarında yapılan analizlerde çizelge 3.1 de verilen ağ elemanı sayılarında yapılan analizler karşılaştırılmış olup siklon ayırıcının fiziki özelliklerindeki değişimlerin kabul edilebilir değerler içinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum da yapılan çalışmanın ağdan bağımsızlığının oluşturulan ağ sayısı değerlerinde geçerli olduğunu göstermiştir.

3.3.7. Sınır Şartları

Sınır şartları denklemler istemi için son derece önem arz eden değerler ve kabuller bütünüdür. Bir çok denklem yapısı genel olarak tanımları ifade ederler. Ancak sınır şartlar denklemlerdeki genel yapıyı kendi içerisinde özele indirgeyerek sistemin sayısal çözüm yöntemleri sayesinde çözümlmesine olanak sağlar. Ağ yapısında belirlenen sınır bölgelerinden sonra sıra sınır şartlarının sisteme tanıtılmasına gelir. Bu çalışmada sınır şartları Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi programa tanıtılmıştır ve çözüm yöntemleri bu sınır şartları üzerinden ilerlemiştir. Bazı değerler programda mevcut olan varsayılan değerler kullanılarak çözüme gidilmiştir.

Çizelge 3.2. Her Bir Model için Sınır Şartları

Boundary Conditions	Değerler
Akışkan Yoğunluğu (Hava)	1.22 kg/m ³
Akışkan Viskozitesi (Hava)	1,79E-05
Akışkan Giriş Hızı	5, 10, 15 m/s
Walls	No Slip Condition
Pürüzlülük	0,5 (Varsayılan)
Türbülans Yoğunluğu	5%
Türbülans Viskozite Oranı	10
Çıkış	Basınç Merkezli

Sınır şartları belirlendikten sonra çözüm algoritmaları ve türbülans modelleri belirlenmelidir. Çözüm algoritmaları analiz edilen sistemler için son derece önem arz etmektedir. Bu nedenle sistemin fiziki şartlarını önceden öngörmekte fayda vardır. Aksi halde denklem sistemleri ve çözüm algoritmaları arasındaki senkronizasyon eksikliği çözümü doğruluk kriterinden uzaklaştırıp çok daha farklı sonuçlar ortaya koyabilir. Bazen matematiksel olarak denklemlerin çözümünü olanaksız kılabilir. Bu nedenle çözüm algoritmalarını seçerken sistemin fiziki şartları iyi tanınmalı ve de literatürden yardım alarak hareket edilmelidir.

Karagöz ve ark.(2007) yaptıkları çalışmalarda çözüm algoritması olarak siklon ayırıcıların numerik hesaplarında en doğru sonucun RSM Türbülans Modeli için SIMPLEC algoritması ve momentum değerleri için de quadratic upstream interpolation for convective kinetics (QUICK) algoritmasının deneysel yapılan sonuçlara en yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 3.3. Çözüm Yöntemi Parametreleri

Scheme	SIMPLEC
Pressure	PRESTO!
Momentum	QUICK
Turbulent Kinetk Energy	Second Order
Turbulent dissipation rate	Second Order
Reynold Stresses	First Order

Wu. X. ve ark.(2016) yaptıkları eksenel girişli siklon çalışmasında numerik olarak inceledikleri dört farklı model için, her bir modelde türbülans modeli olarak RSM ve çözüm algoritması olarak SIMPLEC (semi-implicitmethod pressure-linked equations consistent), momentum için QUICK, basınç için PRESTO! (Pressure Staggering Option) seçmişlerdir.

Genel olarak Siklon ayırıcılar için yapılan çalışmalarda seçilen parametreler yukarıdaki Çizelge 3.3'deki gibidir. Yapılan numerik çalışmalar deneysel çalışmalar ile karşılaştırılır ve deneysel sonuçlara en yakın değerler bu parametreler ile çözülen denklem sistemleri ile en yakın sonucu verir.

3.3.8. DPM (Discrete phase models)

ANSYS Fluent yazılımındaki bir diğer özellikte DPM (Discrete phase models) özelliğidir. Bu özellik sayesinde oluşturduğumuz geometrinin seçilen bir bölümünden partikül enjekte ederek sonuçlarını analiz etme şansımız vardır. Özellikle siklon ayırıcı uygulamaların numerik analizlerinde toplama verimini ve partiküllerin sistem içerisinde izlediği yolu vb. özellikleri hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar. Yapılan bu çalışmada da DPM özelliği kullanılmıştır. Sistem içerisine belirli miktarda toz partikülleri belirli boyutlarda enjekte edilmiş ve sonuçları izlenmiştir. Bu sayede toplama verimi hakkında bilgiler edinilmiştir.

Kalsiyum-Sülfat tozları sisteme enjekte edilmiştir. Boyutları 0,1µm den 10µm ye kadar olan toplamda 20şer tane DPM uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu veriler sonuçlar kısmında ayrıca ele alınmıştır ve toplama verimine etkisi sonuçları belirtilmiştir. Aşağıdaki çizelgede da DPM modeli için kullanılan parametreler çizelgeler halinde verilmiştir.

Çizelge 3.4. DPM (Discrete Phase Model) parametrelerinin gösterimi

Sınır Şartları Tipleri	Discrete Phase Model
Inlet	Injection (Face Normal Direction)
Outlet	Escape
Wall	Reflect
Bottom	Trap
Max. Number of Steps	50000
Step Length Factor	5
Particule Diameter	0,1 µm-10 µm
Total Flow Rate	1e-20 kg/s
Material	Calcium-Sulfate

4. BULGULAR

Yapılan çalışmada 3 farklı siklon modeli için 3 farklı giriş hızında toplam 9 adet numerik analiz yapılmıştır. Her bir analizde siklon çalışma verimi, hız, basınç ve üç boyutlu akışkan yol haritaları sonuçları elde edilmiştir. Analizde kullanılan akışkan değeri yazılımın içinde mevcut olan hava akışkanının varsayılan değerleri ile kullanılmıştır. Ayrıca toz olarak seçtiğimiz madde de kalsiyum sülfat tozudur. Genel olarak bulunması kolay ve deneysel çalışmalarda sıkça tercih edilen bir tozdur. Burada kullanılan siklon modellerinin genel olarak ölçüleri bir biri ile aynıdır. Değişken olan noktalar ise siklon girişinde bulunan spiral bölgenin helis açısının farklılık göstermesidir. Aynı zamanda aynı konfigürasyon için de farklı giriş hızı değerleri ile birlikte analizler yapılmıştır ve bu değişken durumlar birbirleri ile mukayese edilmiştir.

Yapılan çalışmada öncelikle sistemimiz toz partikülleri olmadan sadece girişinde havanın etkisinde olarak bir analiz yapılmıştır. Daha sonra kalsiyum sülfat tozları sisteme enjekte edilmiş ve yeniden hesaplamalar devam ettirilmiştir. Her bir çalışmada çapları 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar olan toz tanecikleri enjekte edilmiştir ve sonuçları bir çizelgede toplanmıştır. Daha sonra siklon toz toplama verimleri bu çizelge yardımı ile hesaplanmıştır. Toz toplama verimi ise denklem 4.1 deki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{siklon toplama verimi} = \frac{\text{toz toplayıcıda tutulan partikül sayısı}}{\text{sisteme enjekte edilen toplam partikül sayısı}}$$

(4.1)

Analizler sonucunda elde edilen bulgular ana başlıklar olarak;

- Toplama verimi
- Basınç kayıpları
- Giriş hızlarının toplama verimine etkisi

- Helis açılarının toplama verimine etkisi
- Belirli tanecik boyutlarında helis açısının toplama verimine etkisi
- Belirli tanecik boyutlarında belirli giriş hızlarında toplama veriminin etkisi

Olarak karşılaştırılmıştır.

4.1. Siklonlarda Toplama Verimi

Yapılan analizlerde her bir siklon modeli için her bir giriş açısı değerinde ayrı ayrı toplama verimleri hesaplanmıştır. Toplama verimleri partikül çapına göre 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar olan toz toplama verileri ile toplama verimi elde edilmiştir. Ayrıca 3 farklı helis açısında, 3 farklı giriş hızında sonuçlar elde edilmiştir. Numerik çalışmanın sonuçları çizelge ve grafikler halinde alt başlıklarda paylaşılmıştır.

4.1.1. Model 1 için Toplama Verimi Sonuçları

Çizelgelerde verilen partikül boyutları μm boyutunda olup 0,1 μm den 10 μm ye kadar olan toz toplama verimleri hesaplanmıştır. İlk model siklonumuz için analizlerimiz 5, 10, 15 m/s giriş hızlarında gerçekleştirilmiştir. Analiz boyunca sistem içerisine toplamda her partikül boyutu için 1858 er tanecik enjekte edilmiştir. Siklon gövdesinin alt noktasında belirlenen toplama bölgesinde toplanan toz miktarı ile toplam toz miktarı mukayese edilmiştir ve buradan Denklem 4.1 kullanılarak toplama veriminin yüzdelerik değeri olarak çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3 te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1. Model 1, 5 m/s için analiz verileri

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,2	1858	1550	5	303	0,269106566
0,4	1858	1525	8	325	0,430570506
0,6	1858	1527	8	323	0,430570506
0,8	1858	1515	11	332	0,592034446
1	1858	1422	14	422	0,753498385
2	1858	1095	19	744	1,022604952
3	1858	1008	4	846	0,215285253
4	1858	1374	25	459	1,345532831
5	1858	1324	61	473	3,283100108
6	1858	1474	189	195	10,1722282
7	1858	144	1358	356	73,08934338
8	1858	141	1620	97	87,19052745
9	1858	15	1805	38	97,1474704
10	1858	0	1820	38	97,9547901

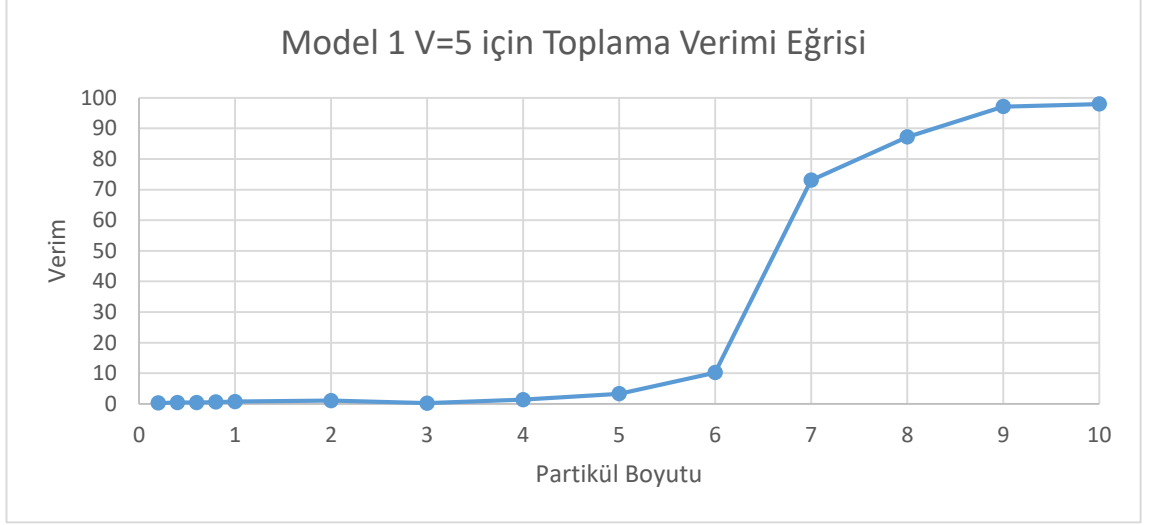
Çizelge 4.2. Model 1, 10 m/s için Analiz Verileri

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,2	1858	1575	6	277	0,322927879
0,4	1858	1551	6	301	0,322927879
0,6	1858	1507	16	335	0,861141012
0,8	1858	1349	21	488	1,130247578
1	1858	1139	37	682	1,99138859
2	1858	160	484	1214	26,04951561
3	1858	0	268	1590	14,42411195
4	1858	0	1342	516	72,22820237
5	1858	0	1789	69	96,28632939
6	1858	0	1851	7	99,62325081
7	1858	0	1852	6	99,67707212
8	1858	0	1857	1	99,94617869
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

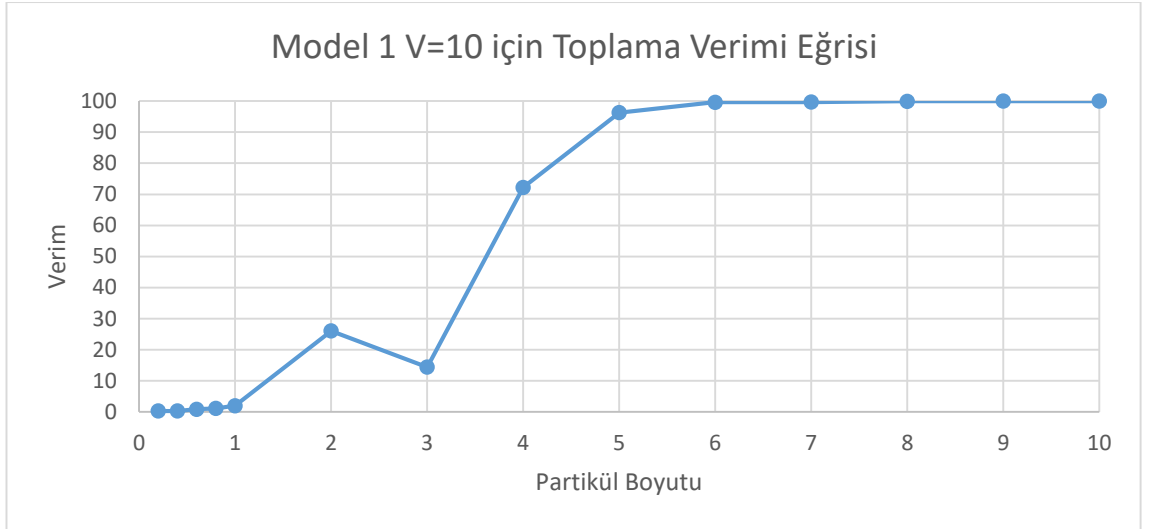
Çizelge 4.3. Model 1, 15 m/s için Analiz Sonuçları

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,2	1858	1641	5	212	0,269106566
0,4	1858	1554	23	281	1,237890205
0,6	1858	1404	35	419	1,883745963
0,8	1858	1069	36	753	1,937567277
1	1858	424	52	1382	2,798708288
2	1858	0	1600	258	86,11410118
3	1858	0	1844	14	99,24650161
4	1858	0	1788	70	96,23250807
5	1858	0	1521	337	81,86221744
6	1858	0	1694	164	91,17330463
7	1858	0	1855	3	99,83853606
8	1858	0	1858	0	100
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

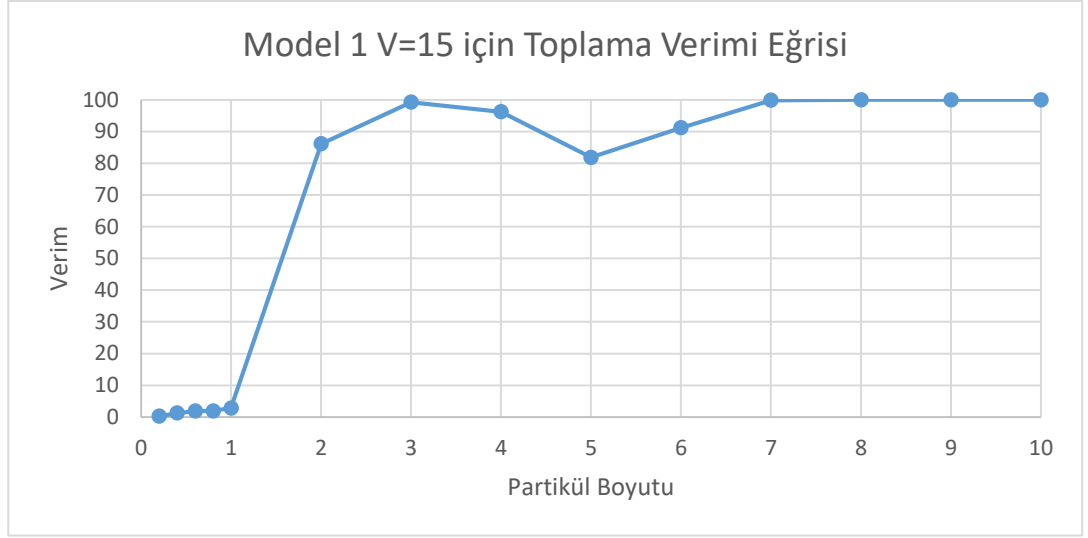
Siklon ayırıcının toplama verimi grafik üzerinde gösterimi aşağıdaki sonuçlar gibidir. Burada da giriş hızının artması ile siklon ayırıcının toplama performansının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca analizler 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar olan partikül boyutlarında gerçekleştirilmiştir ve bu grafiklerden her bir partikül boyu için toplama verimleri de belirtilmiştir.



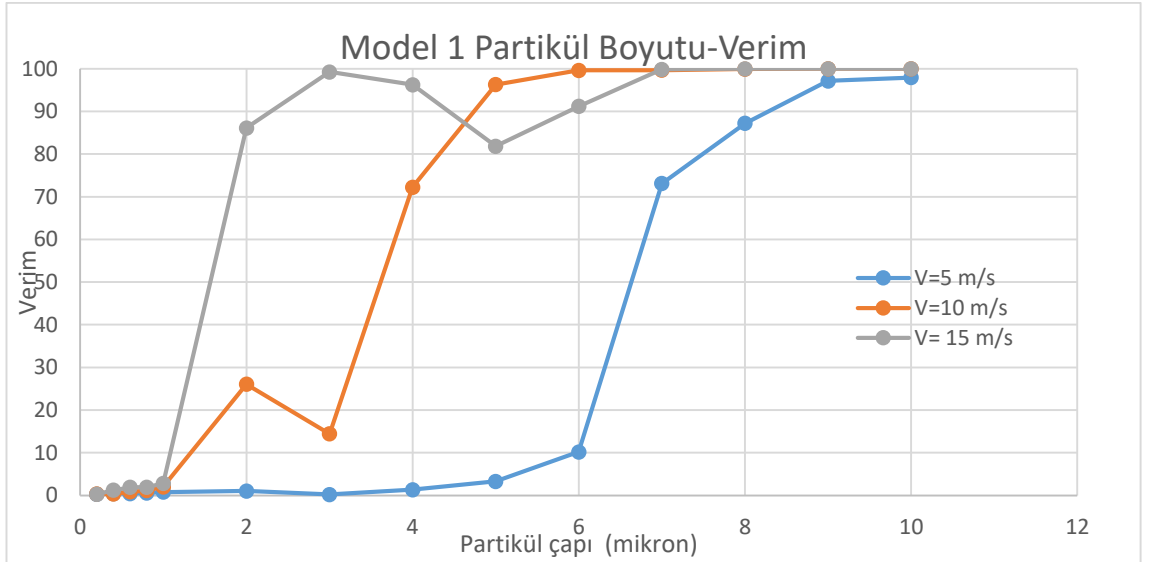
Şekil 4.1. Model 1, Giriş Hızı 5 m/s için toplama verimi eğrisi



Şekil 4.2. Model 1, Giriş Hızı 10 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



Şekil 4.3. Model 1, Giriş Hızı 15 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



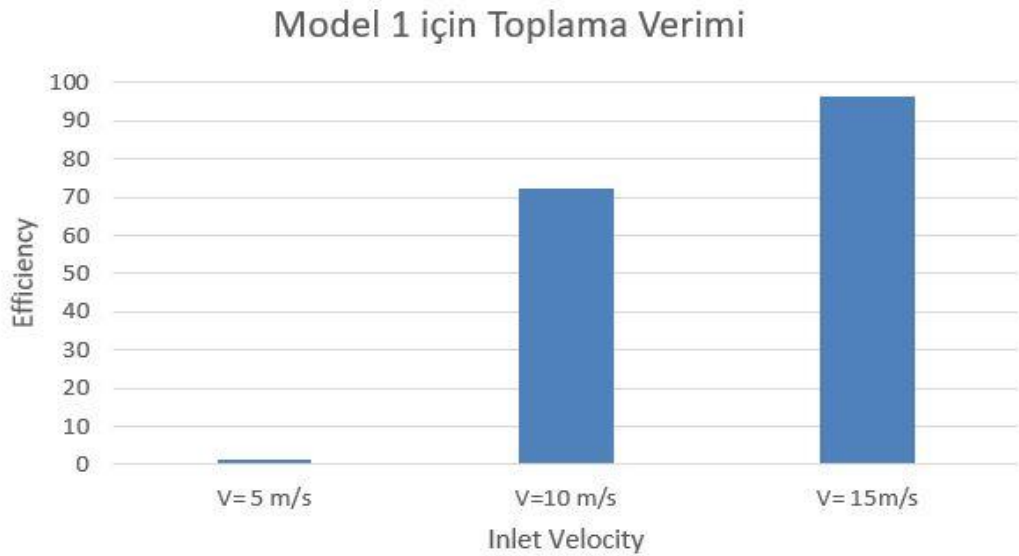
Şekil 4.4. Model 1 için Farklı Giriş Hızlarında Verim Eğrisi

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'den de görüldüğü gibi Siklon içerisine giren havanın hızı arttıkça toplama verimi ve spesifik partikül boyutlarında da toplama veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Giriş hızının artması ile daha küçük boyutlara sahip partiküllerin de belirlenen bölgede toplanabildiği görülmüştür. Genel olarak bütün siklonlarda giriş hızının artması ile toplama verimi artmaktadır.

Siklon ayırıcılarda ayrışmayı sağlayan etken siklon içerisinde oluşan iç kuvvetlerin etkisidir. Bu kuvvetler siklon içerisinde oluşan merkezkaç ve santrifüj kuvvetlerdir. Bu kuvvetler sayesinde siklon içerisinde ayrışma sağlanır ve bu kuvvetlerin fonksiyonu olan değerler değiştirildikçe de toplama verimi değişmektedir. Bu fonksiyonlardan biri de giriş hızıdır. Giriş hızındaki değişikliklerin siklon çalışma verimini nasıl etkilediğini Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’de de gözlemlemekteyiz. Giriş hızının artması ile siklon içerisindeki santrifüj ve merkezkaç kuvvetler artmakta ve buda partiküllerin çepere doğru daha yüksek bir ivme ile itilmesini sağlamaktadır. Bu sayede de siklon ayırıcının toplama verimi artmaktadır.

Çalışkan (2017)’de yaptığı çalışmasında Siklon içerisine giren akışkan debisinin arttıkça siklon ayırıcının toplama veriminin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca Gimbun ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada siklon ayırıcıya giren akışkanın hızının artmasıyla toplama veriminin artacağını fakat belirli bir noktadan sonra sabit kaldığını saptamışlardır.

Siklon ayırıcılarda verimi belirleyen diğer bir etken de kritik parçacık çapının partikül konsantrasyonuna oranı ile



Şekil 4.5. Model 1 için 4 mikronluk Partikül Boyutunda Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi

4.1.2. Model 2 için Toplama Verimi Sonuçları

Model 1 de olduğu model 2 de de benzer sonuçlara rastlanmaktadır. Ayrıca model 2 de model 1 den farklı olarak helis açısı azaltılmıştır. Buda aynı uzunlukta spiral uzunluğunun model 1 e göre 2 kat fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle siklon ayırıcı içerisindeki santrifüj kuvvetler artmıştır ve mevcut şartlarda model 2, model 1 e göre daha efektif sonuçlar vermiştir. Modeller arasındaki kıyaslama ayrı bir konu başlığı ile tekrardan irdelenmiştir. Çizelge 4.4, 4.5 ve 4.6’da model 2 için yapılan analiz sonuçları paylaşılmıştır ve Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de toplama verim eğrileri belirtilmiştir.

