

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAY KAZAN SİKLONU PERFORMANSININ
HAD İLE İNCELENMESİ

MEHMED AKİF PAKSOY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAY KAZAN SİKLONU PERFORMANSININ
HAD İLE İNCELENMESİ

MEHMED AKİF PAKSOY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
YRD. DOÇ. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

GEBZE

2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23/06/2014 tarih ve 2014/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/06/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mehmed Akif PAKSOY'un tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet GÜNDÜZ

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada bir DAY kazan siklonunun performansı HAD ve matematiksel modellerin beraber kullanımını öngören hibrit bir model ile incelenmiştir. Bu yeni modelde matematiksel modellerin yetersiz kaldığı noktalarda HAD metodundan faydalanılmış, HAD metodunun zayıf kaldığı noktalarda da matematiksel modellerden faydalanılmıştır. Bu kapsamda birinci adımda bir DAY kazan siklonunun performansı matematiksel modeller ile hesaplanmıştır. İkinci adımda ise HAD analizleri ve matematiksel modeller beraber kullanılarak tekrar siklon performansı hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında ikinci adımda (hibrit model) ile bulunan siklon performansının matematiksel modellere göre daha doğru sonuç verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Siklon, Dolaşımli Akışkan Yatak (DAY).

SUMMARY

In this work, performance of a CFB boiler cyclone is evaluated with a hybrid model which uses CFD and mathematical models together. In this new model CFD method is used to model weak points of mathematical models and mathematical models are used to model weak points of CFD. In this scope, as the first step, a CFB boiler cyclone's performance is calculated by mathematical models. In the second step, efficiency of the cyclone is recalculated by using CFD analysis together with mathematical models. When the results are compared, it is shown that cyclone performance found in the second step (hybrid model) is more accurate than those predicted by mathematical models.

Key Words: Computational Fluid Dynamics (CFD), Cyclone, Circulating Fluidized Bed (CFB).

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Salih Özen ÜNVERDİ'ye,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli çalışma arkadaşım Dr. Levent YAĞMUR'a,

ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı değerli eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Kömür	1
1.1. Kömürden Elektrik Üretimi ve Akışkan Yataklı Kazanlar	3
1.1. Amaç ve Kapsam	7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
2.1. DAY Kazanlarda Ayırma Sistemleri	9
2.1.1. U-profiller	9
2.1.2. Kompakt Siklonlar	10
2.1.3. Siklonlar	11
2.2. Matematiksel Modeller	14
2.2.1. Klasik Yaklaşım	14
2.2.2. VDI Yaklaşımı	18
2.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	19
2.3.1. Türbülans Modelleri	20
2.3.2. İki Fazlı Akış Modelleri	21
3. HESAPLAMALAR ve ANALİZLER	23
3.1. Klasik Yaklaşım	25
3.1.1. Ayırma Verimi	25
3.1.2. Basınç Kaybı	32
3.2. VDI Yaklaşımı	36
3.2.1. Duvar Ayrımı	36
3.2.2. İç Vorteks Ayrımı	42

3.2.3. Toplam Ayırma Verimi	47
3.2.4. Basınç Kaybı	48
3.3. HAD Analizi	49
3.3.1. Kullanılan Modeller ve Sınır Koşulları	49
3.3.2. Ağ Bağımsızlık Çalışması	51
3.3.3. HAD Sonuçları	55
3.3.4. Farklı Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması	62
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	75

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
μ_g	: Gazın viskozitesi
a	: Siklon giriş yüksekliği
b	: Siklon giriş genişliği
S	: Girdap bulucu derinliği
h	: Siklon silindir yüksekliği
h_k	: Konik bölge yüksekliği
H	: Toplam siklon yüksekliği
D	: Siklon çapı
r_a	: Siklon yarıçapı
r_e	: Merkezi akış çizgisi yarıçapı
r_2	: Ayırma alanı bitişi yarıçapı
r_i	: Vorteks bulucu yarıçapı
$\bar{r}_z$	: Merkezi ivme referans yarıçapı
De	: Girdap bulucu çapı
B	: Katı çıkış ağzı çapı
N_s	: Efektif spiral sayısı
ρ_k	: Parçacıkların yoğunluğu
ρ_g	: Gazın yoğunluğu
ξ_c	: Direnç katsayısı
ξ_b	: Siklon gövdesi direnç katsayısı
ξ_e	: Vorteks bulucu direnç katsayısı
K	: Barth modeli vorteks bulucu direnç sabiti
$\Delta\rho$	: Yoğunluk farkı
v_{tw}	: Siklon duvarı yakınında gaz hızı
v_e	: Siklon girişindeki gaz hızı
v_p	: Parçacığın hızı
v_g	: Gazın hızı
u_a	: Teğetsel hız