Çizelge 4.4. Model 2, Giriş Hızı = 5 m/s için Analiz Sonuçları

Partikül Boyutu (μm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,2	1858	1490	6	362	0,322927879
0,3	1858	1472	12	374	0,645855759
0,4	1858	1459	15	384	0,807319699
0,5	1858	1386	17	455	0,914962325
1	1858	632	19	1207	1,022604952
2	1858	0	1	1857	0,053821313
3	1858	0	13	1845	0,699677072
4	1858	0	767	1091	41,28094726
5	1858	0	1620	238	87,19052745
6	1858	0	1771	87	95,31754575
7	1858	0	1818	40	97,84714747
8	1858	0	1833	25	98,65446717
9	1858	0	1824	34	98,17007535
10	1858	0	1814	44	97,63186222

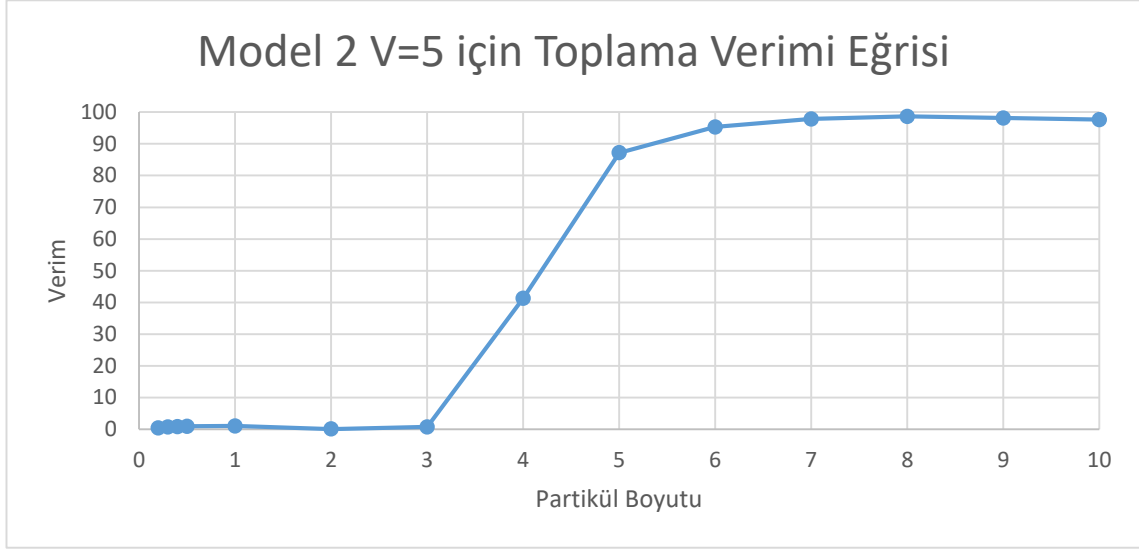
Çizelge 4.5. Model2, Giriş Hızı = 10 m/s için Analiz Sonuçları

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,2	1858	1350	28	480	1,506996771
0,3	1858	1167	39	652	2,099031216
0,4	1858	929	87	842	4,682454252
0,5	1858	643	149	1066	8,019375673
1	1858	0	0	1858	0
2	1858	0	1553	305	83,58449946
3	1858	0	1842	16	99,13885899
4	1858	0	1851	7	99,62325081
5	1858	0	1855	3	99,83853606
6	1858	0	1841	17	99,08503767
7	1858	0	1857	1	99,94617869
8	1858	0	1858	0	100
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

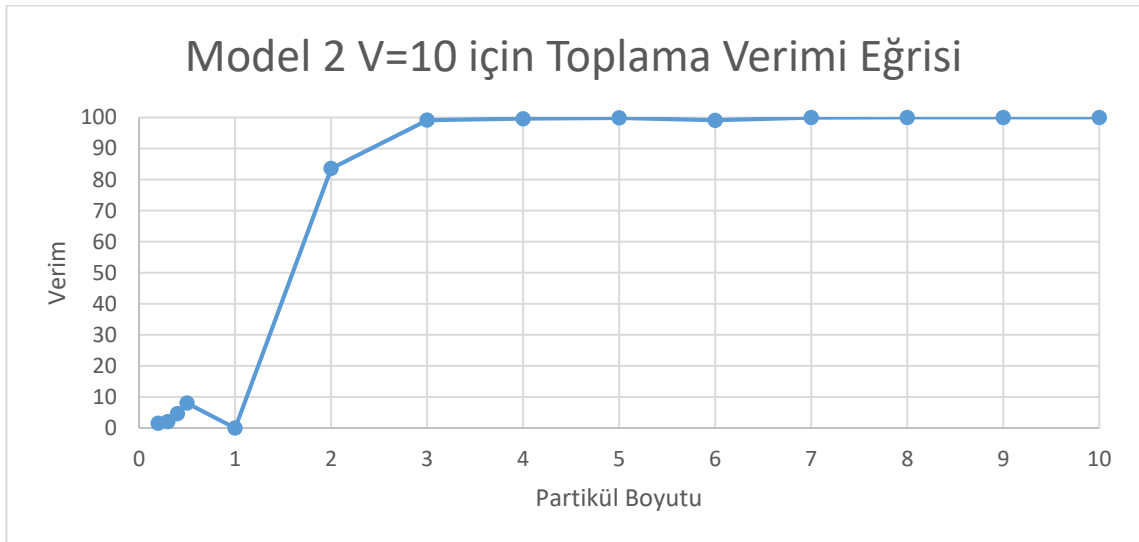
Çizelge 4.6. Model 2, Giriş Hızı = 15 m/s için Analiz sonuçları

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,2	1858	1008	848	2	45,64047363
0,3	1858	661	1177	20	63,34768568
0,4	1858	446	1398	14	75,24219591
0,5	1858	47	1805	6	97,1474704
1	1858	0	1851	7	99,62325081
2	1858	0	1852	6	99,67707212
3	1858	0	1852	6	99,67707212
4	1858	0	1858	0	100
5	1858	0	1858	0	100
6	1858	0	1858	0	100
7	1858	0	1858	0	100
8	1858	0	1858	0	100
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

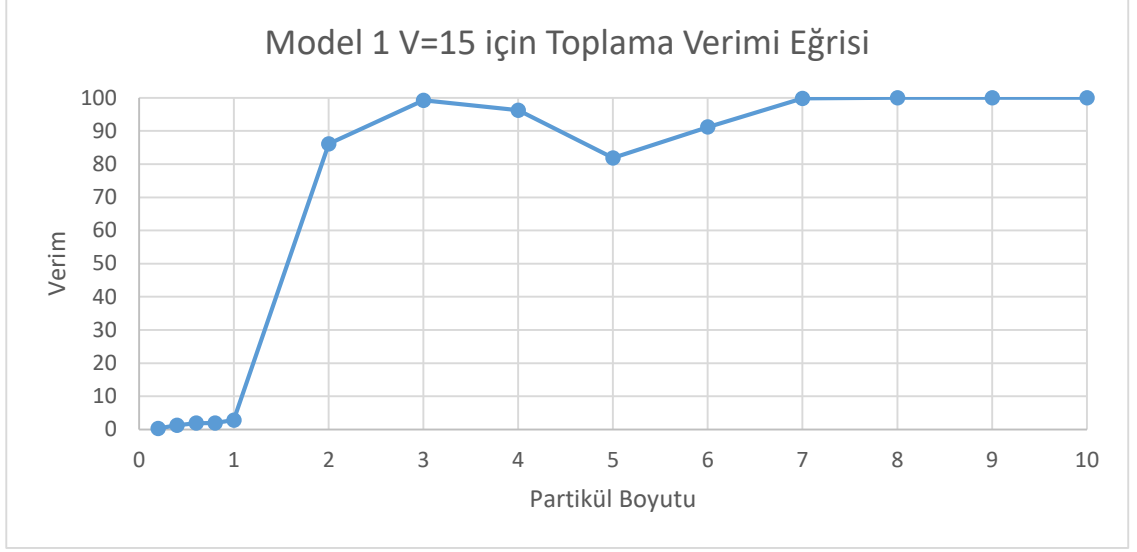
Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de paylaşılan eğriler 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar olan partikül boyutlarında yapılan analizlerin toplama verimlerini göstermektedir. Burada partikül boyutu mikrometre bazında olup verim eğrisi de bizlere yüzdelik olarak bilgi vermektedir. Bu eğrilerden de anlaşılacağı üzere giriş hızı arttıkça aynı partikül boyutunda olan toplam verimlerinin de arttığı gözlemlenmektedir.



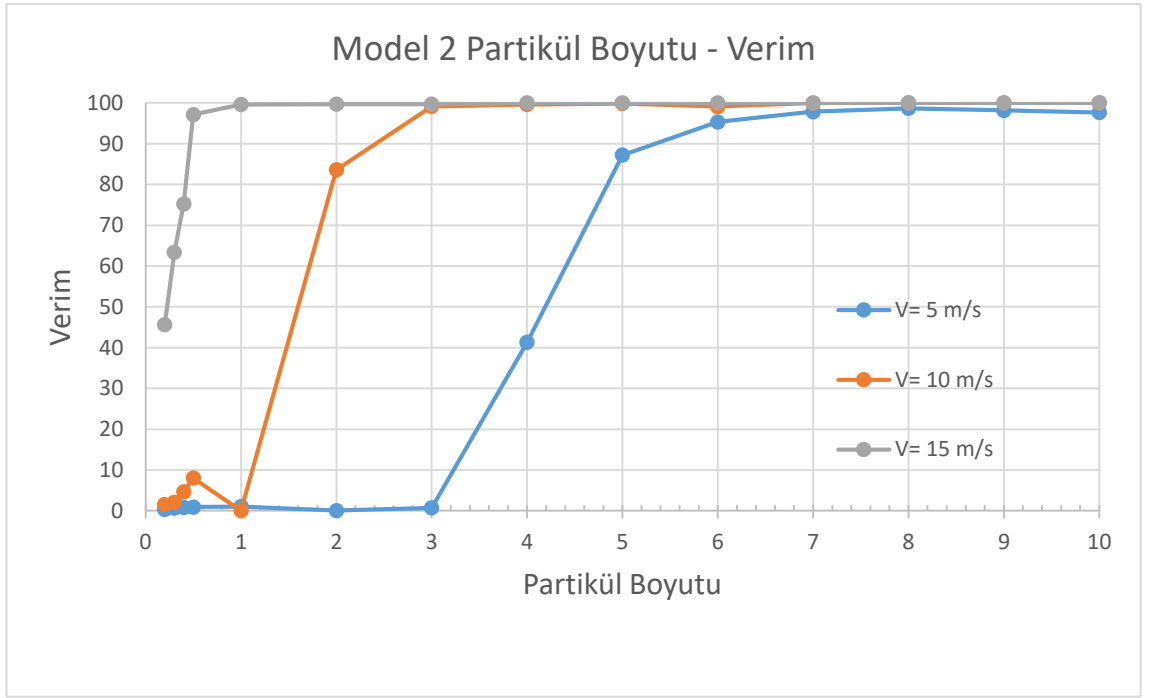
Şekil 4.6. Model 2, Giriş Hızı 5 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



Şekil 4.7. Model 2, Giriş Hızı 10 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



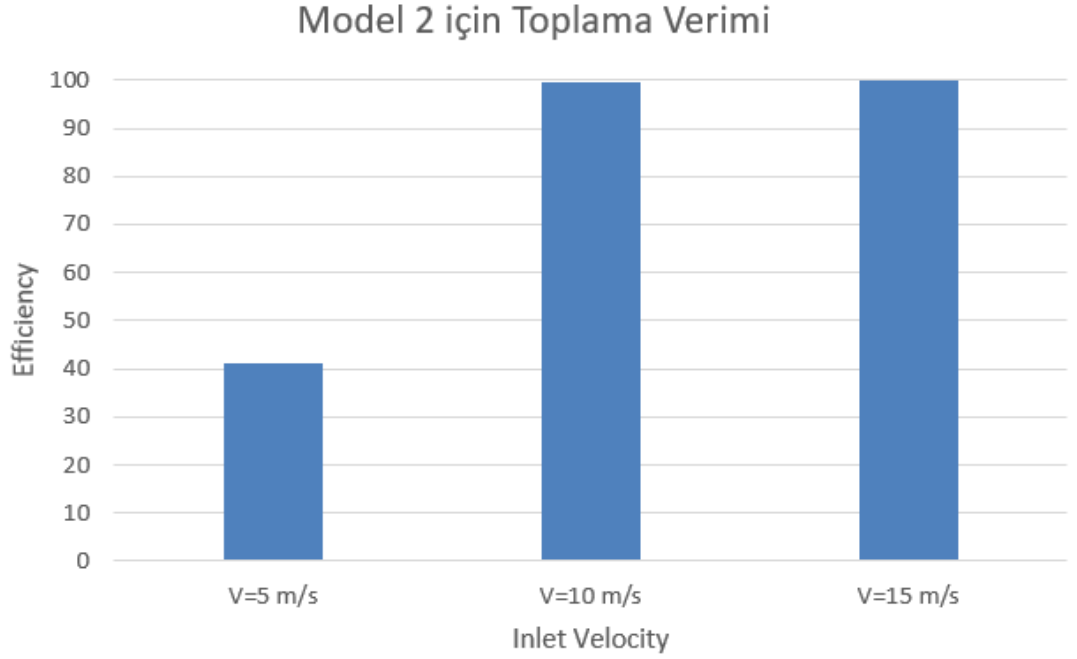
Şekil 4.8. Model 2, Giriş Hızı 15 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



Şekil 4.9. Model 2 için Farklı Giriş Hızlarında Verim Eğrisi

Model 2 için yapılan analizlerde de seçilen referans partikül boyutu olarak 4 mikron boyutunda yapılan analizler her bir giriş hızı için mukayese edilmiştir ve sonuçları Şekil 4.10'deki gibi bulunmuştur. Burada da görüldüğü gibi siklon ayırıcıya giren akışkan hızı arttıkça toplama verimi artmaktadır. Bunun nedeni de model 1 de de açıklandığı gibi

santrifüj kuvvetlerin etkisinin artması ile partiküllerin çepere doğru olan ivmesinin artmasıdır.



Şekil 4.10. Model 2 için 4 mikronluk Partikül Boyutunda Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi

4.1.3. Model 3 için Toplama Verimi Sonuçları

Model 3 için de bakıldığında model 1 ve model 2 deki koşullar geçerlidir. Siklon ayırıcı içerisine giren akışkanın hızı arttıkça toplama verimi artmıştır. Bunun yanında helis açısındaki farklılığından dolayı model 3 teki siklon ayırıcı içerisindeki santrifüj kuvvetlerin değerinin diğer iki modele göre daha büyük olmasından dolayı aynı şartlarda model 3 için toplama verimi model 1 ve model 2 ye göre daha yüksektir. Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9'da paylaşılmıştır.

Çizelge 4.7. Model 3, Giriş Hızı = 5 m/s için Analiz Sonuçları

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,1	1858	1349	19	490	1,022604952
0,2	1858	1304	14	540	0,753498385
0,5	1858	1098	28	732	1,506996771
0,8	1858	801	38	1019	2,045209903
1	1858	263	41	1554	2,206673843
2	1858	0	0	1858	0
3	1858	0	100	1758	5,382131324
4	1858	0	735	1123	39,55866523
5	1858	0	1776	82	95,58665231
6	1858	0	1823	35	98,11625404
7	1858	0	1847	11	99,40796555
8	1858	0	1855	3	99,83853606
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

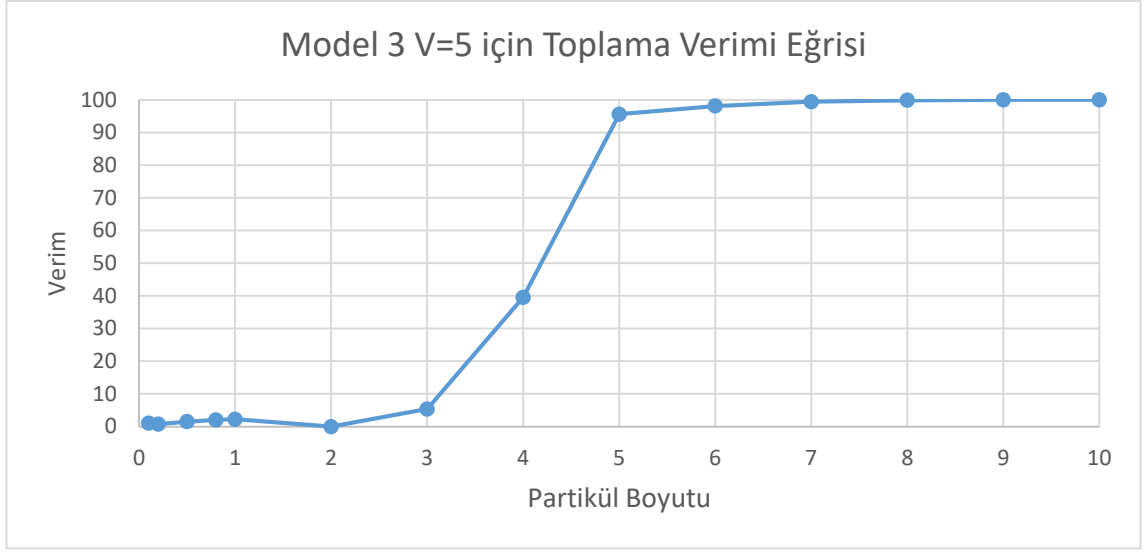
Çizelge 4.8. Model 3, Giriş Hızı = 10 m/s için Analiz Sonuçları

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,1	1858	1424	215	219	11,57158235
0,2	1858	1217	219	422	11,7868676
0,5	1858	569	923	366	49,67707212
0,8	1858	6	1580	272	85,03767492
1	1858	0	1815	43	97,68568353
2	1858	0	1844	14	99,24650161
3	1858	0	1852	6	99,67707212
4	1858	0	1857	1	99,94617869
5	1858	0	1858	0	100
6	1858	0	1858	0	100
7	1858	0	1858	0	100
8	1858	0	1858	0	100
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

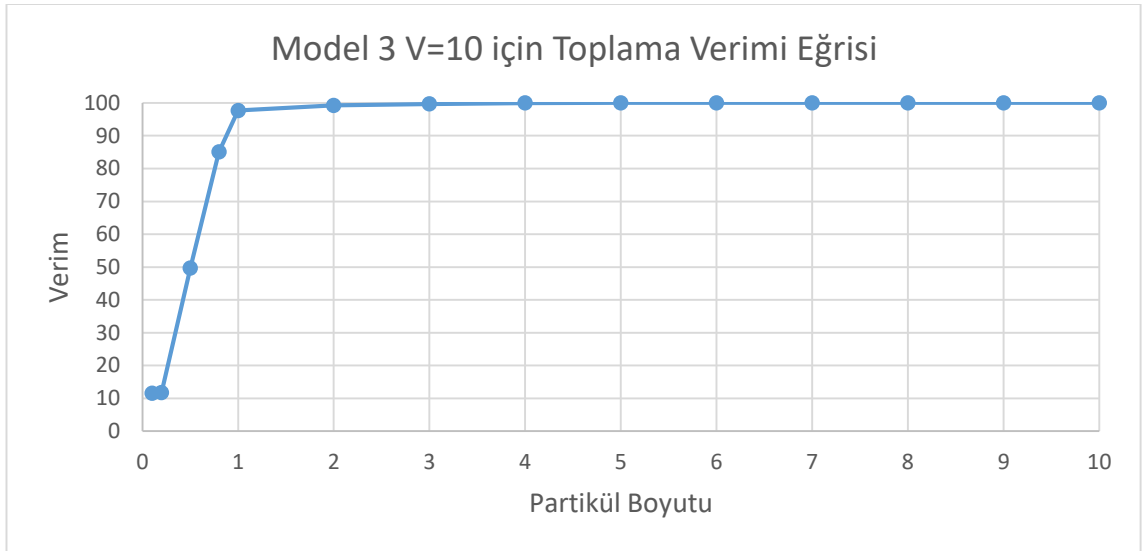
Çizelge 4.9. Model 3, Giriş Hızı = 15 m/s için Analiz Sonuçları

Partikül Boyutu (µm)	Toplam Enjekte Edilen	Kaçan	Tutulan	Tamamlanmamış	Verim (Yüzde)
0,1	1858	1389	452	17	24,32723358
0,2	1858	1008	848	2	45,64047363
0,5	1858	47	1805	6	97,1474704
0,8	1858	0	1855	3	99,83853606
1	1858	0	1856	2	99,89235737
2	1858	0	1857	1	99,94617869
3	1858	0	1858	0	100
4	1858	0	1858	0	100
5	1858	0	1857	1	99,94617869
6	1858	0	1858	0	100
7	1858	0	1858	0	100
8	1858	0	1858	0	100
9	1858	0	1858	0	100
10	1858	0	1858	0	100

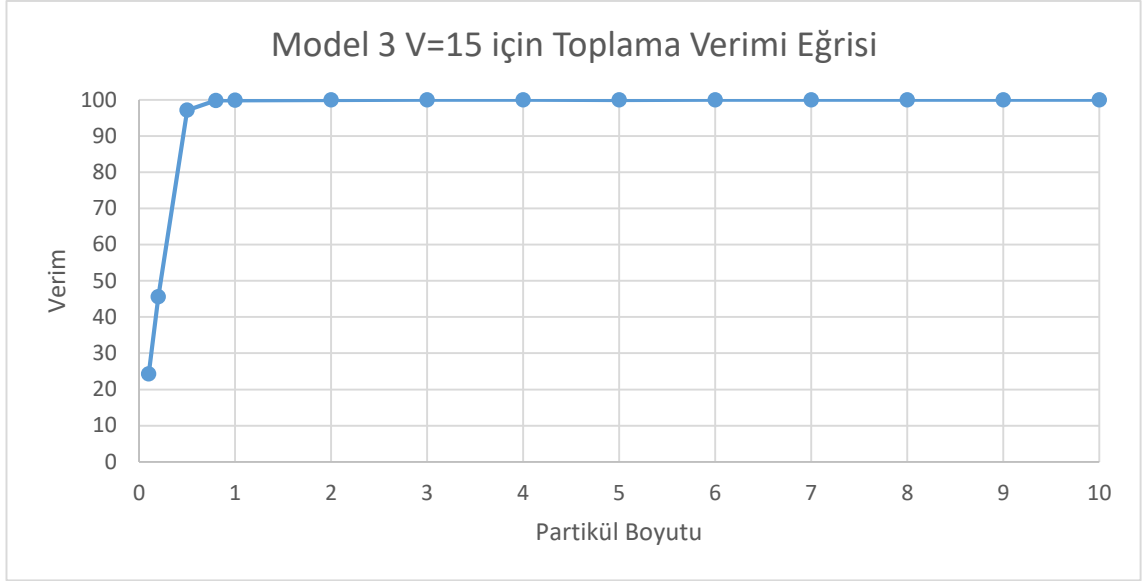
Model 3 için elde edilen toplama verimi eğrileri de Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'deki gibidir. Bu grafiklerde de görüldüğü gibi 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar olan partikül boyutlarında yapılan analizlerde siklon ayırıcıya giren akışkan hızının artması ile toplama verimi artmıştır. Partikül boyutu büyüdükçe toplama verimi eğrilerinin tanjantı azalmaktadır. Bunun nedeni de siklon ayırıcının toplama veriminin maksimumuna ulaşmasıdır.



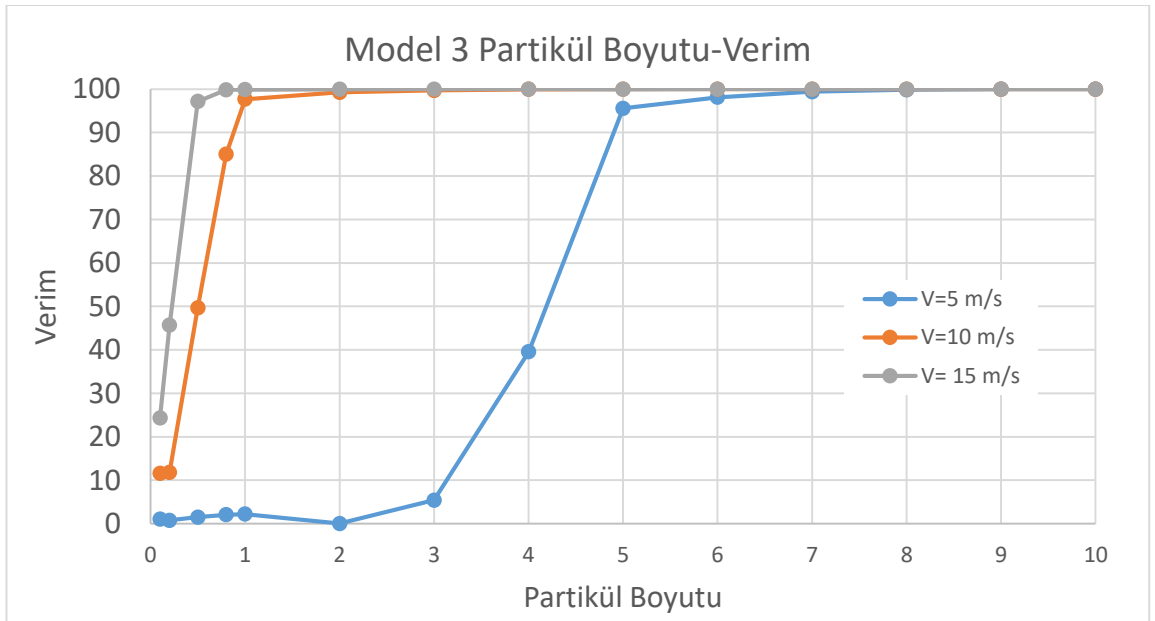
Şekil 4.11. Model 3, Giriş Hızı 5 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



Şekil 4.12. Model 3, Giriş Hızı 10 m/s için Toplama Verimi Eğrisi

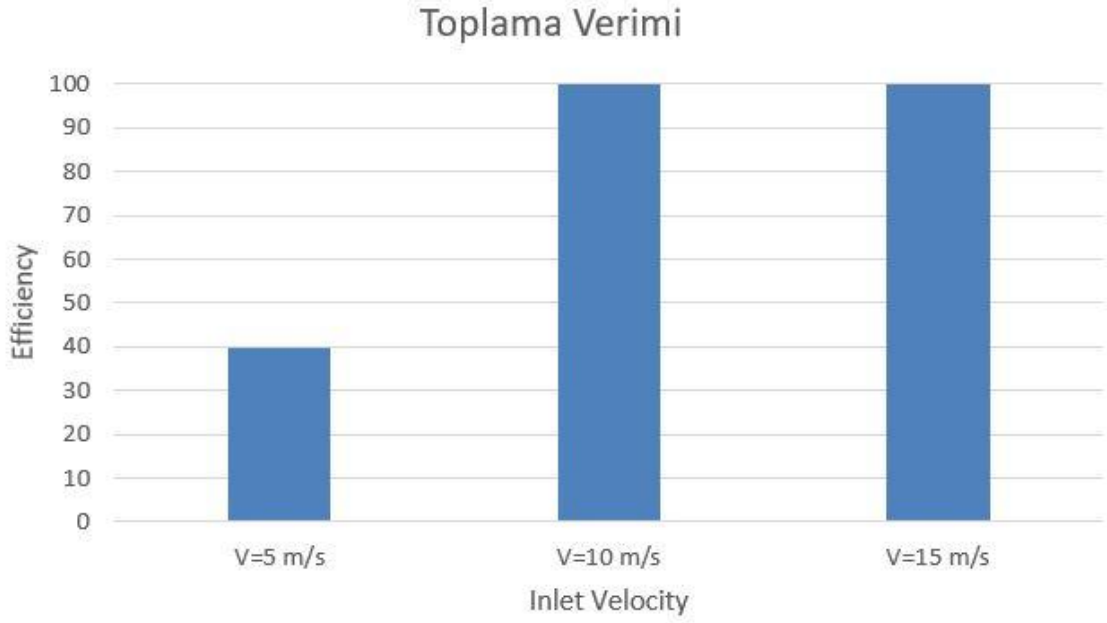


Şekil 4.13. Model 3, Giriş Hızı 15 m/s için Toplama Verimi Eğrisi



Şekil 4.14. Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Verim Eğrisi

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi aynı model siklon ayırıcı için farklı giriş hızlarının toplama verimine etkisi paylaşılmıştır. Model 1 ve model 2 den farklı olarak helis açısındaki farklılıktan dolayı santrifüj kuvvet artmıştır ve toplama verimi diğer iki modele göre belirlenen şartlarda daha yüksek çıkmıştır.



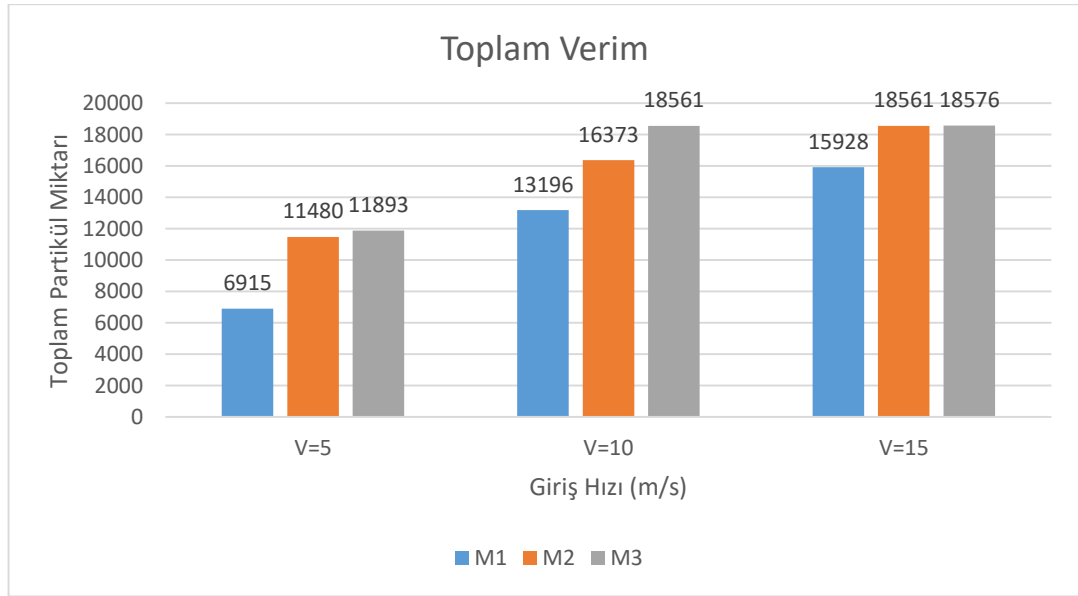
Şekil 4.15. Model 3 için 4 mikronluk Partikül Boyutunda, Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi

Çalışkan (2017) yaptığı deneysel çalışmasında 3 farklı Siklon ayırıcı konfigürasyonu ile farklı giriş hızlarında yaptığı çalışmasında benzer sonuçları elde etmiştir. Siklon ayırıcıya giriş hızının artması ile siklon ayırıcının toplam verimini arttırdığını vurgulamıştır. Belirli bir seviyeden sonra ise siklon toplama veriminin maksimuma ulaştığını gözlemlemiştir.

Fdleseed (2018) ise yaptığı hem deneysel hem numerik çalışma ile iki durumu karşılaştırmış, deneysel ve numerik çalışma sonuçlarının bir birine çok yakın olduğu sonucuna varmıştır. Numerik çalışma sonucunda farklı giriş hızları ile oluşturduğu sonuçlarda da giriş hızının artması ile siklon toplama veriminin arttığını belirtmiştir.

Karagöz ve ark. (2013) yaptığı deneysel çalışmada ise siklon ayırıcı için diğer parametreler sabit kalarak debi üzerinde yaptığı değişiklikler ile giriş hızının siklon toplama verimine etkisini incelemiştir. Ulaştığı sonuç ise bizim de çalışmamızda saptadığımız gibi hız arttıkça toplama veriminin artması yönünde olmuştur. Yine Kaya ve Karagöz (2009) yaptıkları nümerik çalışmada da düşük siklon ayırıcı girişi hızlarında daha düşük toplama verimleri elde ettiklerini görmüşlerdir.

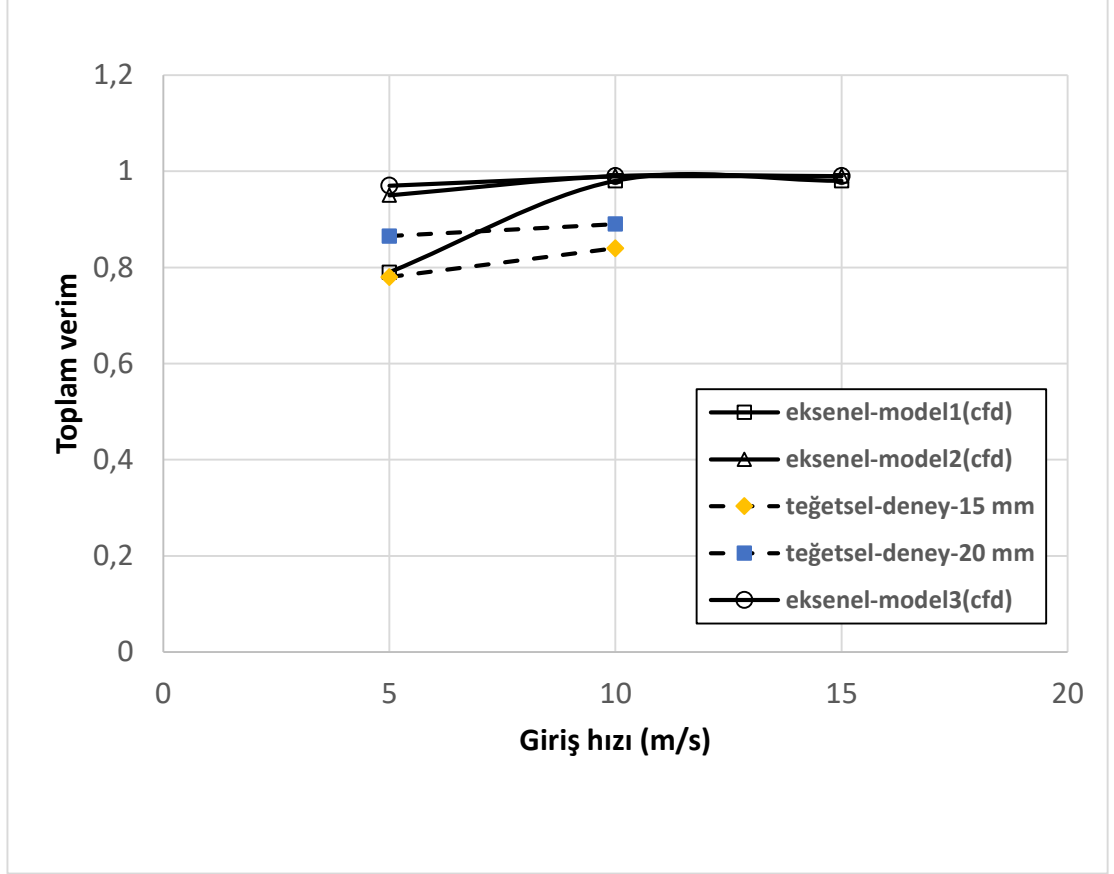
Genel olarak partikül boyutu arttıkça toplama veriminin arttığı gözlemlenmektedir. Fakat bazı partikül boyutlarında (Model 1 için 3 ve 5 mikron, Model 2 için 1 ve 2 mikron boyutundaki partiküllerde) kaçan partikül sayısı azalmasına rağmen tutulan partikül sayısında azalmalar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni de siklon içerisine giren partiküllerin o boyutlarda girdap bölgesi ile bir kuvvet dengesi oluşturup siklonu terk edememesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle siklon ayırıcı içerisinde tamamlanmayan partikül sayısı artmaktadır. Partikül yörüngeleri 3 boyutlu analizlerde animasyon olarak görüntülediğinde bu durum daha belirgin görünmektedir.



Şekil 4.16. Toplam Toplama Verimi Grafiği

Çizelge 4.10. Deneysel ve Numerik Çalışmaların Toplam Toplama Verimleri

Hız (m/s)	M1-CFD	M2-CFD	M3-CFD	den15	den20	den30
5	0,79	0,95	0,97	0,78	0,865	0,875
10	0,98	0,99	0,99	0,84	0,89	0,914
15	0,98	0,99	0,99			



Şekil 4.17. Toplam Toplama Verimlerinin Deneysel Ve Numerik Olarak Karşılaştırılması

Her bir model ve giriş hızı için yapılan analizler tekrardan irdelendiğinde Toplam toplama verimi Şekil 4.16. teki gibi karşımıza çıkmaktadır. Her bir model ve giriş hızı için sisteme toplamda 1 mikrondan 10 mikrona kadar olan 18580 partikül enjekte edilmiştir. Sisteme enjekte edilen partiküllerin her birinin hacmi hesaplandıktan sonra siklonda toplanan partiküllerin hacimlerinin toplam hacme oranı alınarak toplam toplama verimi hesaplanmıştır. Buradan da her bir model ve giriş hızı etkisi altında sistemlerin toplam toplama verimlerini görebilmekteyiz.

Şekil 4.17. ye bakıldığında toplam toplama verimi 5 m/s giriş hızı için teğetsel siklon ayırıcıda daha fazla iken giriş hızı arttıkça her bir modelin toplam toplama veriminin arttığı gözlemlenmektedir. Performans eğrilerinin tanjantlarına bakıldığında deneysel çalışmanın sonuçları ile paralellik göstermektedir. Verim tablosundaki oranlarda oluşan farklılık CFD yöntemi ile aynı çapta partiküller sisteme enjekte edilirken, deneysel

yöntemlerde partikül büyüklüklerinin dağılımlarının birim hacimde farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca deneysel ve eksenel yapılan çalışmalar özellikle model 2 ve model 3 için benzer şartlar göstermektedir. Bu durumda da yapılan numerik çalışmanın güvenilirliğini arttırmaktadır. Model 1 için kıyaslama yapıldığında helis açısındaki farklılıklar bu modelde performansı düşürmüştür. Bu durumda öngörülen bir durumdur. Çünkü model 1 deki helis açısının yüksek oluşu spiral sayısını azaltmış, bu durumda eksenel siklon ayırıcı içerisinde oluşan girdap kuvvetlerini toplama verimi açısından düşük kılmıştır.

Genel olarak bir siklon ayırıcının toplama verimini etkileyen en önemli faktörlerden biri giriş hızındaki değişimlerdir. Bunun nedeni özellikle teğetsel siklonlarda siklon ayırıcının gövdesine teğetsel şekilde giriş yapan akışkanın hız bileşeni ile siklon çeperine doğru bir merkezkaç kuvvet oluşturmasıdır. Bu merkezkaç ve santrifüj etkiler ile siklon ayırıcı içerisine giren gaz-katı fazındaki akışkan çepere doğru ivmelenmekte ve yoğunluklardaki ve faz özelliklerindeki farklılıklardan dolayı katı partiküller çeperde momentlerini kaybederek toplama bölgesine doğru hareket etmekte ve partiküllerden arınmış akışkan bir tahliye borusu ile sistemden uzaklaştırılmaktadır. Bu sayede istenmeyen kirli hava siklon ayırıcı sayesinde kısmi filtre edilmiş gibi temizlenmektedir.

Eksenel çalışan siklonlarda ise akışkan siklon ayırıcıya siklon gövdesi eksenini boyunca giriş yaptığı için girdap oluşturucu faktörler ile (genelde kanatçık ve spiral yapılar) santrifüj ve girdap kuvvetler sağlanmaktadır. Yine eksenel çalışan siklon ayırıcılarda da siklon içerisine giren akışkan hızı arttıkça toplama verimi arttığı yapılan çalışmada gözlemlenmiştir.

4.2. Helis Açısının Toplama Verimine Etkisi

Eksenel siklon ayırıcılardaki en önemli unsur, Siklon içerisine giren akışkana siklon içerisinde bir türbülans oluşturması için tasarlanan konstrüksiyonlardır. Bunlar genel olarak spiral ya da kanatçık yapılarında olmaktadır. Siklon gövde eksenine göre belirli bir açıda oluşturulan bu yapılar sayesinde siklon ayırıcının gövde kısmına doğru ilerleyen akışkan matematiksel olarak farklı yönlerde momentler oluşturularak siklon çeperine ve siklon eksenine ile aynı yönde iki farklı bileşene sahip hız vektörleri şeklinde hareket ederek siklon ayırıcının iç kısmında bir girdaplı bölge oluştururlar. Oluşan bu türbülansın etkisi ile içeride bir santrifüj kuvvet oluşur ve genel olarak bu kuvvetler etkisi altında siklon ayırıcı görevini yapmaya başlar. Bu nedenle girdap oluşturucuların etkisi eksenel bir siklonun çalışma verimini sağlayan diğer bir önemli parametredir. Her bir konstrüksiyon ve açı değerine göre içeride oluşan girdap ve santrifüj kuvvetler farklılık gösterdiği için eksenel siklon ayırıcılar için çok fazla standarttan söz edilemez.

Yapılan bu çalışmada 3 farklı siklon modeli için 3 farklı helis açısı belirlenmiştir. 27 mm uzunluğundaki bir mil etrafına 18 mm çapında olacak şekilde bir spiral sargı 1, 2 ve 3 tur olacak şekilde tasarlanmıştır. Buradan da 1.modelin helis açısı $56,3^\circ$ ikinci modelin helis açısı $36,8^\circ$ ve 3.modelin helis açısı da $26,5^\circ$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir model için 3 farklı giriş hızında analizler yapılmıştır. Her bir hız değeri için her bir modelin hız ve basınç değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler sayesinde siklon ayırıcı içerisindeki hareket davranışları hakkında bilgi sahibi olmaktayız. Ayrıca birçok konuda da bu görseller bizlere bilgi vermektedir. Helis açısının siklon ayırıcıları üzerindeki etkilerini görmek için;

- Helis açısının toplama verimine etkisi
- Helis açısının spesifik partikül boyutlarında toplama verimine etkisi
- Helis açısının siklon ayırıcı içerisindeki hız bileşenlerine etkisi
- Helis açısının farklı hız değerlerindeki davranışsal etkileri

- Helis açısının basınç kayıplarına etkisi

gibi başlıklar altında inceleyerek bu etkiler tespit edilmiştir ve sonuçları çizelge ve grafikler halinde paylaşılmıştır.

4.2.1. Helis Açısının Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimine Etkisi

Daha önceki konu başlığında siklon ayırıcıya giren akışkanın giriş hızının arttıkça toplama veriminin de arttığını gözlemlemiştik. Şimdi ise siklon ayırıcıda girdap etkilerin oluşması için kullanılan spiral yapıların helis açılarındaki farklılıkların siklon ayırıcının toplama performansını nasıl etkilediği sonuçları paylaşılmıştır. Burada bir karışıklık olmaması için helis açılarının sayısal değeri yerine siklon ayırıcılardan model 1, model 2 ve model 3 olarak bahsedilecektir.

Çizelge 4.11. Giriş Hızı $V= 5$ m/s Olan Analizler için Helis Açılarının Toplama Verimine Etkisi

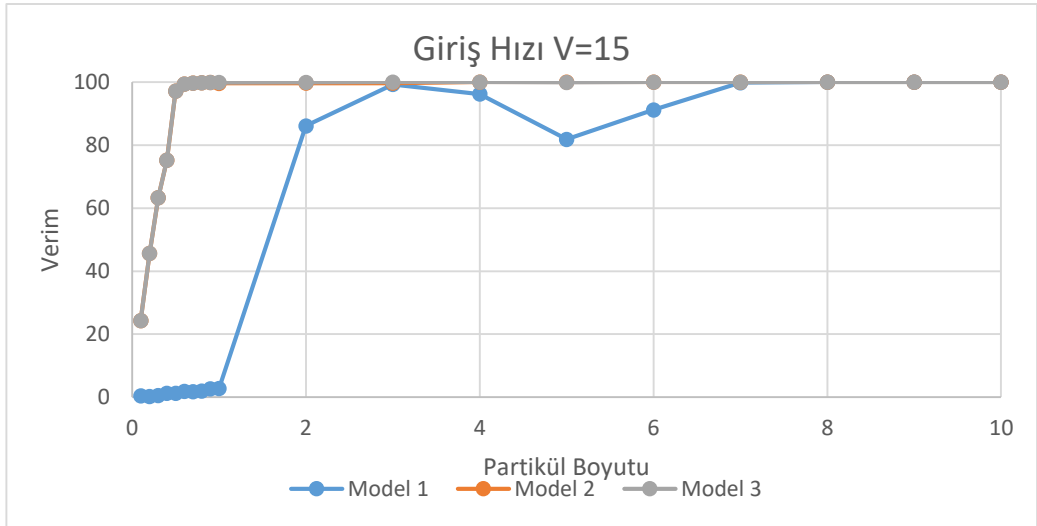
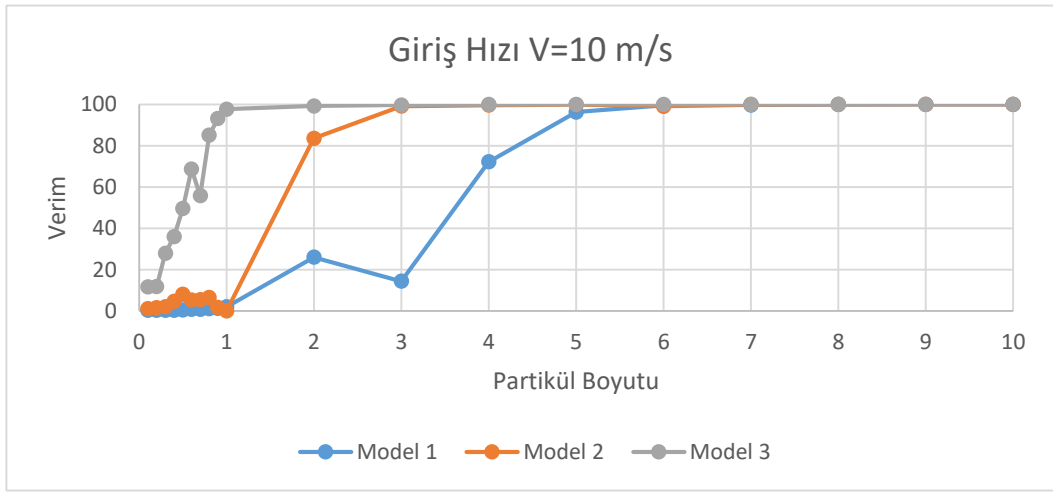
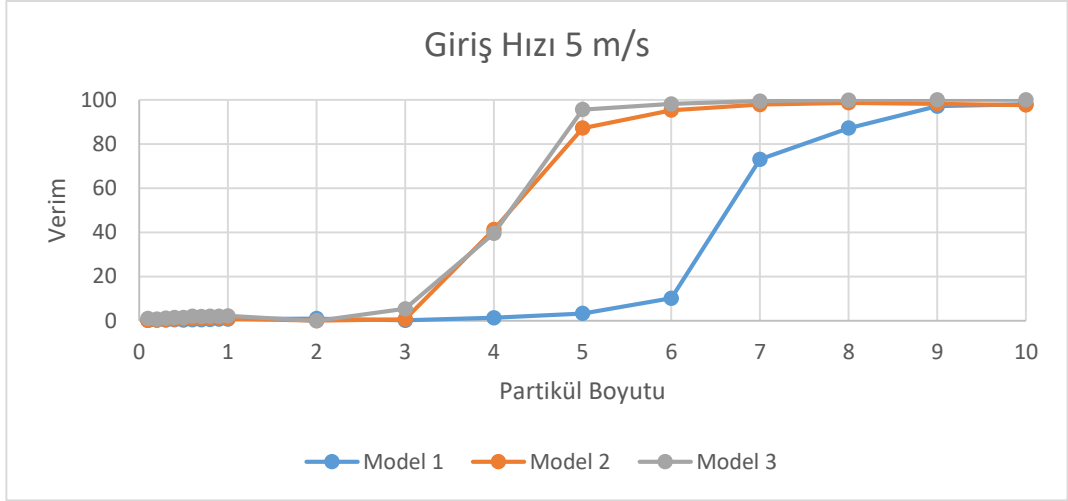
	V=5 m/s için verim tablosu		
Partikül Boyutu	Model 1	Model 2	Model 3
0,1	0,16146394	0,215285253	1,022604952
0,2	0,269106566	0,322927879	0,753498385
0,3	0,269106566	0,645855759	1,237890205
0,4	0,430570506	0,807319699	1,399354144
0,5	0,322927879	0,914962325	1,506996771
0,6	0,430570506	1,237890205	2,099031216
0,7	0,430570506	1,130247578	1,883745963
0,8	0,592034446	1,291711518	2,045209903
0,9	0,699677072	1,399354144	2,099031216
1	0,753498385	1,022604952	2,206673843
2	1,022604952	0,053821313	0
3	0,215285253	0,699677072	5,382131324
4	1,345532831	41,28094726	39,55866523
5	3,283100108	87,19052745	95,58665231
6	10,1722282	95,31754575	98,11625404
7	73,08934338	97,84714747	99,40796555
8	87,19052745	98,65446717	99,83853606
9	97,1474704	98,17007535	100
10	97,9547901	97,63186222	100

Çizelge 4.12. Giriş Hızı V= 10 m/s Olan Analizler için Helis Açılarının Toplama Verimine Etkisi

	V=10 m/s için verim tablosu		
Partikül Boyutu	Model 1	Model 2	Model 3
0,1	0,322927879	1,022604952	11,57158235
0,2	0,322927879	1,506996771	11,7868676
0,3	0,269106566	2,099031216	27,93326157
0,4	0,322927879	4,682454252	35,95263724
0,5	0,484391819	8,019375673	49,67707212
0,6	0,861141012	5,328310011	68,72981701
0,7	0,807319699	5,382131324	55,75888052
0,8	1,130247578	6,458557589	85,03767492
0,9	1,184068891	1,722282024	93,11087191
1	1,99138859	0	97,68568353
2	26,04951561	83,58449946	99,24650161
3	14,42411195	99,13885899	99,67707212
4	72,22820237	99,62325081	99,94617869
5	96,28632939	99,83853606	100
6	99,62325081	99,08503767	100
7	99,67707212	99,94617869	100
8	99,94617869	100	100
9	100	100	100
10	100	100	100

Çizelge 4.13. Giriş Hızı V= 15 m/s Olan Analizler için Helis Açılarının Toplama Verimine Etkisi

	V=15 m/s için verim tablosu		
Partikül Boyutu	Model 1	Model 2	Model 3
0,1	0,376749193	24,32723358	24,32723358
0,2	0,269106566	45,64047363	45,64047363
0,3	0,484391819	63,34768568	63,34768568
0,4	1,237890205	75,24219591	75,24219591
0,5	1,237890205	97,1474704	97,1474704
0,6	1,883745963	99,40796555	99,40796555
0,7	1,776103337	99,73089343	99,73089343
0,8	1,937567277	99,83853606	99,83853606
0,9	2,691065662	99,94617869	99,94617869
1	2,798708288	99,62325081	99,89235737
2	86,11410118	99,67707212	99,94617869
3	99,24650161	99,67707212	100
4	96,23250807	100	100
5	81,86221744	100	99,94617869
6	91,17330463	100	100
7	99,83853606	100	100
8	100	100	100
9	100	100	100
10	100	100	100



Şekil 4.18. Model 1, Model 2 ve Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Toplama Verimi Eğrileri

Şekil 4.18’de verilen grafikler incelendiğinde 3 farklı giriş hızı için 3 farklı modelin toplama verimi eğrileri paylaşılmıştır. Bu eğrilere göre helis açısının azaldıkça toplama veriminin arttığı gözlemlenmektedir. Helis açısının azalması ile spiral yapı aynı uzunluktaki mil etrafında daha fazla tur atmaktadır. Bu sayede siklon ayırıcı içerisine eksenel yönde giriş yapan akışkan teğetsel yönde de bir ivme ve hız bileşeni kazanır ve siklon gövdesinin dışına doğru bir merkezkaç kuvveti oluşturarak tıpkı teğetsel siklonlardaki gibi santrifüj kuvvetler etkisi altında ayırıştırma olayını gerçekleştirir.

Ayrıca 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar olan partikül boyutlarında da toplama veriminin etkisini Şekil 4.18’deki eğrilerden ve Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13’den görülebilmektedir. Burada da helis açısı azaldıkça daha küçük partikül boyutlarında toplama veriminin arttığı gözlemlenmektedir. Burada ilerde siklonun çalışma şartları esas alındığında optimum siklon ayırıcı modeli seçmede büyük fayda sağlamaktadır. Bir siklon ayırıcı ne kadar küçük boyuttaki partikülleri tutabilirse o kadar verimli olmaktadır. Bu nedenle helis açısı da partikül boyutuna göre toplama konusundaki verimlilikte önemli bir fonksiyondur.