u_e	: Merkezi akış çizgisi yarıçapındaki teğetsel hız
u_2	: Ayırma alanı bitişi yarıçapındaki teğetsel hız
u_i	: İç teğetsel hız
h_i	: Kesme yüksekliği
η	: Siklon verimi
η_e	: Duvar ayırımı verimi
η_F	: Farklı çaplar için iç vorteks ayırımı oranı
η_i	: İç vorteks ayırımı verimi
d_p	: Parçacık çapı
d_{50}	: Kesme çapı
d_e^*	: Duvar ayırımı kesme çapı
$d_{50,A}$	: Siklon girişinde parçacıkların kesme çapı değeri
ΔR_{Ai}	: Parçacık çapının kütle oranı
V	: Siklon hacmi
$\dot{V}$	: Hacimsel gaz debisi
C_{lim}	: Sınır siklon yükü
C_e	: Kütleli siklon yükü
L	: Hacimsel siklon yükü
u_i	: X-eksenindeki hız
u_j	: Y-eksenindeki hız
u_k	: Z-eksenindeki hız
p	: Basınç
t	: Zaman
τ_{ij}	: Gerilme
E	: Enerji
H	: Entalpi
q_i	: Isı akısı
$\dot{m}_{siklon}$	: Siklon katı debisi
$\dot{m}_{kaçan}$	: Siklondan kaçan katı debisi
$\dot{m}_a$	: Ayrılma debisi
A_i	: Siklon giriş alanı
$A_ç$	: Siklon çıkış alanı

A_w	: Ayırma alanı
A_R	: Toplam iç alan
A_{e1}	: Gazın siklondaki ilk turunda taradığı alan
N_s	: Efektif spiral gaz yolu sayısı
E_o	: Düşük yük siklon verimi
β	: Geometrik oran
α	: Daralma katsayısı
λ_0	: Sürtünme katsayısı
$w_{s,50}$	: Çökelme hızı
m	: İç vorteks ayrımı parametresi
$\bar{z}_e$	: Ortalama merkezkaç ivme
u'_i	: X-eksenindeki değişken hız
u'_j	: Y-eksenindeki değişken hız
u'_k	: Z-eksenindeki değişken hız
σ_k	: Z-eksenindeki yüzey gerilmesi
μ_t	: Eddy viskozitesi
C_μ	: Eddy viskozitesi sabiti
k	: Türbülans kinetik enerjisi
ε	: Dağılma oranı
F_A	: Sürüklenme kuvveti
C_D	: Sürüklenme katsayısı
Re	: Reynolds sayısı
x_p	: Parçacığın konumu
ÇSTT	: Çok siklonlu toz tutucu
DAY	: Dolaşımli akışkan yatak
GYTE	: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
KAY	: Kabarcıklı akışkan yatak
LES	: Large Eddy Simulation
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
ODTÜ	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
RNG	: Reynolds Averaged Navier Stokes
RSM	: Reynolds Stress Model

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: 2009 yılı Dünya birincil enerji arzı kaynak payları.	1
1.2: Dünya elektrik üretiminde kullanılan kaynakların dağılımı.	2
1.3: Pülverize bir kazanın şematiği.	4
1.4: DAY kazanın şematik gösterimi.	5
1.5: Akışkan yataklı santrallerin yıllara göre kurulu güç gelişimi.	6
1.6: Akışkan yataklı kazanların yıllara göre kapasite gelişimi.	7
2.1: U-profil ve ÇSTT'nin kazan içerisindeki yerleşimi.	10
2.2: U-profil akış şeması.	10
2.3: a) Kompakt siklon, b) Kompakt siklonun kazan içerisindeki yerleşimi.	11
2.4: a) Teğetsel girişli siklon, b) Spiral girişli siklon.	12
2.5: Soğutmalı siklonun genel görünüşü.	13
2.6: Siklon sınır yük değerinin geçilmesi ile oluşan ayrılma.	18
2.7: Türbülans modellerinin deney verileri ile karşılaştırılması.	21
3.1: Modellenen siklonun boyutsal parametreleri.	23
3.2: Siklon tasarım sistematigi.	26
3.3: Efektif spiral gaz yolu sayısı.	27
3.4: Düşük yük ayırma verimi grafiği.	29
3.5: Yüksek yük siklon verimi grafiği.	31
3.6: Siklon girişi daralma katsayısı.	33
3.7: Siklon çıkışı daralma katsayısı.	35
3.8: Siklon basınç kaybı düzeltme katsayısı.	36
3.9: Siklon ayırma alanı.	40
3.10: Kesme yüksekliği.	43
3.11: Toplam iç alan.	44
3.12: 297.323 hücreli çözüm ağında artıklar grafiği.	51
3.13: 297.000 hücreli çözüm ağında yakınsama grafiği.	52
3.14: 452.042 hücreli çözüm ağında artıklar grafiği.	52
3.15: 452.000 hücreli çözüm ağında yakınsama grafiği.	53
3.16: 681.920 hücreli çözüm ağında artıklar grafiği.	53

3.17:	681.920 hücreli çözüm ağında yakınsama grafiği.	54
3.18:	Hücre sayısına göre düşük yük siklon verimi.	54
3.19:	Analizlerde kullanılan 450.000 hücreli ağ yapısı.	55
3.20:	Siklon içerisinde gazın hareketi.	56
3.21:	Siklon merkezinden geçen y-eksenine göre eksenel hız dağılımı.	57
3.22:	Siklon merkezinden geçen y-eksenine göre teğetsel hız dağılımı.	58
3.23:	Siklon merkezinden geçen y-eksenine göre radyal hız dağılımı.	59
3.24:	Siklon içerisinde parçacıkların çaplarına göre hareketi.	60
3.25:	Siklon giriş yükü ve HAD ile hesaplanan düşük yük siklon veriminin fonksiyonu olarak yüksek yük siklon verimi grafiği.	61
3.26:	Siklon içerisinde hız profillerinin karşılaştırıldığı yerler.	63
3.27:	a) Mavi çizgi üzerinde eksenel hızlar, b) Sarı çizgi üzerinde eksenel hızlar, c) Kırmızı çizgi üzerinde eksenel hızlar.	64
3.28:	a) Mavi çizgi üzerinde radyal hızlar, b) Sarı çizgi üzerinde radyal hızlar, c) Kırmızı çizgi üzerinde radyal hızlar.	64
3.29:	a) Mavi çizgi üzerinde teğetsel hızlar, b) Sarı çizgi üzerinde teğetsel hızlar, c) Kırmızı çizgi üzerinde teğetsel hızlar.	64
3.30:	a) K-epsilon modelinde dinamik basınç dağılımı, b) RNG k-epsilon modelinde dinamik basınç dağılımı, c) RSM modelinde dinamik basınç dağılımı.	65
3.31:	a) K-epsilon modelinde statik basınç dağılımı, b) RNG k-epsilon modelinde statik basınç dağılımı, c) RSM modelinde statik basınç dağılımı.	66
3.32:	a) K-epsilon modelinde toplam basınç dağılımı, b) RNG k-epsilon modelinde toplam basınç dağılımı, c) RSM modelinde toplam basınç dağılımı.	66
4.1:	a) 5 mikrometre çapındaki parçacıkların siklon girişindeki hareketi, b) 78 mikrometre çapındaki parçacıkların siklon girişindeki hareketi, c) 241 mikrometre çapındaki parçacıkların siklon girişindeki hareketi.	69