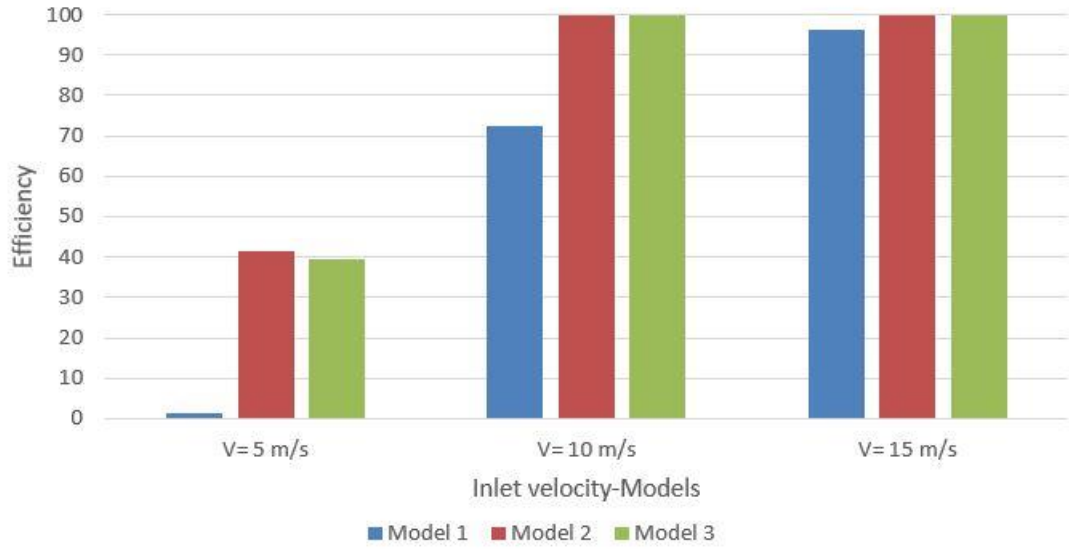
Eksenel siklon ayırıcılar için en önemli parametrelerden biri de helis açısındaki farklılıktır. Şekil 4.18’de de görüldüğü gibi aynı giriş hızlarında helis açısının azalması ile birlikte toplama verimi artmaktadır. Bu da helis açılarının da bir eksenel siklon ayırıcının bir fonksiyonu olduğunu, Onun çalışmasını etkileyen bir parametre olduğunu göstermektedir.

Gong (2012) yaptığı deneysel ve numerik çalışmasında helis açılarında oluşturduğu farklılıklar ile analizler gerçekleştirmiştir. Bulduğu sonuçlardan biri de helis açısının azalması ile toplama veriminin arttığı yönündedir. Ayrıca çalışmasını numerik ve deneysel olarak iki farklı şekilde doğrulamıştır.

Çizelge 4.14’de verilen sonuçlarda spesifik partikül boyutunda (4 µm) yapılan karşılaştırmada da toplama verimleri giriş hızı ve helis açılara göre kıyaslanmıştır. Her bir giriş hızı değeri için üç farklı model karşılaştırılmış ayrıca farklı giriş hızlarındaki davranışlarda tek bir grafikte gösterilmiştir. Spesifik boyut olarak 4 mikronluk partiküller seçilmiştir.

Çizelge 4.14. 4 µm Boyutunda Olan Partiküller için Farklı Model ve Hızlarda Toplama Verimi Sonuçları

	Model 1	Model 2	Model 3
V= 5 m/s	1,345532831	41,28094726	39,55866523
V= 10 m/s	72,22820237	99,62325081	99,94617869
V= 15 m/s	96,23250807	100	100



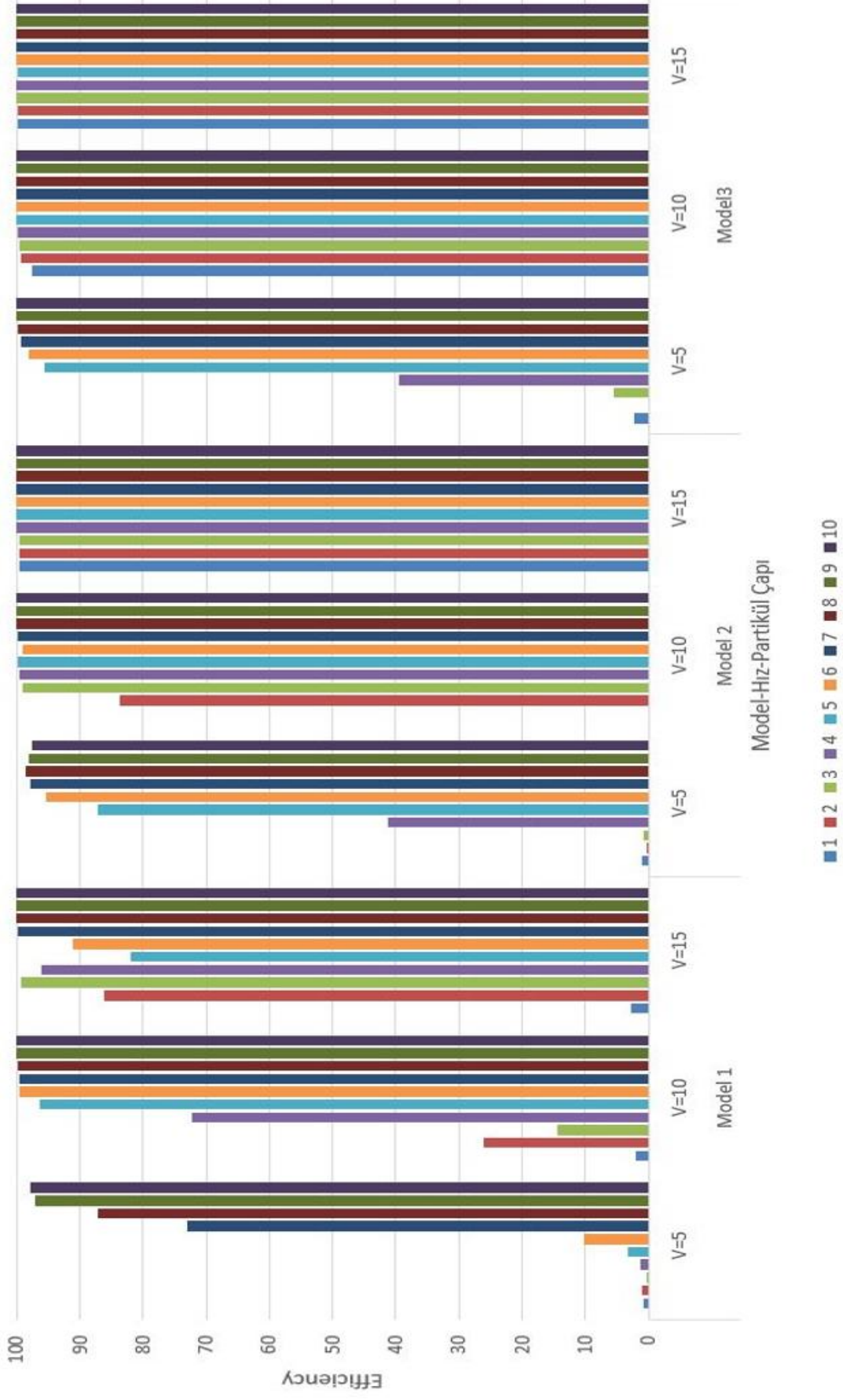
Şekil 4.19. 4 µm Boyutunda Olan Partiküller için Farklı Model ve Hızlarda Toplama Verimi

Eksenel siklon ayırıcılarda, Siklon ayırıcı içerisinde oluşan iç kuvvetler toplama veriminin büyüklüğünü belirler. Özellikle teğetsel hız faktörü çeperden aşağı doğru hareket edecek olan partiküllerin yakalanmasında en önemli etkenlerden biridir. Bu sayede siklon ayırıcı içerisindeki santrifüj kuvvetlerin büyüklüğü artar ve parçacıklar merkezden çepere doğru hareket eder. Çeper boyunca parçacıklar momentlerini kaybeder ve daha fazla tutunamayıp toplama haznesine doğru yönlendirilir. Bu sayede ayırma işlemi gerçekleşmiş olur. Santrifüj kuvvet etkisi ne kadar artarsa toplama verimi de buna paralel olarak artmaktadır. Bu yüzden eksenel siklon ayırıcılar için de siklon içerisinde oluşan teğetsel hızların artması toplama verimine etki etmektedir.

Şekil 4.19. da görüldüğü gibi model 1 siklonu için toplama verimi diğer modellere kıyasla çok daha düşüktür. Model 2 ve model 3 siklon ayırıcıların verimleri birbirleri ile mukayese edildiğinde ise yakın değerler göstermektedir. Bunun nedeni siklon ayırıcılar içerisinde, aynı giriş hızlarında oluşan teğetsel hız değerlerinin birbirine yakınlık göstermesidir. Bu durumda da santrifüj kuvvetlerin büyüklükleri de birbirlerine yakınlık göstermiştir. Model 1 için teğetsel hızlar incelendiğinde model 2 ve model 3 e göre çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan santrifüj kuvvetlerin yakın değerlerde olması aynı şartlarda toplama veriminin de yakınlık göstermesine neden olmuştur.

Çizelge 4.14 ve şekil 4.19'da verilen sonuçlarda spesifik partikül boyutunda (4 µm) yapılan karşılaştırmada da toplama verimleri giriş hızı ve helis açısına göre kıyaslanmıştır. Her bir giriş hızı değeri için üç farklı model karşılaştırılmış ayrıca farklı giriş hızlarındaki davranışlarda tek bir grafikte gösterilmiştir. Spesifik boyut olarak 4 mikronluk partiküller seçilmiştir. Çünkü genellikle değişimlerin en yoğun şekilde gerçekleştiği partikül boyutu bu skalada yaşanmaktadır.

Yapılan çalışma genel olarak değerlendirildiğinde Şekil 4.20 deki gibi toplam verileri elde etmekteyiz. Bu şekle bakıldığında siklon ayırıcı modellerin her biri için, her partikül boyutunda, üç farklı giriş hızında gerçekleştirilen analizlerin toplama verimlerini görebiliriz.



Şekil 4.20. Tüm modeller için Her bir giriş hızındaki farklı partikül büyüklüklerinde toplama verimleri gösterimi

4.2.2. Eksenel Siklon Ayırıcıda Kritik Çap ve Fraksiyonel Verim

Siklon ayırıcılarda verim hesabı yapmak için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Özellikle deneysel yapılan çalışmalarda sisteme enjekte edilen partikül boyutlarını belirlemek çok zordur. Bunun yerine bazı yaklaşımlar ile bazı veriler tanımlanmaktadır. Bir siklon ayırıcıda parçacık veriminin tahmininde kullanılan en önemli nitelik kritik parçacık çapı bilgisidir. Kritik parçacık çapı belirlenirken belirli sabit şartlar altında siklon ayırıcının % 50 verim ile çalıştığı parçacık boyutu belirlenir. Bu boyutu belirlemek için farklı matematiksel modeller mevcuttur.

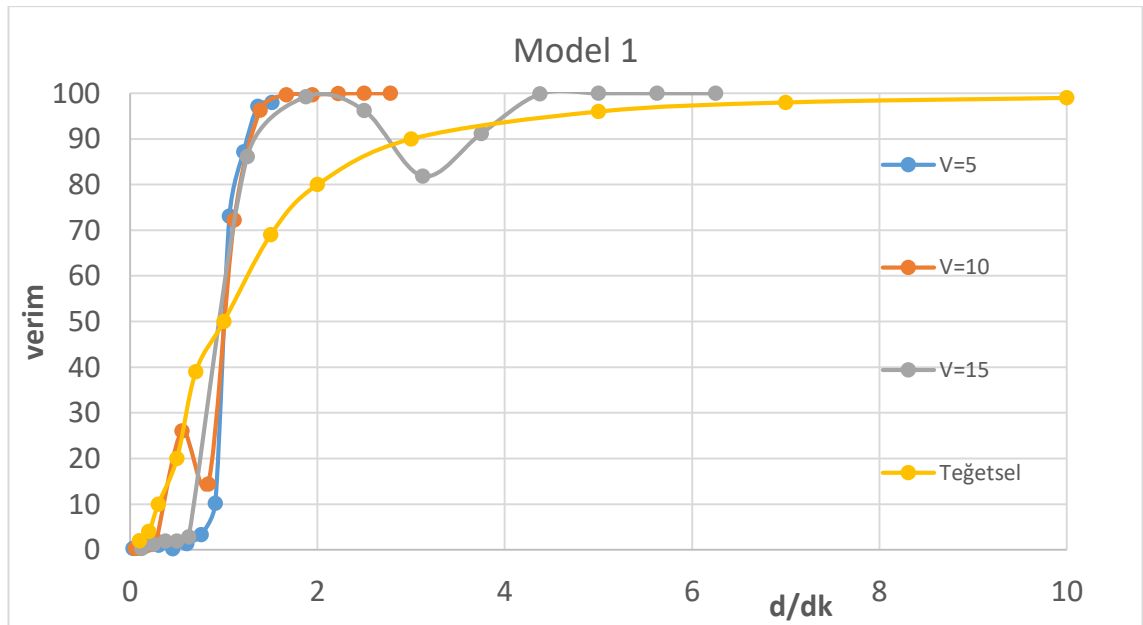
Yapılan bu çalışmada 0,1 mikrondan 10 mikrona kadar her bir partikül boyutunda, giriş hızında ve siklon ayırıcı modelde ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Buradan hareketle her bir eksenel siklon ayırıcı model için %50 verimin olduğu çaplar kritik parçacık çapı olarak belirlenmiştir. Daha sonra kritik parçacık çapının giren partikül çapına oranı alınarak verim eğrileri elde edilmiş ve çıkan sonuçlar (KARAKAŞ, 2020) yapmış olduğu teğetsel akışlı deneysel çalışma ile mukayese edilmiştir ve sonuçları paylaşılmıştır.

Çizelge 4.15. KARAKAŞ (2020) ‘ye Göre Teğetsel Siklonun Deneysel Çalışma Verileri

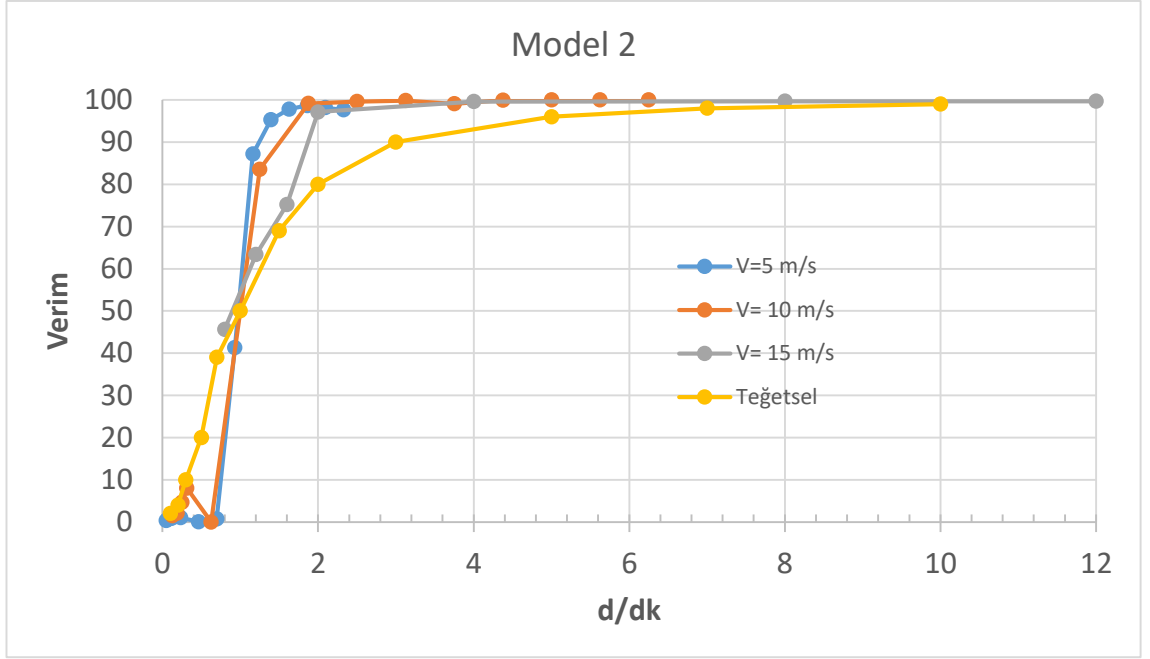
Deneysel	
d/dk	verim
0,1	2
0,2	4
0,3	10
0,5	20
0,7	39
1	50
1,5	69
2	80
3	90
5	96
7	98
10	99

Çizelge 4.16. Farklı modellerdeki eksenel siklon ayırıcılar için Kritik çap ve d/dk oranları

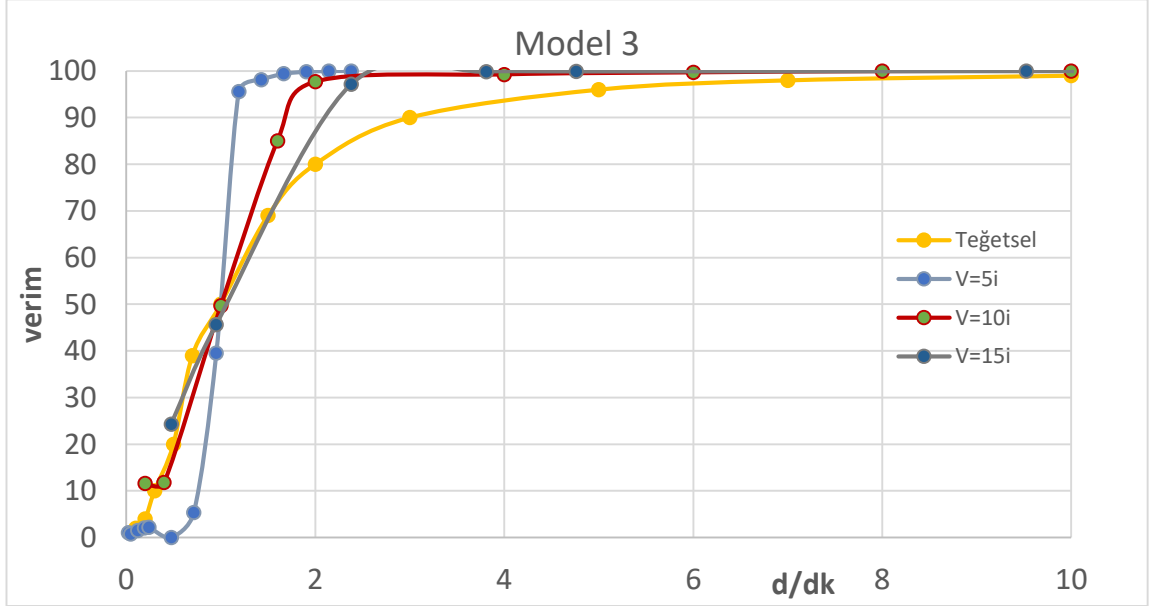
Model 1			Model 2			Model 3		
V= 5 m/s	V= 10 m/s	V=15 m/s	V= 5 m/s	V= 10 m/s	V=15 m/s	V= 5 m/s	V= 10 m/s	V=15 m/s
dk=6,6	dk=3.6	dk=1.6	dk=4,3	dk=1,6	dk=0,25	dk=4,2	dk=0,5	dk=0,21
d/dk	d/dk	d/dk	d/dk	d/dk	d/dk	d/dk	d/dk	d/dk
0,030303	0,055556	0,125	0,046512	0,125	0,8	0,02381	0,2	0,47619
0,060606	0,111111	0,25	0,069767	0,1875	1,2	0,047619	0,4	0,952381
0,090909	0,166667	0,375	0,093023	0,25	1,6	0,119048	1	2,380952
0,121212	0,222222	0,5	0,116279	0,3125	2	0,190476	1,6	3,809524
0,151515	0,277778	0,625	0,232558	0,625	4	0,238095	2	4,761905
0,30303	0,555556	1,25	0,465116	1,25	8	0,47619	4	9,52381
0,454545	0,833333	1,875	0,697674	1,875	12	0,714286	6	14,28571
0,606061	1,111111	2,5	0,930233	2,5	16	0,952381	8	19,04762
0,757576	1,388889	3,125	1,162791	3,125	20	1,190476	10	23,80952
0,909091	1,666667	3,75	1,395349	3,75	24	1,428571	12	28,57143
1,060606	1,944444	4,375	1,627907	4,375	28	1,666667	14	33,33333
1,212121	2,222222	5	1,860465	5	32	1,904762	16	38,09524
1,363636	2,5	5,625	2,093023	5,625	36	2,142857	18	42,85714
1,515152	2,777778	6,25	2,325581	6,25	40	2,380952	20	47,61905



Şekil 4.21. Model 1 için fraksiyonel verim eğrileri



Şekil 4.22. Model 2 İçin Fraksiyonel Verim Eğrileri



Şekil 4.23. Model 3 İçin Fraksiyonel Verim Eğrileri

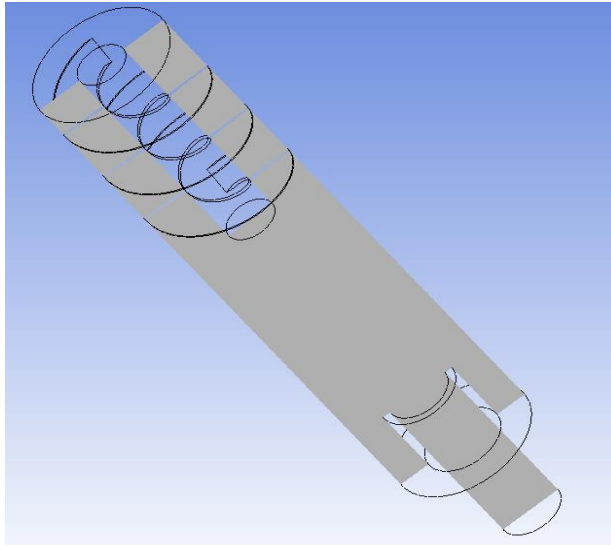
Yapılan çalışmada her bir siklon ayırıcı model için farklı giriş hızlarında yapılan fraksiyonel verim hesapları grafik halinde paylaşılmıştır. Grafiklere göre giriş hızı arttıkça kritik parçacık çapının boyutu azalmıştır ve verim artmıştır. Model 1 için grafikler analiz edildiğinde %50 lik verime kadar olan kısımda fraksiyonel verimin teğetsel siklon ayırıcıya kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Model 2 için fraksiyonel verimler teğetsel siklon ayırıcıya kıyasla 5 m/s giriş hızında daha düşük performans sergilerken 10 m/s giriş hızında teğetsel siklon ile neredeyse aynı eğimde artış sergilemiştir. 15 m/s giriş hızı için aynı grafik analiz edildiğinde, teğetsel siklon ile 15 m/s giriş hızında eğimlerin %80 performansa kadar aynı oranda yükselişte olduğu ve buradan sonra eksenel siklon ayırıcının fraksiyonel veriminde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Model 3 için teğetsel siklon ile kıyaslama yapıldığında da model 2 deki gibi benzer koşullar gözlemlenmiştir. Model 3 için fraksiyonel verim eğrisi %70 performanstan sonra eksenel siklon ayırıcı için artış sergilemektedir. Yapılan karşılaştırmalarda giriş hızı arttıkça kritik parçacık çapının azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca üç farklı model için de kritik parçacık çapları karşılaştırıldığında model 1 için kritik parçacık çapının model 2 ve model 3 'e kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de helis açılarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Helis açısı küçüldükçe siklon ayırıcıların içerisindeki girdap kuvvetler artmaktadır. Bu kuvvetlerin etkisi de ayırma verimini arttırmakta ve kritik parçacık çapı düşmektedir. Bu durum deneysel çalışmalarda da aynı şekilde ifade edilmiştir ve numerik çalışmanın doğruluğunu desteklemektedir.

4.3. Siklon Ayırıcı Modellerin Fiziksel Davranışlarının İncelenmesi

Siklon ayırıcılar için bir başka hususta siklon içerisindeki akışkanın davranışlarıdır. Burada siklon ayırıcıya giren akışkanı incelediğimizde iki önemli parametre karşımıza çıkmaktadır. Bunlar basınç değerleri ve hız bileşenleridir. Siklon ayırıcılarda toplama veriminin önemi kadar bu iki parametre de büyük önem arz etmektedir. Çünkü genellikle siklon ayırıcı içerisindeki türbülans ve santrifüj kuvvetlerin değişmesi ile hız ve basınç değerleri de değişmektedir. Bazı çalışma durumlarında özellikle basınç değerleri çalışma koşullarını belirlemede önemli bir faktör oluşturmaktadır. Basınç kayıplarının artması demek sistemde harcanan enerjinin artması anlamına gelir ve bu durumda genellikle istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

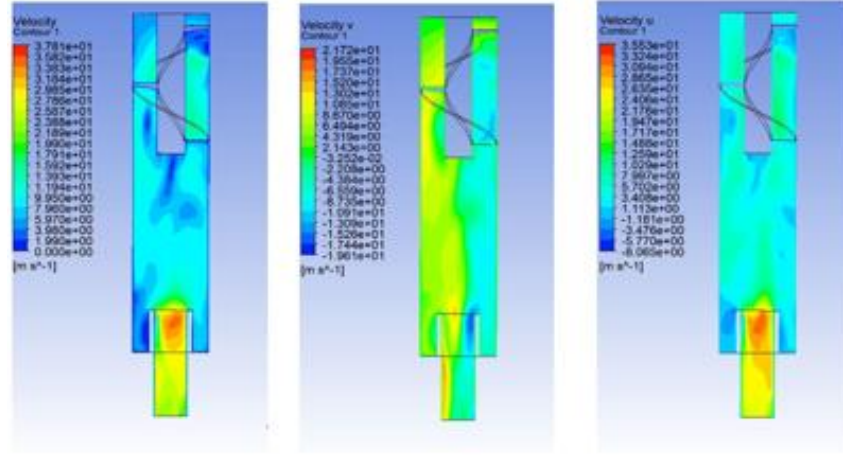
Hız konturları her bir giriş hızı için analiz edilmiş ve sonuçlar, siklonun merkezinden geçen orta düzlemde (Şekil 4.24) verilmiştir. Siklon ayırıcı boyunca devam eden bu yüzeyden edinilen bilgiler aynı zamanda siklon ayırıcının genel çalışma şartları hakkında da bilgi edinmemizi sağlayacaktır.