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Pülverize kömür yakma teknolojisinde parçacık boyutları.	3
2.1: Farklı modeller için kesme çapı ve verim formülleri.	15
2.2: Efektif spiral sayısı (N_s).	16
2.3: Bir DAY kazan siklonu için kesme çapı değerleri.	17
2.4: Siklon basınç kaybı korelasyonları (sadece gaz akışı durumunda).	17
3.1: Siklon boyutları.	24
3.2: Hesaplamalarda kullanılan genel bilgiler.	24
3.3: Parçacık çap dağılımı.	25
3.4: Parçacık çaplarının kesme çapına oranı.	28
3.5: Parçacık çapları için düşük yük ayırma verimleri.	29
3.6: Parçacık çapları için ayrılma debileri.	30
3.7: İç vortekste çapa göre ayrılma oranları.	46
3.8: İç vorteks ayırımı verim hesapları.	47
3.9: Hesaplamalarda kullanılan genel bilgiler.	49
3.10: Parçacık çaplarının HAD analizi ayrılma oranları ve debileri.	60
4.1: HAD analizi kesme çapı kullanıldığında klasik metot siklon verimi ve ayrılma debisi.	68

1. GİRİŞ

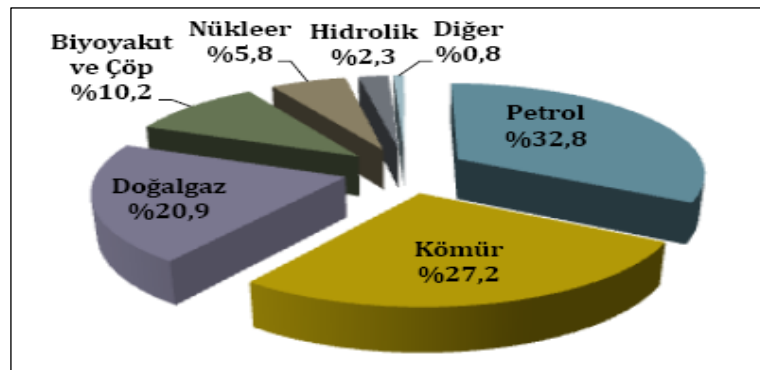
Gelişen ve sanayileşen Dünya’da artan enerji talebini karşılamak üzere teknolojiler geliştirilmekte, mevcut kaynaklardan en verimli bir şekilde faydalanılmaya çalışılmaktadır.

Çeşitli enerji kaynakları arasında kömür önemli bir yer teşkil etmektedir. Kömürden enerji üretiminde de yeni teknolojiler geliştirilmekte, yüksek verimlilik ve düşük çevre kirliliği hedeflenmektedir.

İlerleyen bölümlerde kömürün Dünya’da ve Türkiye’deki durumu özetlenmiştir ve kömürden elektrik üretiminde gelişmekte bir teknoloji olan ve tez kapsamında performansı incelenmiş olan büyük ölçekli siklonları içeren akışkan yataklı kazanlar hakkında genel bilgi verilmiştir. Bölümün son kısmında ise tez konusunun amacı ve kapsamı özetlenmiştir.

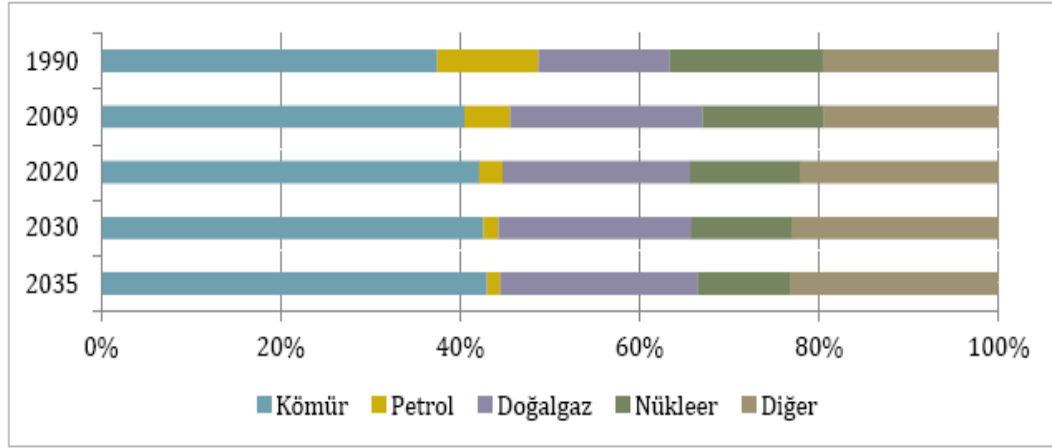
1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Kömür