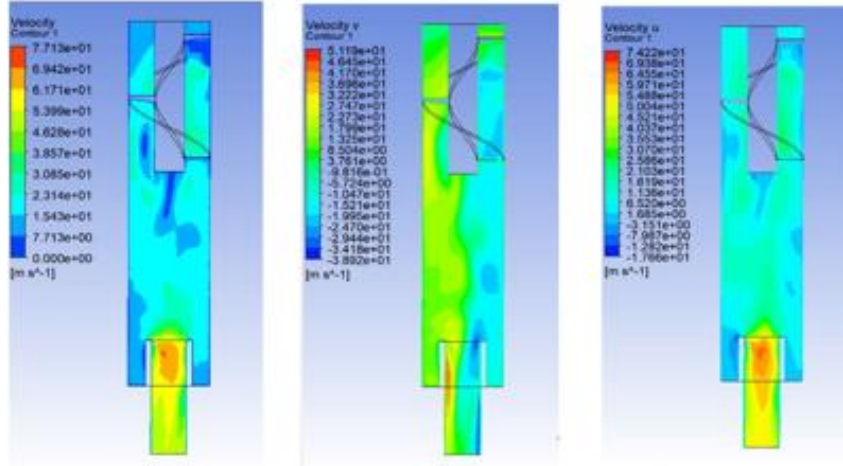
Şekil 4.24. Siklon Ayırıcı İçerisinde Belirlenen Yüzey (Temsili)

Model 1 için Farklı Giriş Hızlarında Yapılan Analiz Sonuçları

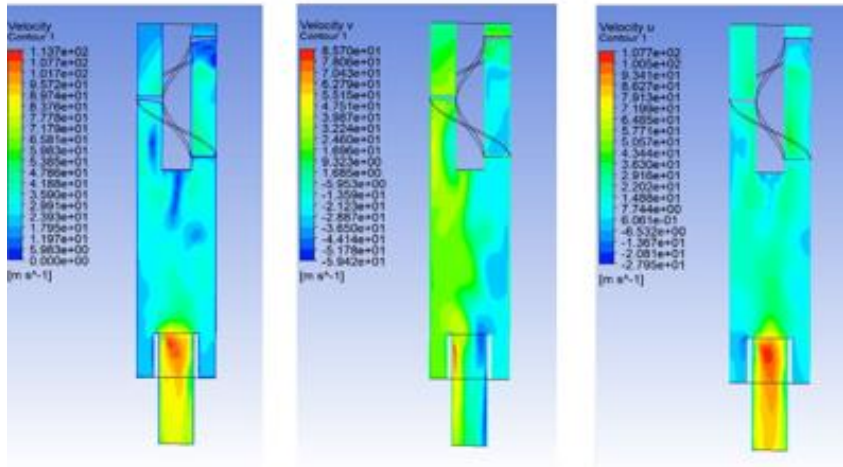
V= 5 m/s



V= 10 m/s

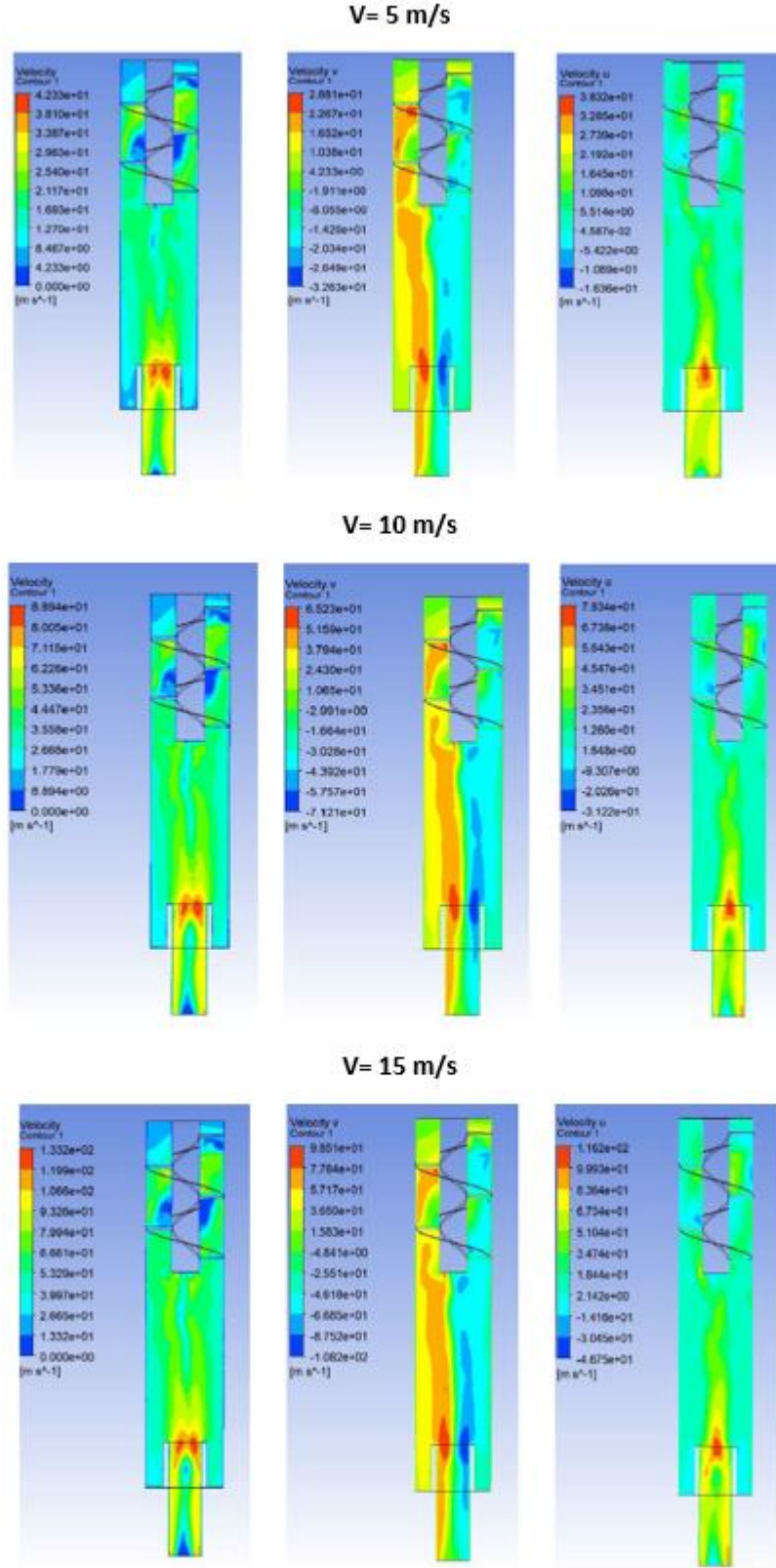


V= 15 m/s



Şekil 4.25. Model 1 için V= 5 m/s, V= 10 m/s ve V=15 m/s Giriş Hızlarında Siklon İçerisindeki Akışkanın Genel, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenlerinin Kontur Gösterimi

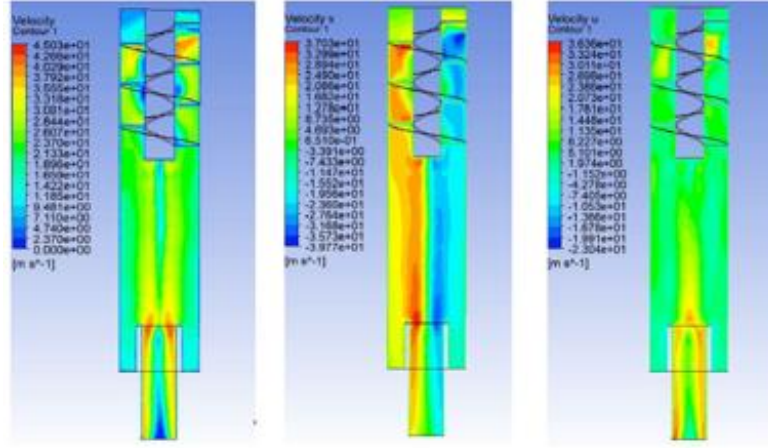
Model 2 için Farklı Giriş Hızlarında Yapılan Analiz Sonuçları



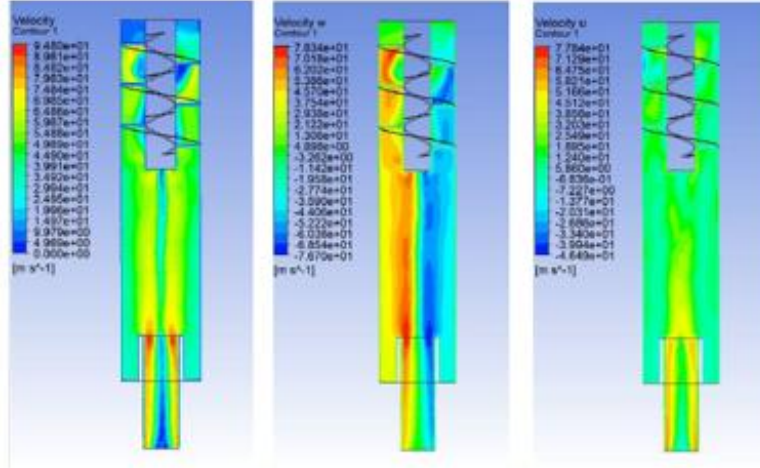
Şekil 4.26. Model 2 için V= 5 m/s, V= 10 m/s ve V=15 m/s Giriş Hızlarında Siklon İçerisindeki Akışkanın Genel, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenlerinin Kontur Gösterim

Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Yapılan Analiz Sonuçları

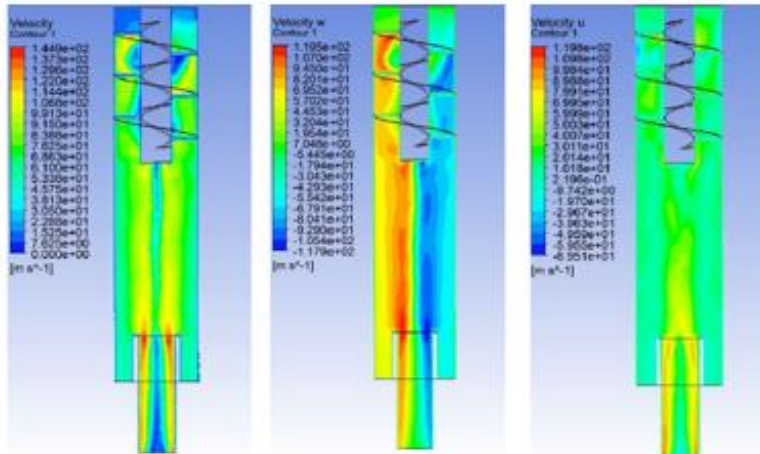
V= 5 m/s



V= 10 m/s

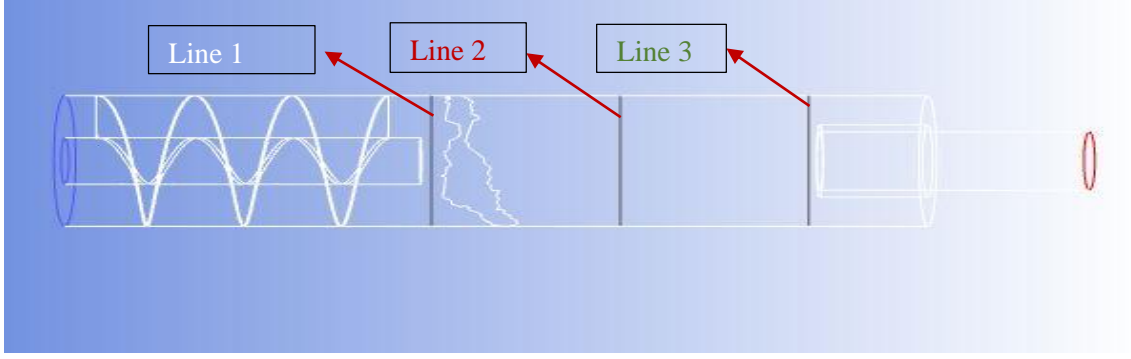


V= 15 m/s



Şekil 4.27. Model 3 için V= 5 m/s, V= 10 m/s ve V=15 m/s Giriş Hızlarında Siklon İçerisindeki Akışkanın Genel, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenlerinin Kontur Gösterimi

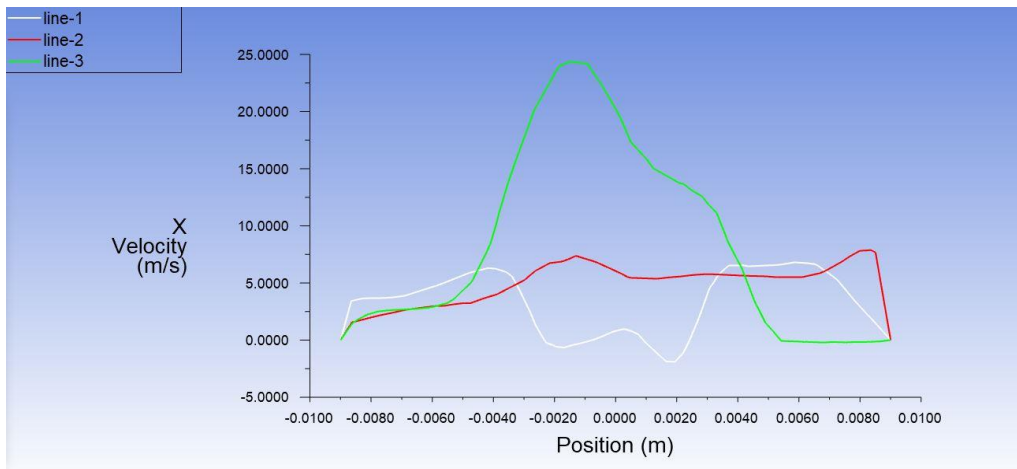
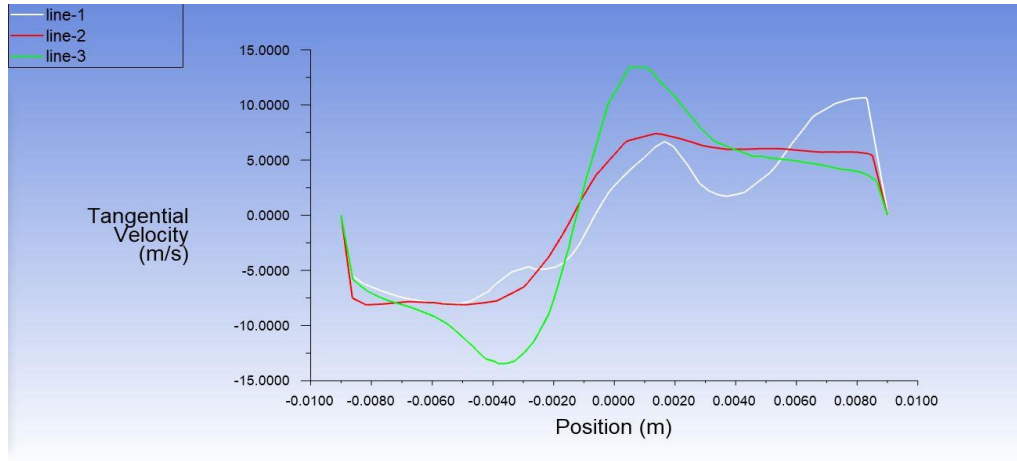
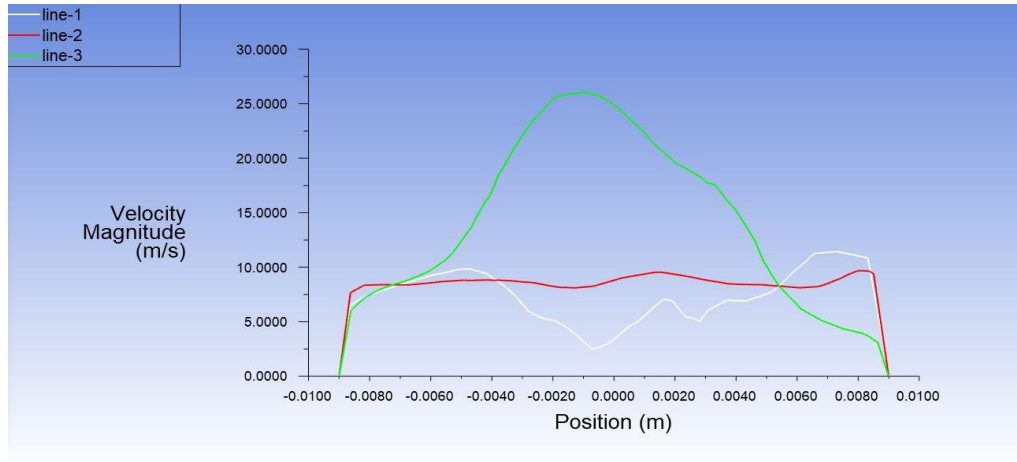
Şekil 4.28 da gösterilen konumlarda çizilen doğrular boyunca hız ve basınç değişimlerine ait grafikler oluşturulmuştur. Bu doğrular özellikle siklon ayırıcının çalıştığı ve neredeyse çoğu parametresini belirleyen bölgeler içinde çizilmiştir. Bu sayede de istediğimiz bölgede sayısal olarak gözlem yapma şansı elde edilir.



Şekil 4.28. Siklon ayırıcı içerisinde sanal olarak çizilen doğrular (Soldan sağa 1, 2, 3)

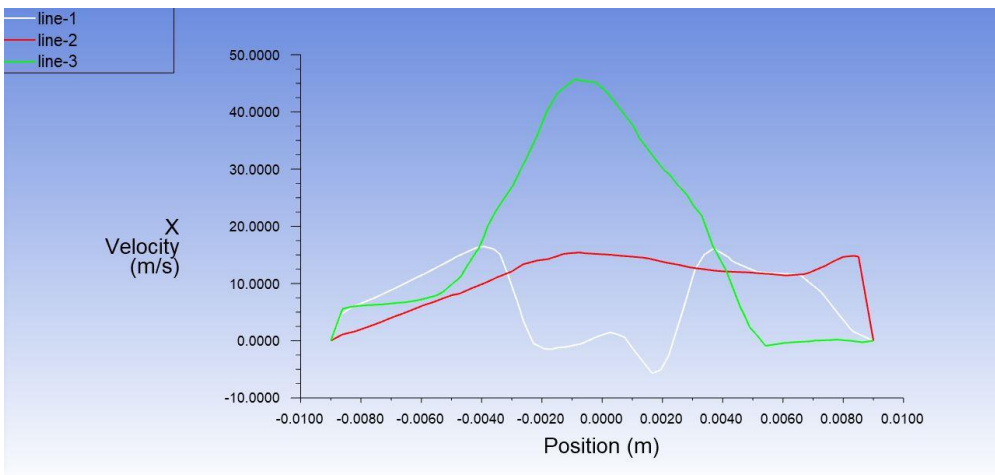
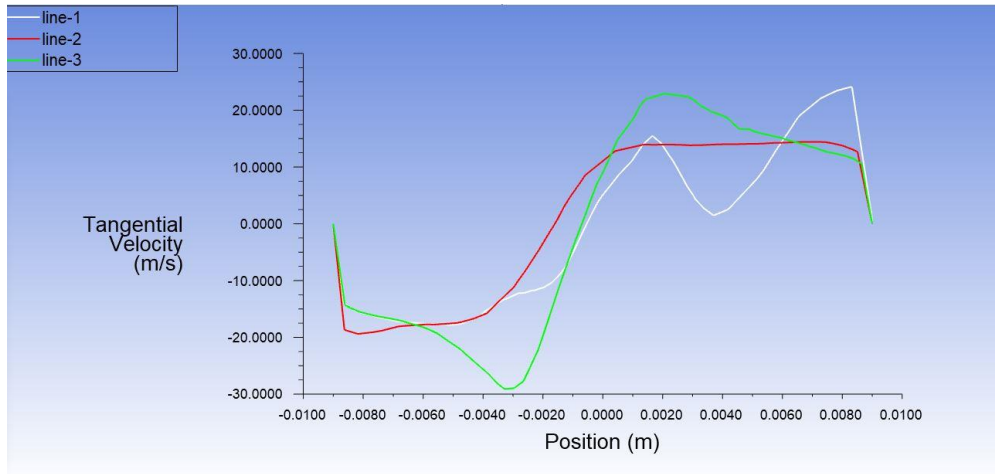
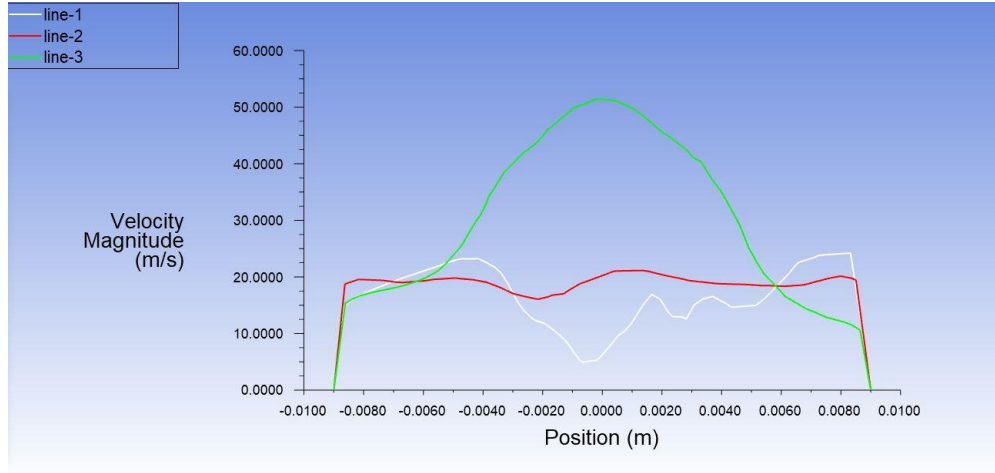
Model 1 için Yapılan Hız Analizlerinin Grafikseld Gösterimi

$V = 5 \text{ m/s}$



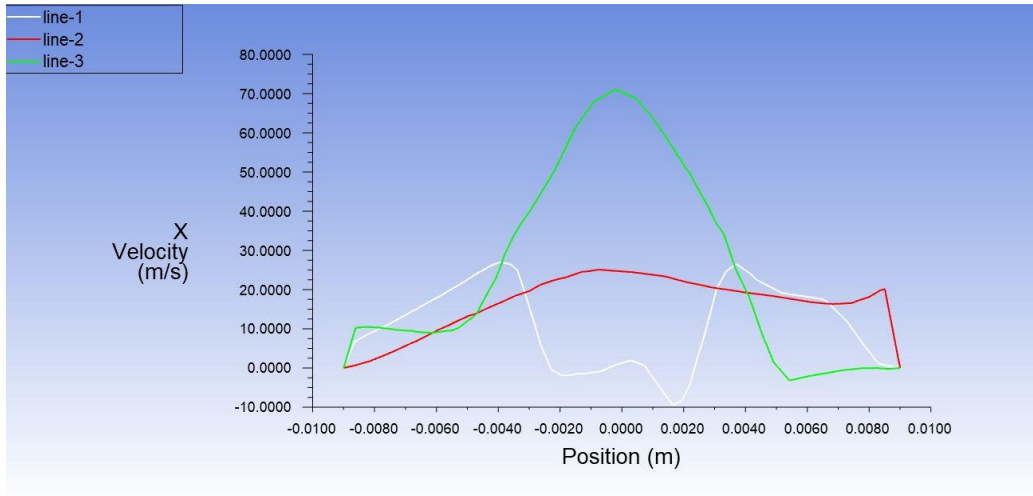
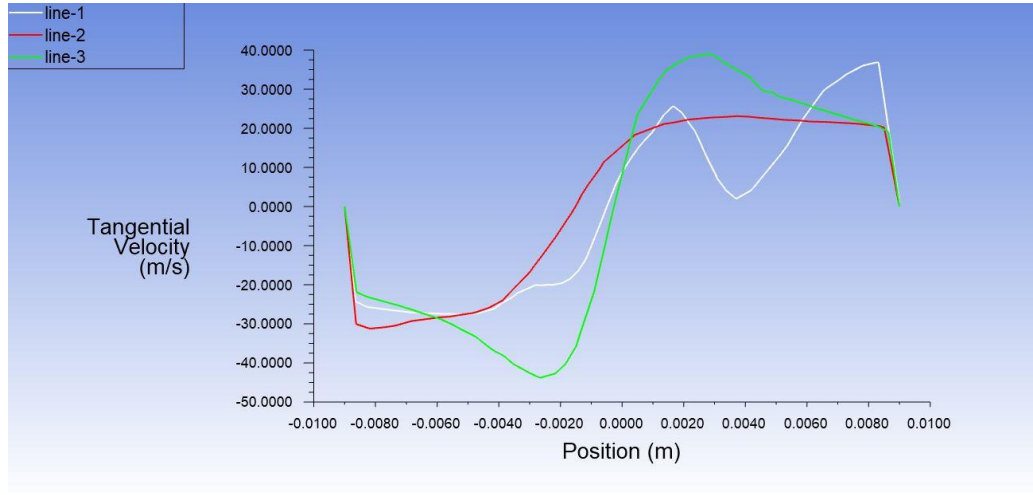
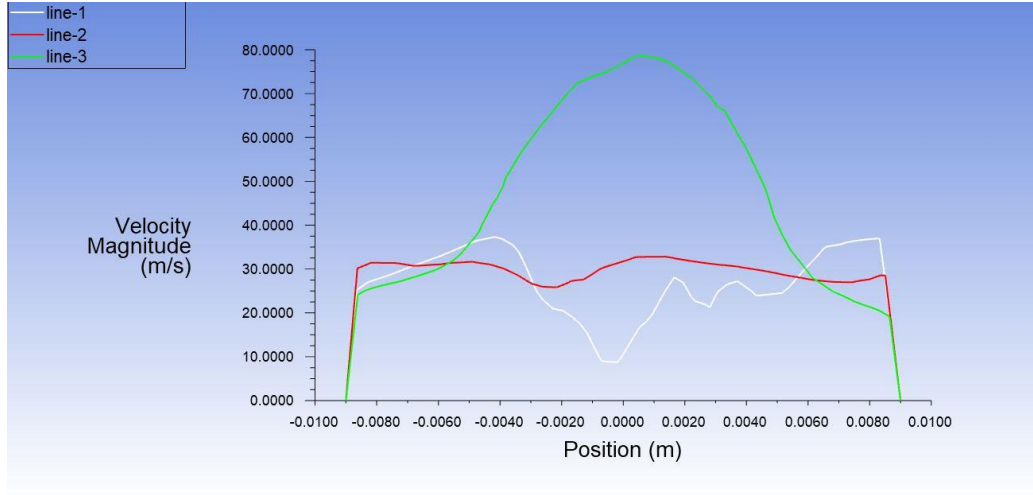
Şekil 4.29. Model 1, Giriş Hızı 5 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