Dünya birincil enerji arzı son 40 yılda yaklaşık iki kat artmıştır. Söz konusu dönemde; Şekil 1.1’de görüldüğü gibi elektrik üretiminde petrolün payı %46’dan %32,8’e düşerken, doğal gazın payı %16’dan %20,9’a, nükleer enerjinin payı %0,9’dan %5,8’e ve hidrolik dâhil yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %1,9’dan %3,1’e yükselmiştir [1]. Aynı dönemde kömürün payı ise 2,6 puan artışla %24,6’dan %27,2 düzeyine ulaşmıştır [1].



Şekil 1.1: 2009 yılı Dünya birincil enerji arzı kaynak payları.

Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yapılan tahminlere göre 2035 yılında dünya elektrik üretiminde %40'ın üzerinde bir pay ile kömür birinci olacaktır. Bu durum Şekil 1.2'de görülmektedir. Dolayısıyla, kömürün, dünya enerji bileşimi içerisindeki belirleyici konumunu en azından önümüzdeki 25-30 yıl içerisinde de sürdüreceği öngörülmektedir [2].



Şekil 1.2: Dünya elektrik üretiminde kullanılan kaynakların dağılımı.

Ülkemize bakıldığında, yerli kömürün büyük kısmını oluşturan linyit rezervlerinin ısı değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Genel olarak 1.000 kcal/kg ile 4.200 kcal/kg arasında değişiklik göstermekle birlikte yaklaşık %90'ının alt ısı değeri 3.000 kcal/kg'ın altındadır. Yerli linyitlerin düşük ısı değeri dışında yüksek nem ve kül oranı da dezavantaj oluşturmaktadır. Bölgesel olarak kükürtlü kömürler de emisyonlar noktasında sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle kömüre bağlı güç santrallerinde yerli kaynağımız olan linyitin bu özel durumu dikkate alınarak uygun teknolojilerin kullanılması zorunluluğu vardır.

Ülkemizin gelişen ekonomisiyle beraber enerji talebinin de giderek artan bir biçimde ithalat yoluyla karşılanmasının ülkemiz enerji güvenliğini azalttığı bilinmektedir. Artan enerji ihtiyacının karşılanmasında, yerli linyitlerimizin, gerek elektrik üretimi amaçlı gerekse ısınma ve sanayide kullanımının artırılması, enerji güvenliğinin yanında ekonomiye katkı sağlaması bakımından da büyük önem taşımaktadır. Söz konusu misyon ile “Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi” ile de ortaya konulan “Bilinen linyit kaynakları ve taşkömürü kaynakları 2023 yılına kadar elektrik enerjisi üretimi amacıyla değerlendirilmiş olacaktır. Bu amaçla elektrik üretimine uygun yerli linyit ve taşkömürü sahalarının,

elektrik üretimi amaçlı projelerle değerlendirilmesi uygulaması sürdürülecektir.” stratejik hedefine de uygunluk sağlanmış olmaktadır.

Yukarıda ifade edilen stratejik amaç ve hedeflere ulaşabilmenin tek yolu yerli kömürlerin en verimli ve düşük emisyonlarda yakılmasının sağlanmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesidir.

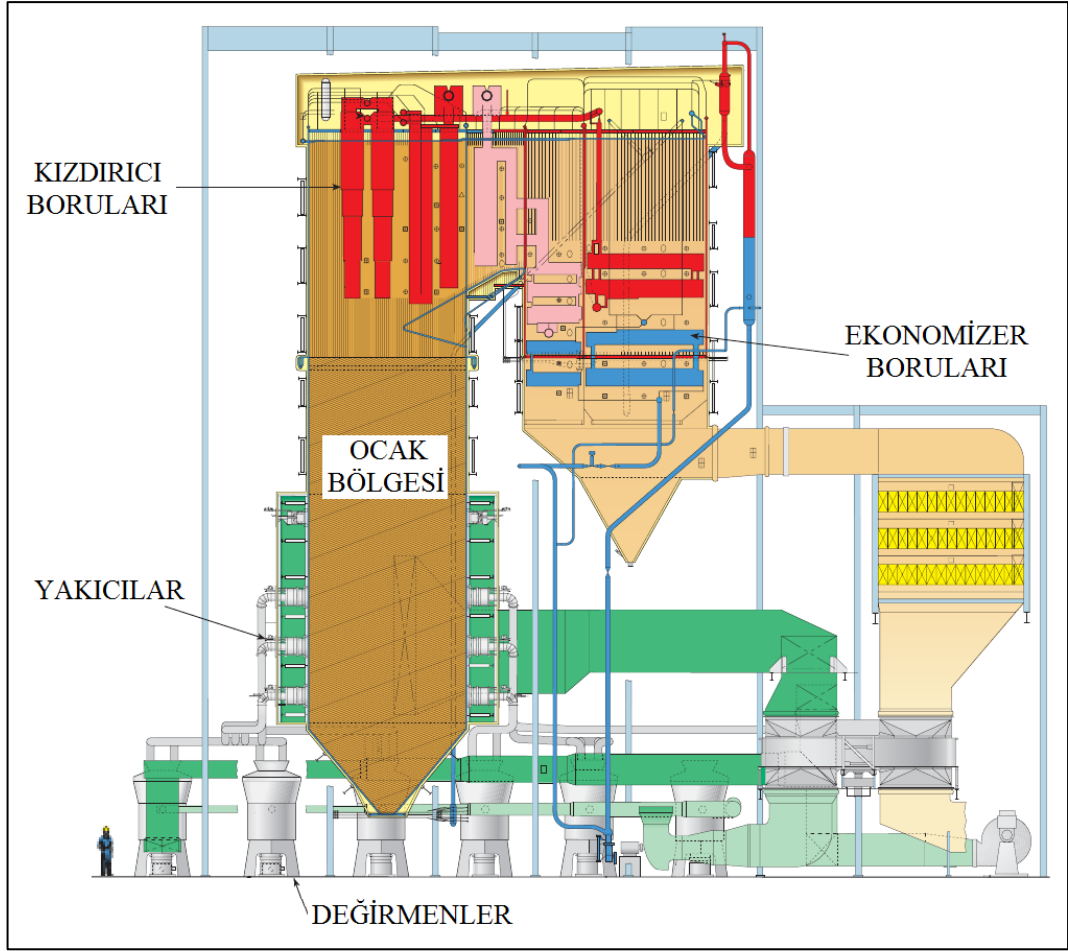
1.2. Kömürden Elektrik Üretimi ve Akışkan Yataklı Kazanlar

Elektrik üretiminde kullanılan kömür yakma teknolojileri (kazan teknolojileri) başlıca ikiye ayrılmaktadır: bunlar pülverize yakma ve akışkan yataklı yakma teknolojileridir. Bu teknolojiler de kendi içlerinde üretilen buharın basınç ve sıcaklık değerlerine, kullanılan ekipmanlara göre farklı sınıflara ayrılmaktadır [3].

Pülverize kazan teknolojisinde, adından da anlaşıldığı gibi, pülverize edilmiş kömür kazanın ortasında bir ateş topu şeklinde yakılmakta ve açığa çıkan ısı enerjisi su ve su buharına aktarılmaktadır. Farklı kömür türleri kazanda yakılırken kömür boyutları için gerekli kriter Tablo 1.1’de verilmiştir [4]. Pülverize bir kazanın şematik gösterimi Şekil 1.3’te verilmiştir [3].

Tablo 1.1: Pülverize kömür yakma teknolojisinde parçacık boyutları.