V= 10 m/s



Şekil 4.30. Model 1, Giriş Hızı 10 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

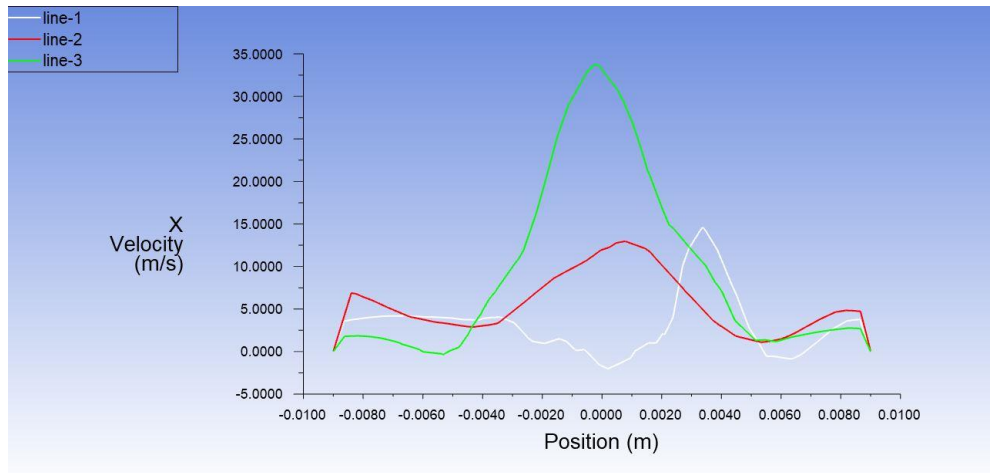
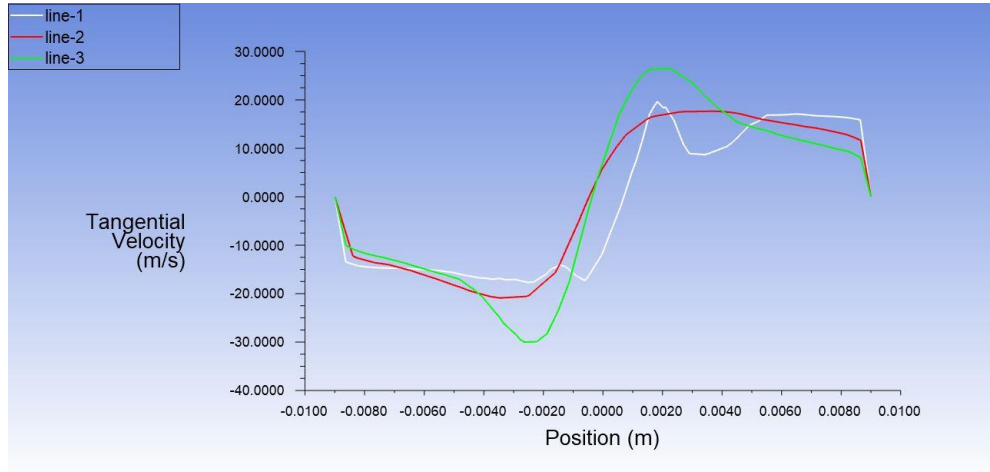
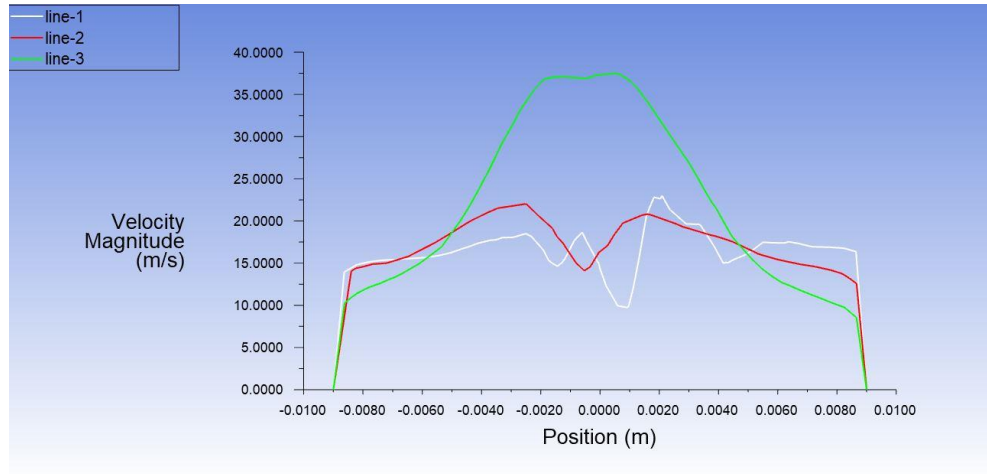
V=15 m/s



Şekil 4.31. Model 1, Giriş Hızı 15 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

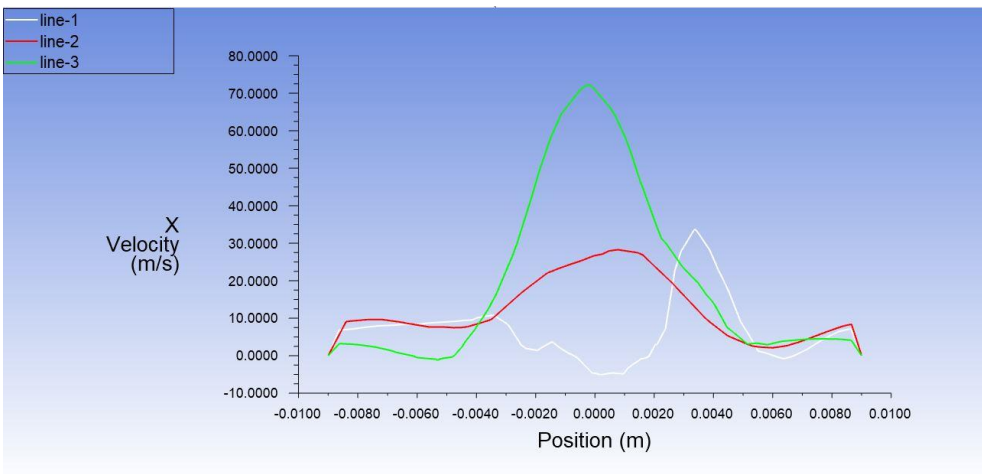
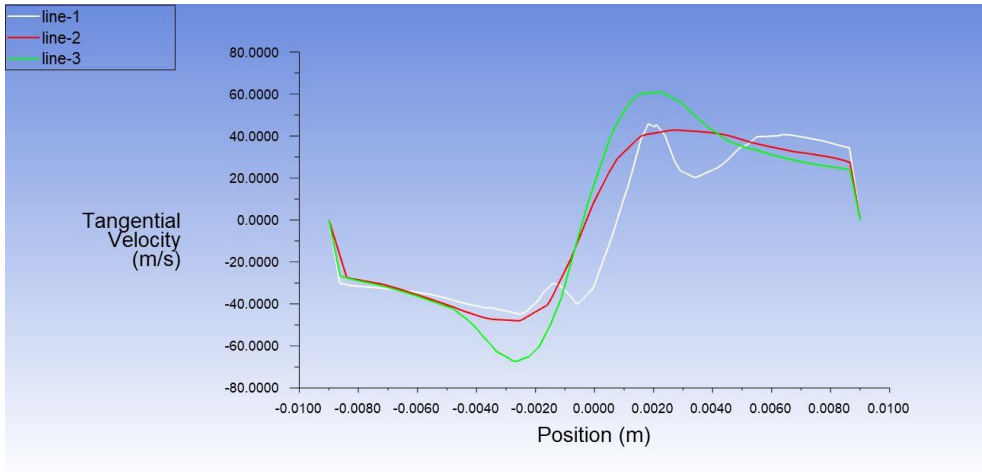
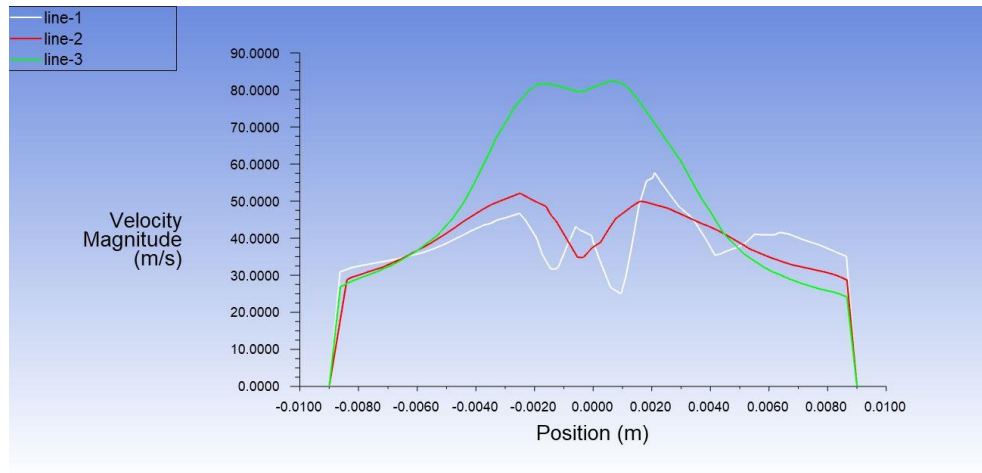
Model 2 için Yapılan Hız Analizlerinin Grafiksel Gösterimi

$V = 5 \text{ m/s}$



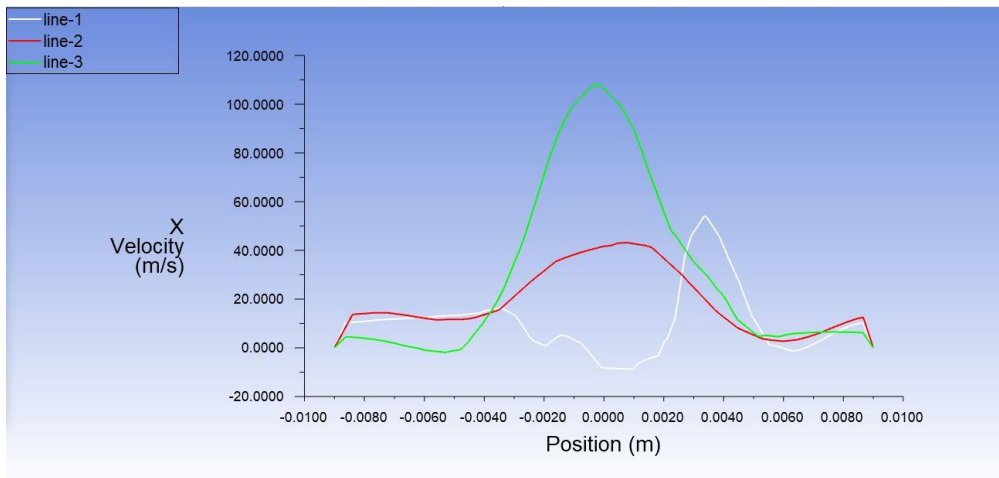
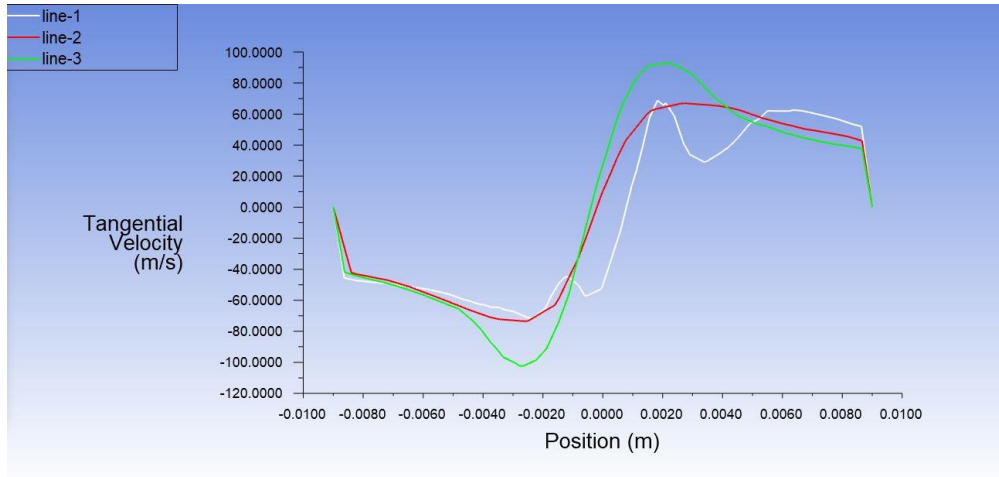
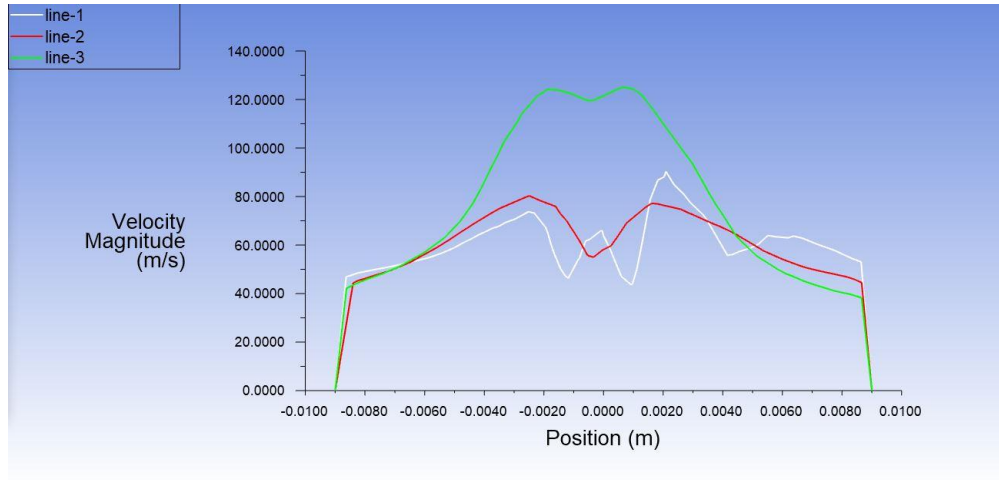
Şekil 4.32. Model 2, Giriş Hızı 5 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

V=10 m/s



Şekil 4.33. Model 2, Giriş Hızı 10 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

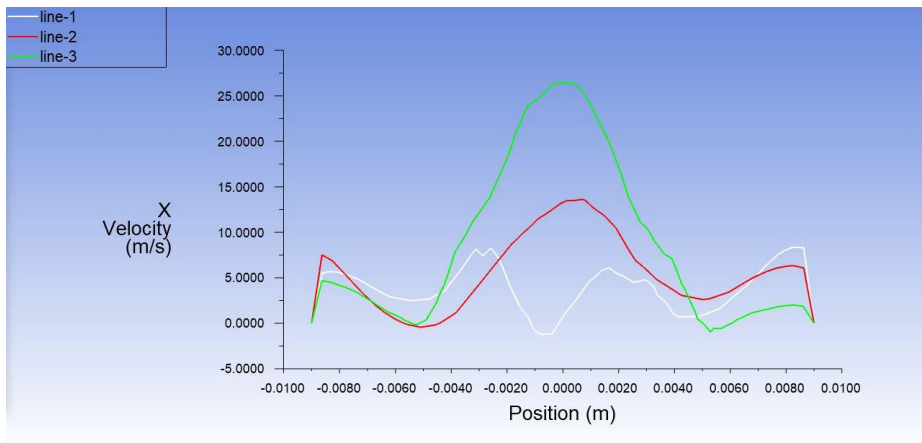
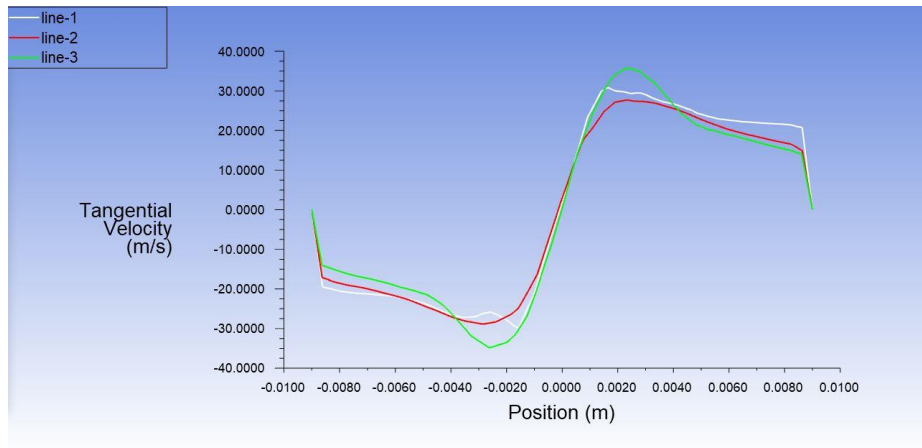
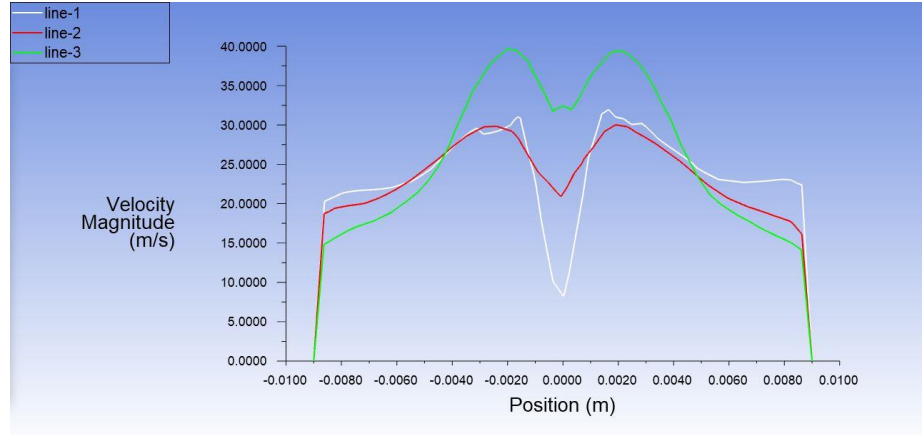
V= 15 m/s



Şekil 4.34. Model 2, Giriş Hızı 15 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

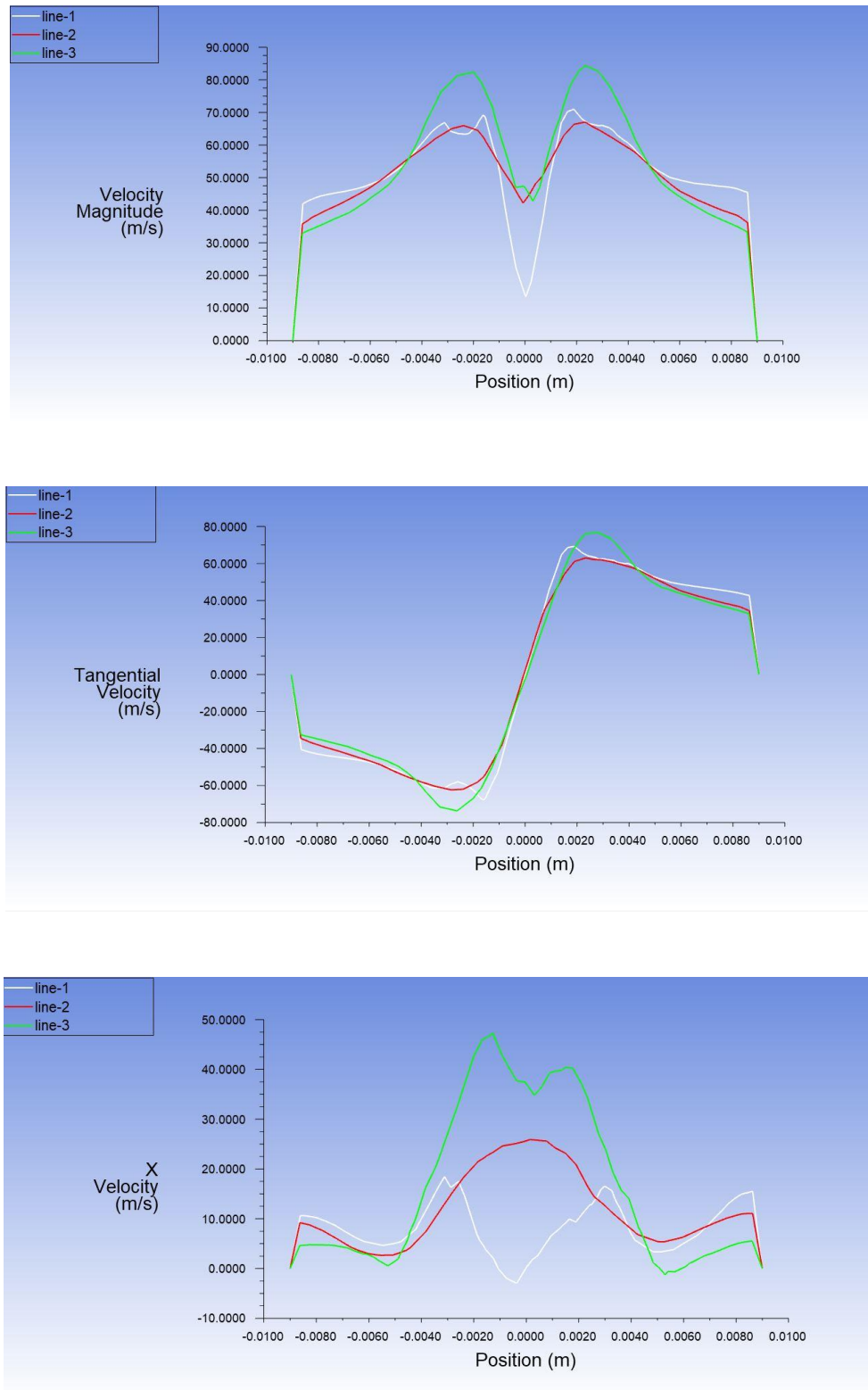
Model 3 için Yapılan Hız Analizlerinin Grafiksel Gösterimi

$V = 5 \text{ m/s}$



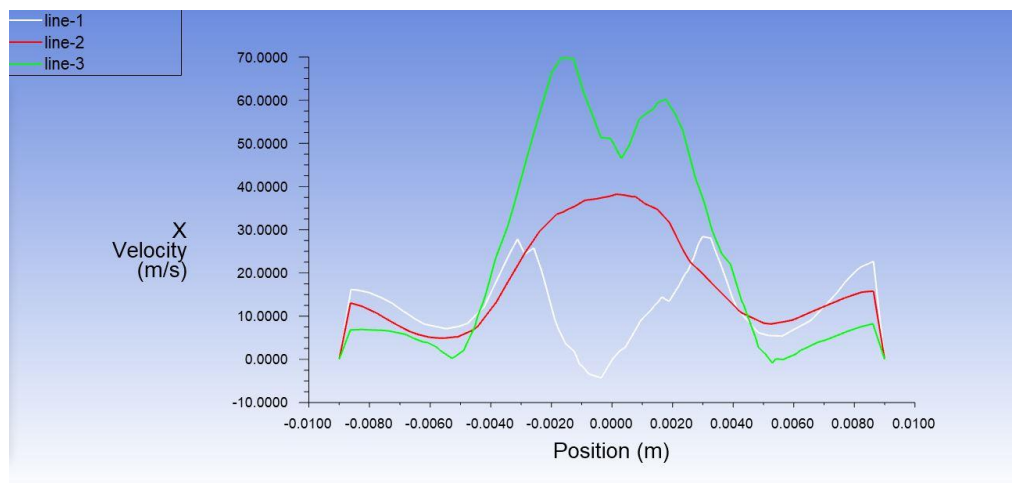
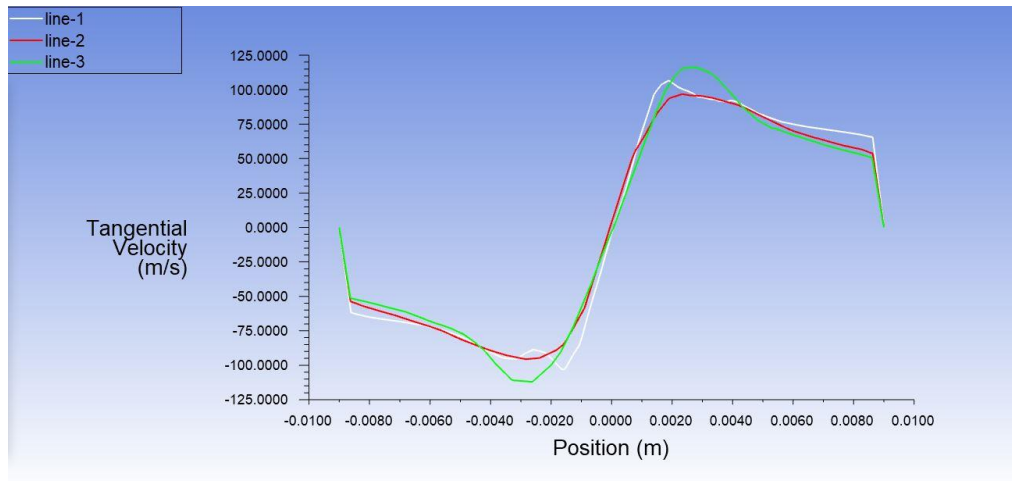
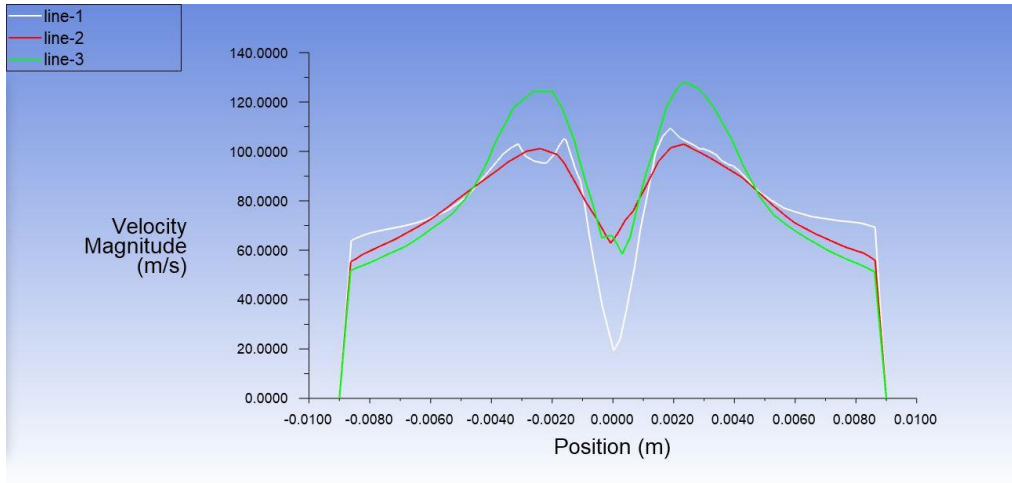
Şekil 4.35. Model 3, Giriş Hızı 5 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

V= 10 m/s



Şekil 4.36. Model 3, Giriş Hızı 10 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

V= 15 m/s



Şekil 4.37. Model 3, Giriş Hızı 15 m/s için Hız Bileşenleri Eğrileri

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi siklon ayırıcı içerisine giren akışkan hızı arttıkça siklon içerisindeki hız değerleri de lokasyonel olarak artış göstermektedir. Ayrıca Helis açısının da siklon ayırıcı içerisindeki hız bileşenlerinin etkisinin arttırdığı belirlenmiştir. Siklon ayırıcılarda ayrıştırmayı sağlayan kuvvet, siklonun sahip olduğu konstrüksiyon sebebiyle belli bir hızda giren havaya sağladığı santrifüj kuvvetten kaynaklanmaktadır. Kullanılan spiral şeklindeki konstrüksiyon sayesinde girdap ve santrifüj kuvvetler oluşmaktadır. Siklona giren tozlu havanın hızı ne kadar büyük olursa, bu santrifüj kuvvet de o kadar fazla olmaktadır. Vorteks hareketi yapan tozlu havanın sahip olduğu bu kuvvet santrifüj kuvvet, içerisinde barındırdığı partiküllerin boyutlarına bağlı olarak onlara bir atalet kazandırmaktadır. Bu atalet onları siklon iç cidarına sürüklemektedir.