Kömürün Türü	74 mikrometreden küçük parçacıkların oranı	297 mikrometreden küçük parçacıkların
Subbitümlü ve linyit	65	98
Bitümlü	70	98



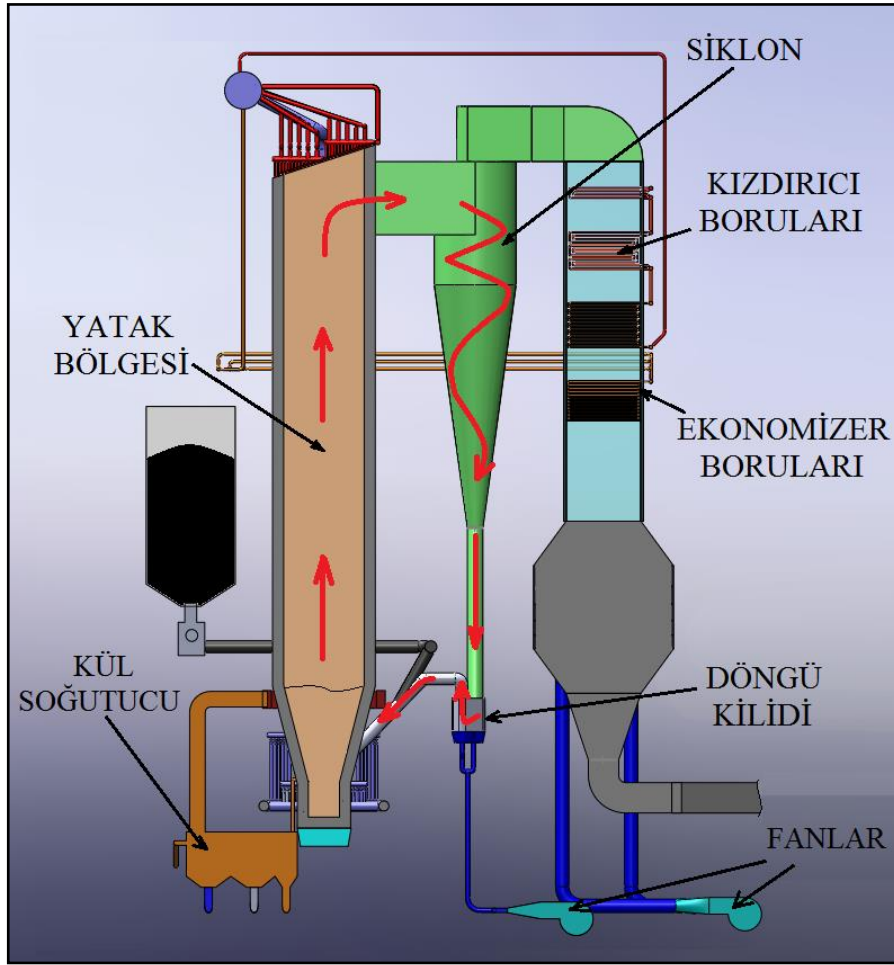
Şekil 1.3: Pülverize bir kazanın şematığı.

Akışkan yataklı kazan teknolojisinde ise kazanın içerisindeki yatak malzemesi ve kömür hava yardımıyla akışkanlaştırılarak bütün yatak bölgesinde yanma gerçekleşir. Yatak malzemesi, kömür, kül, kum ve SO_2 gazının tutulması için yatak bölgesine beslenen kireçtaşından oluşmaktadır.

Başlıca akışkan yatak teknolojileri, kabarcıklı akışkan yatak (KAY) ve dolaşimli akışkan yatak (DAY) teknolojileridir. DAY teknolojisi ile KAY teknolojisinin başlıca farkı gaz hızlarıdır. DAY kazanlarda gaz hızı 4-6 m/s arasında iken KAY kazanlarda gaz hızı 0,5-2,5 m/s arasındadır. Bunun sonucunda DAY kazanlarda katı sirkülasyonu çok daha yüksektir [5].