Jiang, Jihe ve Jushi (2018) yaptıkları çalışmalarda farklı debi boyutlarında oluşturdukları deneysel çalışmalarında debinin artması ile siklon içerisindeki bileşke hızlarında arttığını vurgulamışlardır. Bu durumun toplama verimine etkisini de belirtmişlerdir ve debi arttıkça toplama veriminin de arttığını vurgulamışlardır.

4.4. Basınç Kayıpları

Genel olarak bir sistem içerisinde basınç kayıplarının artması demek sistemde harcanan enerjinin fazla olduğu anlamına gelir ve istenmeyen bir durum oluşturur. Siklon ayırıcılar için de durum bu şekildedir. Siklon ayırıcı içerisinde tespit edilen noktalardaki basınç değerleri birbirleri ile kıyaslanırlar ve bu durum sonucu basınç farkı değerleri elde edilir.

Yapılan çalışmada basınç farkları üç farklı durum için değerlendirilmiştir. Bunlar;

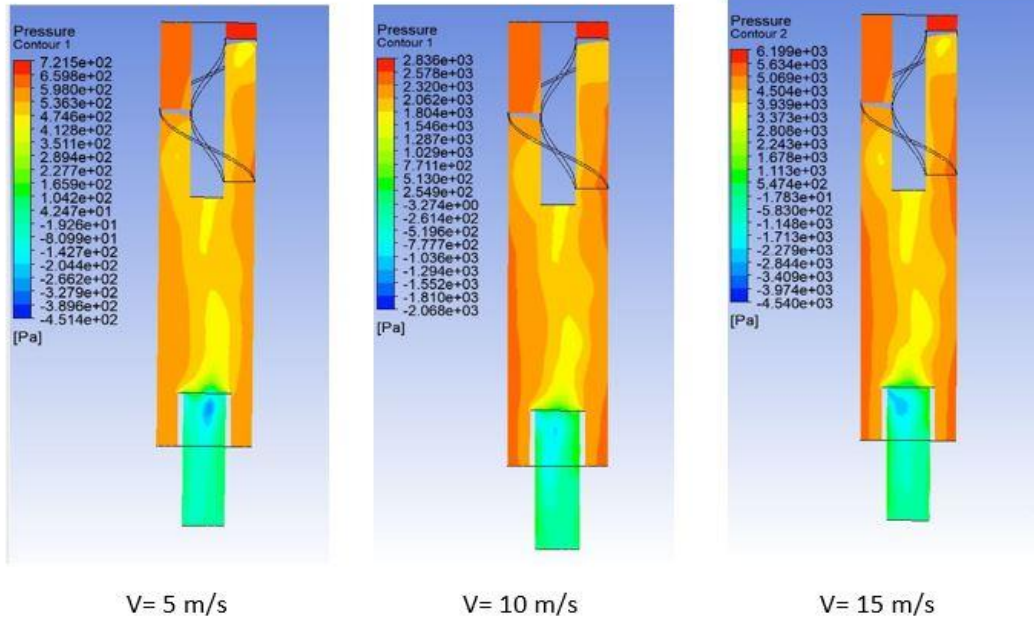
- Siklon ayırıcı içerisine giren akışkan hızının değişiminin basınç kayıplarına etkisi
- Helis açısının değişiminin basınç kayıplarına etkisi
- Çıkış-Giriş kesit alanlarının birbirine oranının basınç kayıplarına etkisi

olarak incelenmiştir.

Basınç kayıplarının tespiti için siklon ayırıcı içerisindeki üç farklı doğru üzerinden alınan veriler ile kıyaslamalar yapılmıştır. Bu doğrular siklon ayırıcı içerisinde spiral bölgeden hemen sonra siklon gövdesi dediğimiz bölgeden siklon ayırıcı çıkış borusundan hemen öncesine kadar olan bölgeden seçilmiştir. Şekil 4.28’de bu doğrular gösterilmiştir. Ayrıca hız konturlarında olduğu gibi basınç konturları da aynı şekilde siklon ayırıcının merkezinden geçen bir yüzey üzerinden alınan veriler ile oluşturulmuş ve yeniden hız konturlarında olduğu gibi Şekil 4.24’de gösterilen düzlemden yararlanılmıştır.

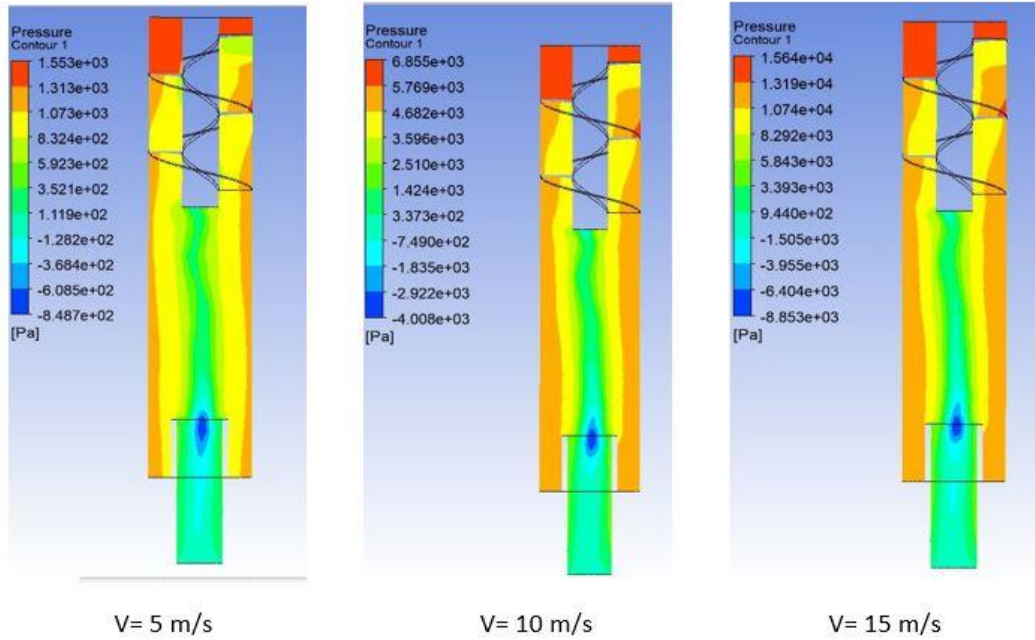
Basınç Değerlerinin Kontur Gösterimi

Model 1 için Basınç Konturları



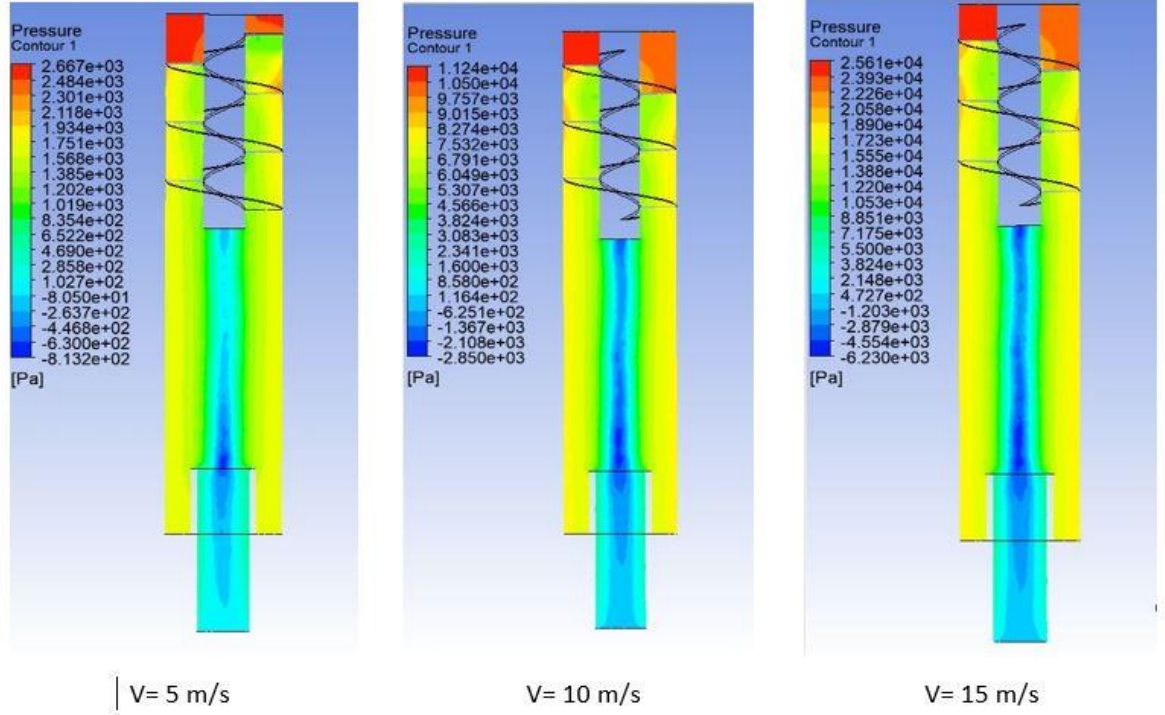
Şekil 4.38. Model 1 İçin Basınç Konturları Gösterimi

Model 2 için Basınç Konturları



Şekil 4.39. Model 2 İçin Basınç Konturları Gösterimi

Model 3 için Basınç Konturları



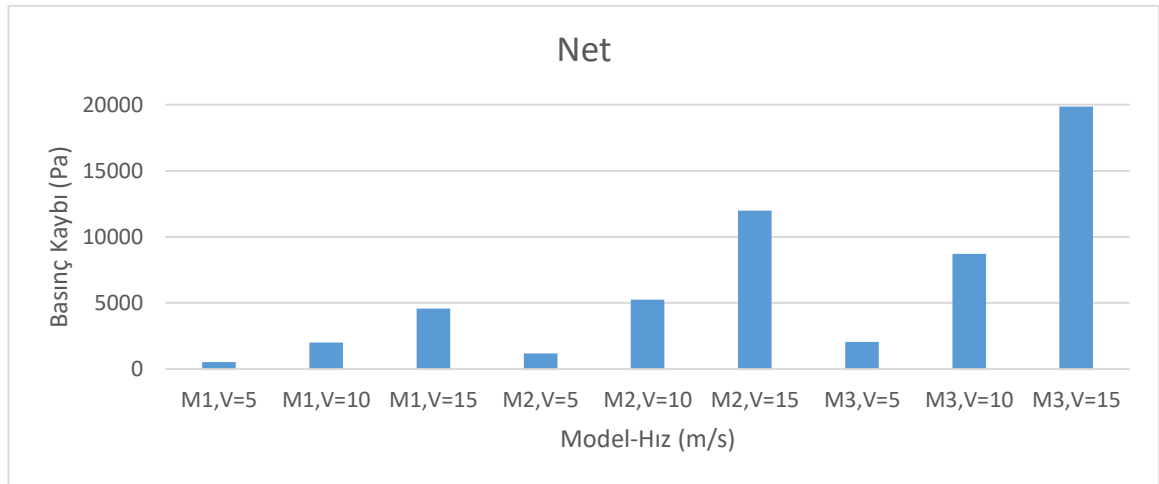
Şekil 4.40. Model 3 İçin Basınç Konturları Gösterimi

Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'da görüldüğü gibi helis açısının azalması ile Siklon ayırıcı içerisindeki statik basınç büyüklüğü artmaktadır. Ayrıca giriş hızının artması ile de statik basınç artmaktadır. Bu durum aslında siklon ayırıcılar için istenmeyen bir durumdur. Fakat helis açısının azalması ve giriş hızının artması ile toplama veriminin artması doğru orantılı iken bu iki koşulun artması ile basınç farkları ters orantılıdır. Bu durumda da seçilecek olan siklon için optimum bir değer belirlenmelidir. Yapılan bu çalışma da optimum siklon ayırıcı seçeneklerini belirlemede yardımcı olacak bir çalışmadır.

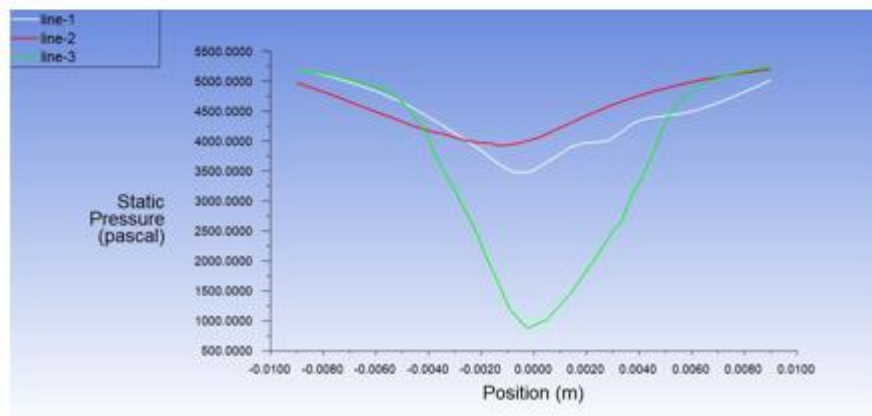
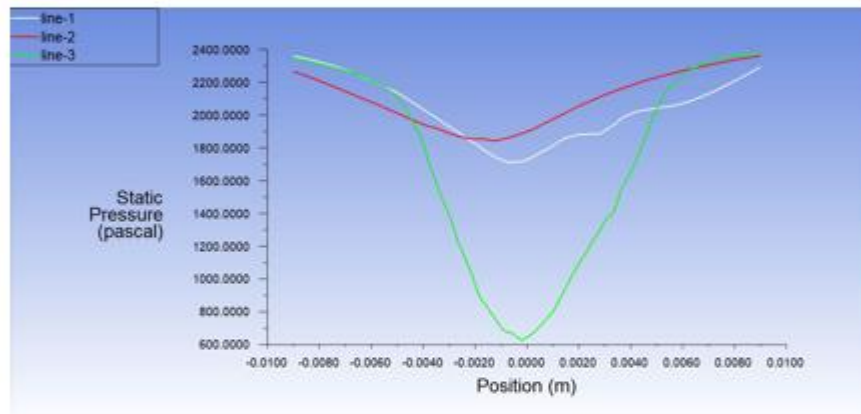
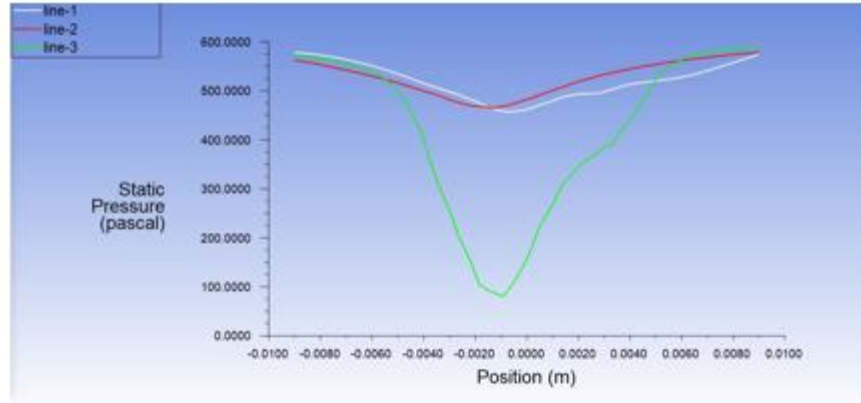
Çizelge 4.17. Model ve Giriş Hızına Göre Giriş ve Çıkış Arası Basınç Farkları

Model-Giriş Hızı	Giriş-Çıkış Arası Basınç Kaybı (Pa)
M1,V=5	535,143
M1,V=10	2013,365
M1,V=15	4585,835
M2,V=5	1178,076
M2,V=10	5242,66
M2,V=15	11974,374
M3,V=5	2059,203
M3,V=10	8709,356
M3,V=15	19858,197

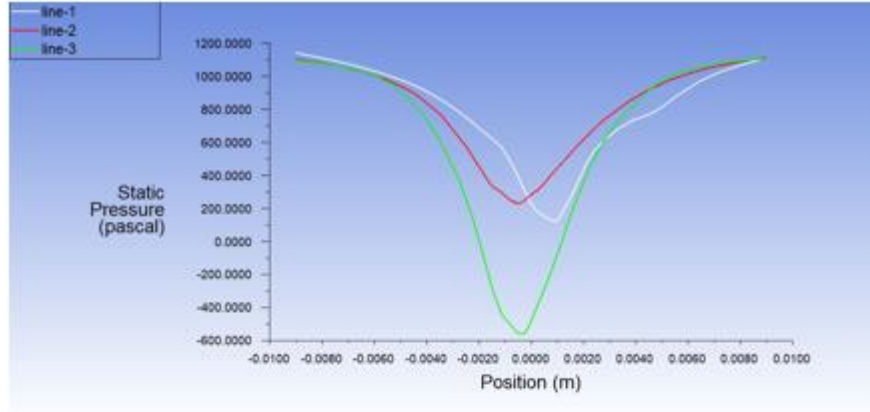
Çizelge 4.14 te Model ve giriş hızlarına göre kategorize edilen siklon ayırıcıların giriş ve çıkışları arasındaki net basınç farkları verilmiştir. Buradan giriş hızının basınç kayıplarında doğrudan rol oynadığı görülmektedir. Ayrıca diğer etki de model kaynaklı oluşmaktadır. Helis açısı azaldıkça basınç kayıplarının arttığı gözlenmektedir. Bunun nedeni aynı uzaklıkta modellerdeki spiral yapıların sarım sayısının artmasından kaynaklandığı aşıkardır. Sonuç olarak toplama verimi artarken basınç kayıpları da artmakta buda yüksek enerji gereksinimleri anlamına gelmektedir. Bu yüzden siklon ayırıcılar kullanım yeri ve şartlarına göre iyi analiz edilmeli ve optimum çalışma şartlarına uygun siklon ayırıcılar seçilmelidir.



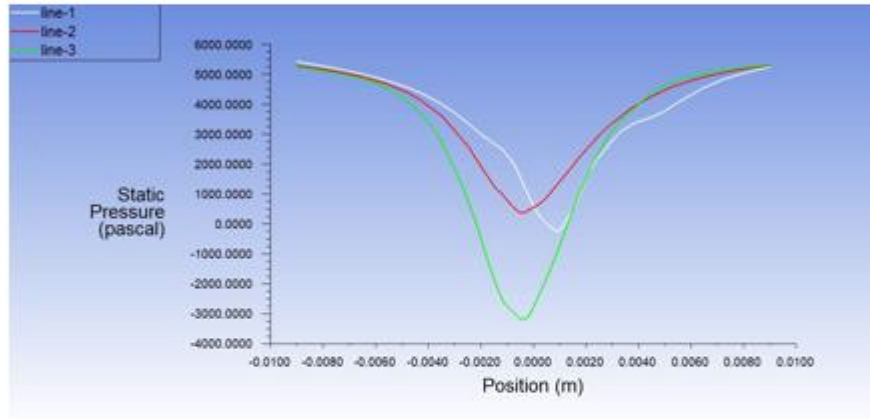
Şekil 4.41. Model ve Giriş Hızına Göre Giriş ve Çıkış Arası Basınç Farkları Sütun Grafik Üzerinde Gösterimi



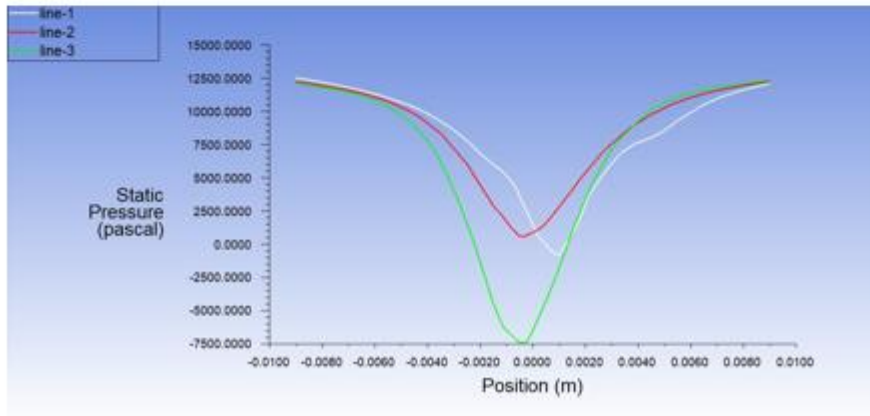
Şekil 4.42. Model 1 için Farklı Giriş Hızlarında Statik Basınç Eğrileri



V= 5 m/s

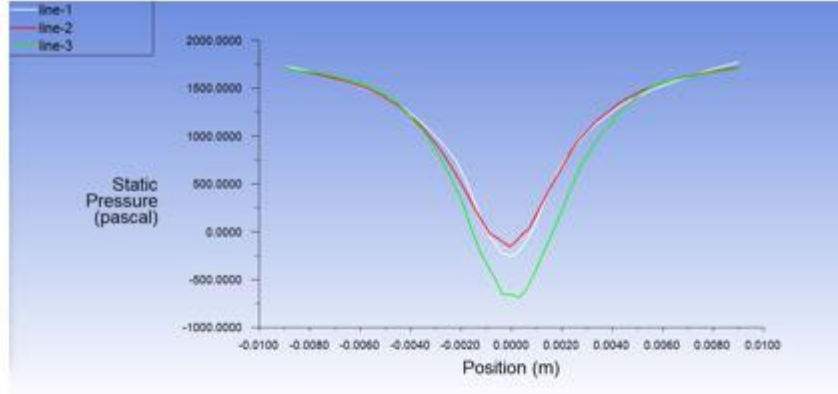


V= 10 m/s

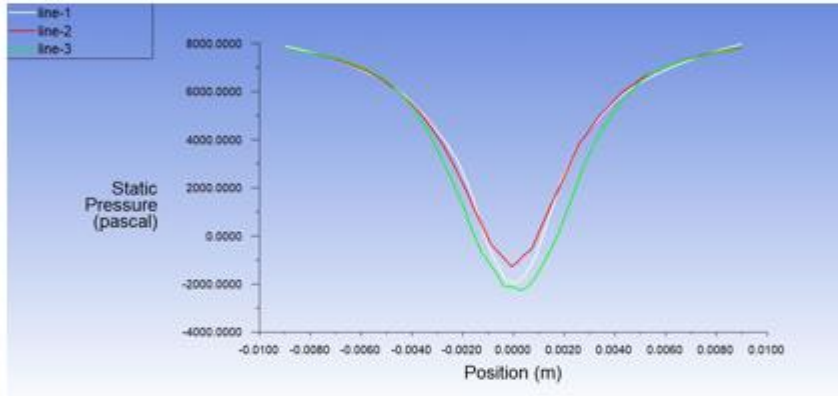


V= 15 m/s

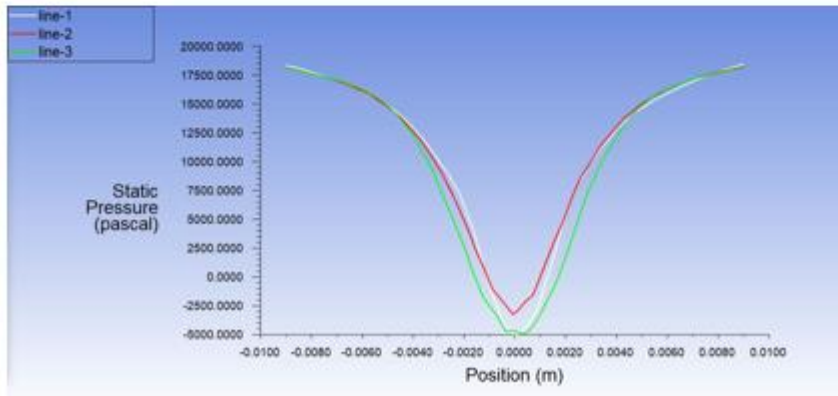
Şekil 4.43. Model 2 için Farklı Giriş Hızlarında Statik Basınç Eğrileri



V= 5 m/s



V= 10 m/s



V= 15 m/s

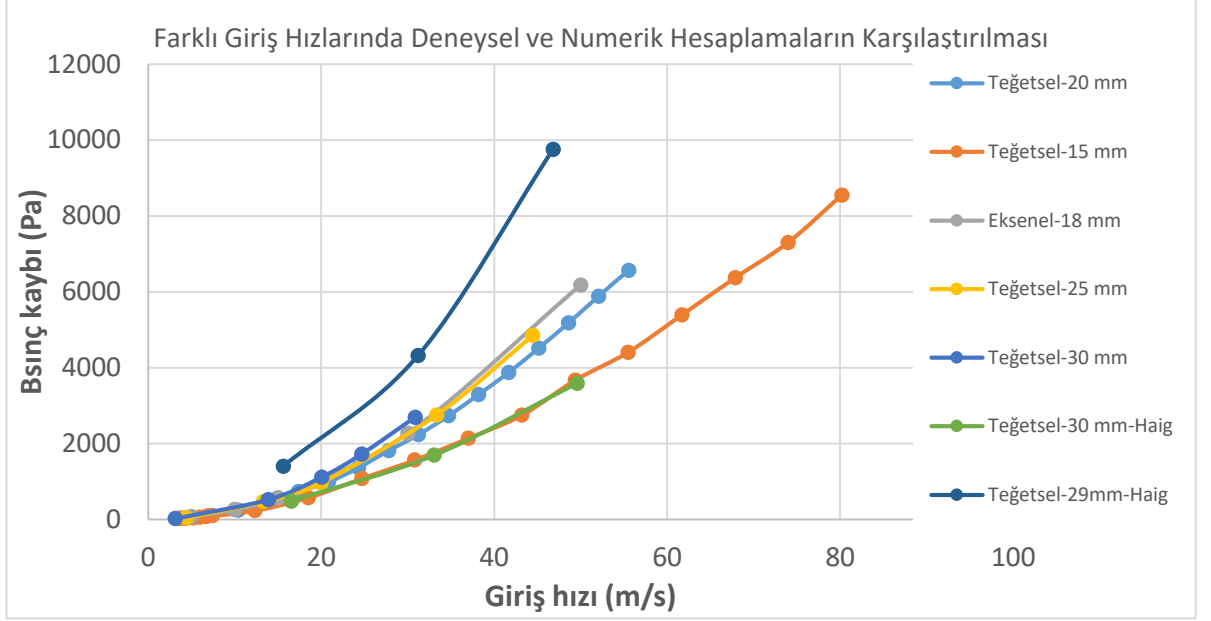
Şekil 4.44. Model 3 için Farklı Giriş Hızlarında Statik Basınç Eğrileri

Siklon ayırıcılarda basınç düşüşüne neden olan bir diğer önemli faktör de giriş borusu kesit alanının çıkış borusu kesit alanına oranıdır. Bir başka ifade ile çıkış borusunun kesit alanı, giriş borusunun kesit alanı sabit kalmak şartıyla, arttıkça basınç düşüşleri azalmaktadır. Bu durum da siklon ayırıcıların daha az enerji harcayarak çalışmalarını sağlar. Ancak özellikle aksel siklonlarda tasarımı gereği çıkış borusunun çapı arttıkça toplama ünitesinin kesit alanı azalmaktadır. Bu durumda siklon ayırıcı içerisinde daha az partiküllerin yakalanmasına sebep olmaktadır. Bu durumda da en uygun çalışma şartlarında çalışacak olan siklon ayırıcıyı tespit etmek için yeniden bir optimizasyon çalışması gerekmektedir. Bu optimizasyon çalışmalarının en iyi ve en verimli olanı da CFD tabanlı bilgisayar çözümleri olmaktadır.

Yapılan bir başka çalışmada da çıkış-giriş kesit alanı oranının siklon üzerine etkileri araştırılmıştır. Bunun için model 1 seçilmiştir. Çünkü model 1 siklonu helis açısı en büyük olan siklon ayırıcı modeldir. Bir diğer ifade ile spiral sarım sayısı en düşük olan modeldir. Siklon ayırıcı giriş-çıkış kesit alanları 1 olacak şekilde revize edilmiştir. Bunu yaparken geometri üzerinde ufak değişiklikler yapılmıştır. Siklon ayırıcı model 1 için belirli hızlarda yeniden analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçları, yapılan deneysel bir teğetsel siklonun verileri ile yaklaşık olarak mukayese edilmiştir. Yapılan analiz ve deneysel veriler Çizelge 4.18 üzerinde gösterilmiştir. Buradaki sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırdığımızda sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda da yapılan numerik çözümlerin deneysel veriler ile yüksek ölçüde yakınlık gösterdiği izlenmiştir. Çizelgedeki değerler Karakaş (2020)'in deneysel teğetsel siklon ayırıcı tez çalışmasından ve Haig (2015) in makalesinden alınmıştır.

Çizelge 4.18. Deneysel ve Numerik Verilerin Farklı Giriş Hızlarında Sonuçları

15mm		Nümerik-18mm		20mm		25mm		30 mm		30mm-Haig(D/D2=1,71)		29mm-Haig(D/D2=3.3)	
Hız (m/s)	Basınç (Pa)	Hız (m/s)	Basınç (Pa)	Hız (m/s)	Basınç (Pa)	Hız (m/s)	Basınç (Pa)	Hız (m/s)	Basınç (Pa)	Hız (m/s)	Basınç (Pa)	Hız (m/s)	Basınç (Pa)
5,18	45	5	72,95	4,16	36	4,4	45	3,09	22	16,53	485	15,61	1401
12,34	232	10	258,77	10,41	247	13,33	470	13,88	521	33,06	1693	31,21	4321
18,5	574	15	572,88	17,36	736	20	963	20,06	1117	49,59	3588	46,82	9755
30,8	1565	30	2269,8	31,25	2239	33,33	2751	24,69	1725				
49,38	3672	50	6176,9	52,08	5884	44,44	4850	30,86	2694				



Şekil 4.45. Farklı Giriş Hızlarında Deneysel ve Numerik Sonuçların Karşılaştırılması

Bir siklon ayırıcı içerisinde basınç değişkenlerine en çok etki eden unsur, siklon ayırıcı içerisinde oluşan girdap akışlarıdır. Bu girdap bölgeleri siklon ayırıcı içerisinde eksenel ve teğetsel hız bileşenlerini de belirleyen bir faktördür. Buradan hareketle siklon ayırıcı içerisindeki basınç farklarına da etki etmektedir. Basınç değişimlerine etki eden diğer bir unsur ise siklon ayırıcıların geometrilerinden kaynaklı değişimlerdir. Siklon ayırıcı içerisindeki daralmalar, giriş-çıkış borularının birbirine olan oranları, çıkış borusunun siklon ayırıcı içerisindeki ve dışında kalan kısımlarının uzunlukları gibi farklı parametreler de siklon ayırıcılar için basınç düşüşlerine etki etmektedirler. Bir başka yapılan çalışmada da Siklon ayırıcılar için boyutsuz basınç katsayısı hesabı kullanılmıştır. Siklon ayırıcılarda basınç farklarını kıyaslarken denklem 4.2.den yararlanılmaktadır. K katsayısını bulmak için;

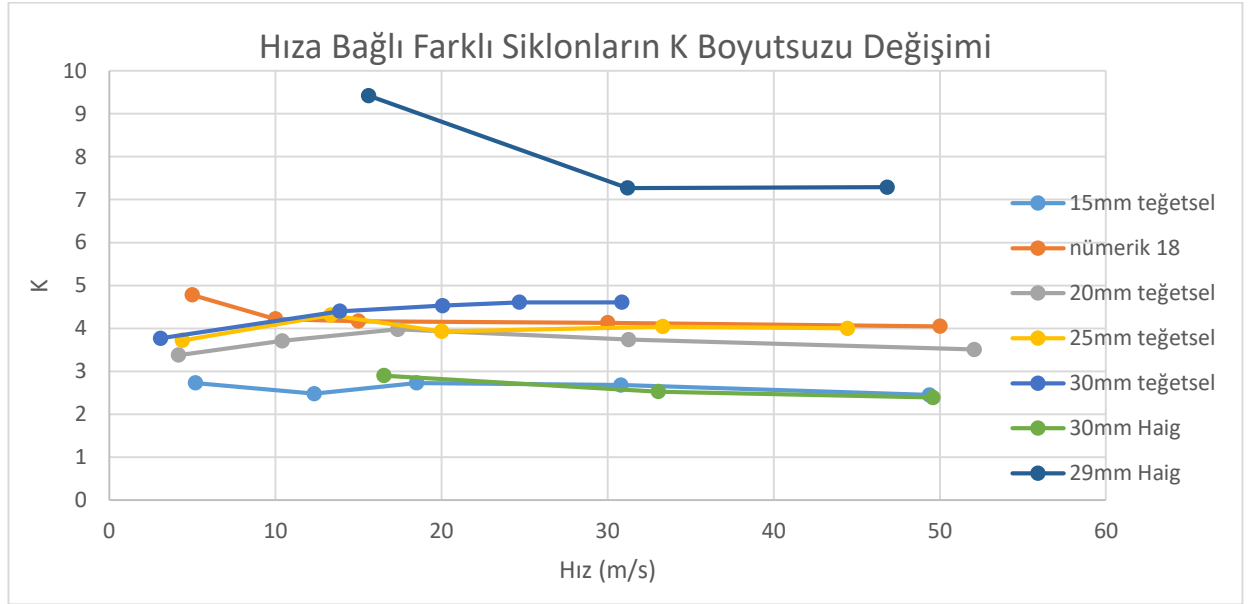
$$K = \frac{\Delta P * 2}{\rho * V^2} \quad (4.2)$$

tanımı kullanılmıştır. Buradaki amaç eksenel ve teğetsel basınç katsayılarını mukayese etmektir. Deneysel veriler ile numerik çalışmaların birbirleri ile hangi değerler arasında

ilintili olabildiğini görebilmektir. Giriş hızı (buna bağlı olarak debi) arttıkça boyutsuz K değerini nasıl değiştiği izlenmiştir ve sonuçları paylaşılmıştır.

Çizelge 4.19. Farklı Boyutlardaki Siklon Ayırıcılar İçin Farklı Giriş Hızlarında K Boyutsuz Tablosu

15mm		Nümerik-18mm		20mm		25mm		30 mm		30mm-Haig(D/D2=1,71)		29mm-Haig(D/D2=3.3)	
Hız (m/s)	K boyutsuz	Hız (m/s)	K boyutsuz	Hız (m/s)	K boyutsuz	Hız (m/s)	K boyutsuz	Hız (m/s)	K boyutsuz	Hız (m/s)	K boyutsuz	Hız (m/s)	K boyutsuz
5,18	2,73	5	4,78	4,16	3,38	4,4	3,72	3,09	3,77	16,53	2,9	15,61	9,42
12,34	2,48	10	4,22	10,41	3,71	13,33	4,31	13,88	4,4	33,06	2,53	31,21	7,27
18,5	2,73	15	4,17	17,36	3,98	20	3,93	20,06	4,53	49,59	2,39	46,82	7,29
30,8	2,68	30	4,13	31,25	3,74	33,33	4,04	24,69	4,61				
49,38	2,45	50	4,05	52,08	3,51	44,44	4	30,86	4,61				



Şekil 4.46. Farklı Hızlarda Farklı Siklon Ayırıcılarının K Boyutsuz Değişimi

Şekil 4.46 da da görüldüğü gibi farklı siklon ayırıcılara ait K boyutsuz değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Burada genel olarak giriş hızı arttıkça K boyutsuzunun değerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Diğer bir hususta yapılan nümerik çalışmanın basınç katsayısı değerlerinin de deneysel yapılan çalışmalar ile aynı aralıkta seyretmesidir. Özellikle 20, 25 ve 30mm çapa sahip siklon ayırıcılar ile çok yakın değerler oluşturmaktadır. Bu durumda yapılan nümerik çalışmanın güvenilirliğini arttırmaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan çalışmada eksen boyunca akışkanın girdiği ve aynı ekseninde sistemi terk ettiği, literatürde aksenal siklon ayırıcı olarak karşımıza çıkan siklon modelleri incelenmiştir. Analizler bilgisayar ortamında temellerini CFD biliminin oluşturduğu ve günümüzde ticari olarak sunulan yazılımlar kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada da geometri oluşturmak için Solidworks 2018 CAD yazılımı, sayısal ağ oluşturmak için ANSYS 19.1 içerisinde Workbench ve yine analizleri oluşturmak için ANSYS 19.1 içerisinde bulunan Fluent yazılımları kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hem tek fazlı hem de çift fazlı analizler gerçekleştirilmiştir. Tek fazlı analizlerde öncelikle siklon ayırıcının fiziki durumları yani basınç kaybı ve hız profilleri belirlenmiştir. İki fazlı yapılan analizlerde ise belirlenen şartlar içerisinde partiküller enjekte edilmiştir. Bu partiküllerin siklon ayırıcı içerisindeki davranışları ve siklon ayırıcının toplama performansı hesaplanmıştır.

Yaptığımız numerik çalışmalarda türbülans modeli olarak RSM (Reynold Stres Model) kullanılmıştır. RSM türbülans modeli genel olarak siklon ayırıcılarda türbülans bölgelerini ve santrifüj etki alanlarını hesaplamada diğer modellere göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Ayrıca LES gibi türbülans modellerine göre de daha hızlı ve neredeyse aynı doğrulukta sonuçlar sunmaktadır. Gimbun ve ark.(2005) ve Kargöz ve Kaya(2009) da yaptıkları çalışmalarında RSM türbülans modelinin diğer modellerden daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Siklon ayırıcı model oluşturulurken piyasadaki bazı siklonlar temel alınmış ve birkaç revizyon ile analiz ettiğimiz halini almıştır. Ayrıca aksenal siklon ayırıcılarda helis açısının etkileri tasarlanan farklı helis açısına sahip modeller ile test edilmiştir. Üç farklı giriş hızında 3 farklı siklon ayırıcı model için analizler yapılmıştır ve etkileri paylaşılmıştır.

Siklon ayırıcıya giren akışkanın hızı 5, 10 ve 15 m/s hızlarda her bir model için incelenmiştir. Her üç model için de siklon ayırıcıya giren akışkanın hızı arttıkça toplama veriminin de arttığı gözlemlenmiştir. Zhu ve Lee (1999) de yaptıkları çalışmalarda siklon ayırıcı içerisine giren akışkanın hızının siklon ayırıcı toplama performansına etkilerini

araştırmışlardır ve akışkanın giriş hızının artması ile toplama performansının arttığını tespit etmişlerdir. Bu durum da bizim yaptığımız çalışma ile örtüşmektedir.

Yapılan bir diğer çalışmada da boyutları 1 mikrondan 10 mikrona kadar olan partiküller her bir model ve hız değeri için sisteme enjekte edilmiştir ve sonuçları paylaşılmıştır. Buna göre siklon ayırıcılar partikül boyutunun etkisi altında iki farklı fonksiyonda değerlendirilmiştir. İlk olarak sabit giriş hızında partikül toplama verimini ele aldığımızda helis açısı azaldıkça siklon ayırıcının daha küçük boyutlarda olan partikülleri toplama verimi artmaktadır. İkinci olarak siklon ayırıcıya giren akışkanın hızının daha düşük boyutlardaki partikülleri toplama verimleridir. Yapılan çalışmada giriş hızı arttıkça siklon ayırıcı içerisinde daha küçük partiküllerin de daha fazla tutulabildiği gözlemlenmiştir. Bir diğer ifade ile siklon ayırıcı içerisinde daha küçük boyutlarda partikülleri yakalama verimi giriş hızı arttıkça artmakta, helis açısı arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni de siklon ayırıcının çeperine doğru oluşan santrifüj kuvvetlerin büyüklüğüdür. Çünkü helis açısı ve giriş hızı eksenel siklon ayırıcılarda santrifüj kuvvetlerin oluşumunda doğrudan etkili iki parametredir.

Helis açısının etkisinin siklon ayırıcı üzerinde etkisini ele aldığımızda helis açısının azalması ile siklon toplama performansının arttığı gözlemlenmiştir. Yani siklon ayırıcı girişinde girdap oluşturucu olarak kullanılan spiral yapının dönüm (tur) sayısı arttıkça helis açısı azalmakta buda toplama verimini arttırmaktadır. Bununla birlikte helis açısının azalması ile giriş ve çıkış bölgeleri arasındaki basınç farkları artmaktadır. Basınç düşümü siklon ayırıcılar için istenmeyen bir durumdur. Çünkü enerji tüketimi fazlaşmaktadır. Gong ve ark.(2012) yaptıkları çalışmalarında helis açısının siklon ayırıcının toplama performansı ve basınç düşümü etkilerini incelemişlerdir. Helis açısının azalması ile basınç düşüşlerinin arttığını buna paralel olarak toplama veriminin de arttığını ifade etmişlerdir. Yaptığımız çalışmada da bu sonuçlar ile paralellik göstermektedir.

1 nolu siklon ayırıcı model ile yapılan bir başka çalışmada ise farklı giriş hızlarında siklon ayırıcının basınç düşüşleri gözlemlenmiştir. Buna göre 1 numaralı siklon ayırıcı model üzerinde yapılan akışkanın giriş kesit alanı sabit kalmak şartı ile çıkış borusu kesit alanı büyütülmüştür. Literatürde Karakaş (2020)'un deneysel olarak yapmış olduğu teğetsel bir siklon ayırıcı model ile sonuçları mukayese edilmiştir. Bu sonuçlara göre giriş kesit

alanı sabit kalmak şartı ile çıkış borusunun kesit alanının artması ile basınç düşüşlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çıkan sonuçlar birbirine çok yakın seyretmiştir. Bu durumda yapılan analizlerin doğruluk derecesini bizlere göstermektedir. Fakat çıkış borusu çapı büyüdükçe toplama veriminde de gözle görülür azalmalar ortaya çıkmıştır. Bu durumda siklon ayırıcının kullanılacağı şartlara göre yine optimum şartlar seçilmelidir.

Siklon ayırıcı modeller üzerinde yapılan bir başka analizde basınç düşüşleri ile ilgilidir. Üç farklı siklon ayırıcı modelde, üç farklı giriş hızında yapılan analizler sonucu helis açısının azalması ile basınç düşüşlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Modeller sabit tutularak giriş hızlarındaki artış ile birlikte basın düşüşlerinin yeniden arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de her iki unsurunda siklon ayırıcı içerisindeki santrifüj kuvvetleri arttırması ile bağlantılıdır.

Akışkanlar mekaniği ve dinamiğinin özellikle günümüz teknolojisi ile birlikte vazgeçilmezi haline gelen CFD kavramı hemen hemen bütün akışkan ortamlarda bizlere artık çok daha kısa zamanda gerçek verilere en yakın şekilde sonuçlar vermektedir. Bu durumda özellikle optimizasyon öngörülleri ile çok az iş yükü ve zaman ile çözülmekte ayrıca kompleks ve prototip üretimi konusunda güçlük yaşanan zamanlarda temeli akışkan davranışlarının matematiksel denklemlere dönüştürülüp numerik çözüm yöntemleri ile çözülmesiyle gerçeğe en yakın sonuçlara ulaşma tekniğine dayanan ve bütün bunları bilgisayar ortamında yapmamıza olanak sağlamaktadır. Bu sayede akışkanın anlık mevcut durumunu basınç ve hız vb. parametrelerini her açıdan değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Yaptığımız çalışmada da bu teknikler ve yazılımlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir ve sonuçları paylaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Avci, A., Erel, G.K., 2003.** Siklon Separatörlerde Uzunluğun Verime Etkisi Ve Optimizasyonu: Uludağ Üniversitesi *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 8, Sayı 1*, 2003, 8(1): 101-109
- Avci, A. Ve I. Karagoz. 2003.** Effect of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators. *Aerosol Science*, 34: 937-955.
- Bashir, K.,2015.** Design and fabrication of cyclone separator, *Master Thesis*, China University of Petroleum, DOI: 10.13140/RG.2.2.20727.83368
- Cortes, C., A. Gil. 2007.** Modeling the Gas and Particle Flow Inside Cyclone Separators, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33: 409-452.
- Çalışkan, E. 2017.** Sanal gövdeli mini bir siklon ayırıcının tasarlanması ve deneysel incelenmesi. *Master Thesis*, School of Natural and Applied Science, Mechanical Engineering Department, Uludağ University, Bursa, Turkey
- Caliskan, M. E., Karagoz, I., Avci, A., & Surmen, A. 2019.** An experimental investigation into the particle classification capability of a novel cyclone separator. *Separation and Purification Technology.*, 209: 908-913.
- Dirgo, J. And D. Leith. 1985.** Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions, *Aerosol Sci.Tecnol.*, 4: 401-411.
- Elsayed, K., Lacor, C.,2011.** The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance: *Applied Mathematical Modelling* 35 (2011) 1952–1968
- Erbaş, M. Sofuoğlu, A. Bıyıkoğlu, A. and Uslan, İ. 2013.** Bir Toz Tutucu Siklon Ayırıcının Tasarımı Ve sayısal Metodlar Kullanılarak İyileştirilmesi: *Uhbtk'13 19. Ulusal Isı Bilimi Ve Tekniği Kongresi*, 9-12 Eylül 2013, Samsun
- Fdlelseed A.M.A.,2018.** Performance Investigation Of A Mini Cyclone With Virtual Body, *Master Thesis*, School of Natural and Applied Science, Mechanical Engineering Department, Uludağ University, Bursa, Turkey
- Gil, A., C. Cortes, L.M. Romeo And J. Vehilla. 2002.** Gas-Particle Flow Inside Cyclone Dipples 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.
- Gimbun, J., T.G. Chuah, A. Fakhru“L-Razi And S.Y. Choong Thomas. 2005.** Prediction ofthe effects ofcone tip diameter on the cyclone performance: *Aerosol Science.*, 36: 1056–1065

- Griffiths, 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, G., Yang, Z. And Zhu, S., 2012.** Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator: *Applied Mathematical Modelling.*, 36: 3916–3930
- Haig, C.W. and Mcilwain, S., 2015.** An empirical investigation into the influence of pressure drop on particle behaviour in small scale reverse-flow cyclones, *Powder Technology.*, 275: 172–181
- Hoffmann, A.C., Stein, L.E. 2008.** Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation. *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 562 pp.
- 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.
- Jiang, Z., Chen, J. and Chen, J., 2018.** Effect of Inlet Air Volumetric Flow Rate on the Performance of a Two-Stage Cyclone Separator: *ACS Omega* 2018, 3, 13219–13226
- Karagöz, İ. Ve A. Avci. 2005.** Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators. *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, *Uludağ Üni.Müh.-Mim.Fak.Dergisi.*, 1:85-96.
- Karagöz, I., Avci, A., Surmen, A., 2013.** Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators: *Powder Technology.*, 235: 460–466
- Karagoz, I., Avci, A., Surmen, A., Sendogan O. 2013.** Design and performance evaluation of a new cyclone separator. *Journal of Aerosol Science.*, 59: 57-64.
- Karakaş, C., 2020,** Yüksek verimli farklı geometrideki mini siklonların performansının deneysel olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi Bursa, Türkiye

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

Luan, Y. and Sun, H.,2014. Experimental and Numerical Study on the Resistance Performance of an Axial Flow Cyclone Separator: *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2015*, Article ID 384524

Patankar, S. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. *Hemisphere Publishing Corp.*, 18(2): 197-229.

Sakin,A.,Karagöz,İ.,Avci,A.2017. A Computational Comparison of Flow and Pressure Fields in Axial and Reverse Flow Cyclone Separators. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering.*, 3(2): 20-25

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.

Teke, M. 2010. Gaz-Partikül İki Fazlı Girdaplı Akışların Matematik Modellenmesi Ve Sayısal Çözümü. *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi Bursa, Türkiye

Wu. Z., Ji, Z., Duan, L And Zhuang, J. 2016.The flow pattern and entropy generation in an axial inlet cyclone with reflux cone and gaps in the vortex finder , *Powder Technology.*, 303: 192–202

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

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre ORUÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA 13.04.1991
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Atatürk Anadolu Lisesi
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi / Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi / Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : YEKA Kalıp Aparatlar Metal Makine Kauçuk Plastik San.

İletişim (e-posta) : emre.oruc16@gmail.com