Dolaşimli akışkan yataklı bir kazanın şematik gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir. Akışkanlaşma, yatak malzemesine yatak bölgesinin altından belirli bir debide beslenen havanın yardımıyla yatak malzemesinin havalandırılması ile gerçekleşir. Havalanan yatak malzemesi yatak bölgesi boyunca uçarak siklona gelir. Siklonda tutularak döngü kilidi aracılığıyla yatağa geri beslenir. Böylece dolaşım sağlanmış

olur. Şekil 1.4'te kırmızı oklar ile gösterilen döngü kazanının içerisindeki katı döngüsünü göstermektedir.

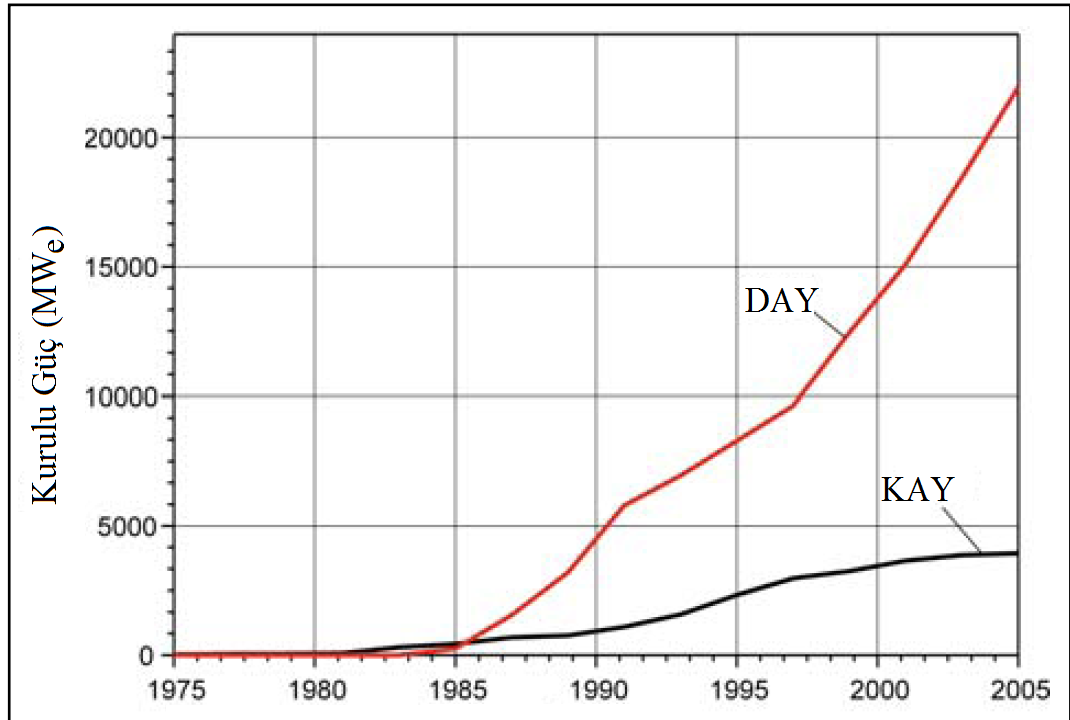


Şekil 1.4: DAY kazanının şematik gösterimi.

Akışkan yataklı kazanlarda yatağa beslenen kömürün parçacık boyutu pülverize kazanlara göre daha büyüktür. Uygulamalar arası farklılıklar olmakla beraber kömürün boyutu 0-6 mm ile 0-12 mm arasında değişmektedir [6], [7]. Yatak malzemesinin içerisindeki kömür miktarı düşük olup, oranı % 0,5-5 arasındadır. Yatağa beslenen kömür %95-99,5 oranında olan yatak malzemesinin içine dağılarak ısınır ve yanmaya başlar [5]. Yatak malzemesinin sıcaklığı 780-900 °C aralığında olup, hava ve kömür besleme hızı ayarlanarak gereken miktarda enerjinin elde edilmesinde süreklilik sağlanmış olur [8]. Yatak sıcaklığının bu aralıktaki olması SO₂'nin tutulmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu teknolojiye yanma bölgesinde ortam sıcaklığı, pülverize yakma sistemlerine göre (1500-1600 °C) daha düşük olduğu için yüksek sıcaklığa bağlı emisyonlar (termal NO_x) daha düşüktür [6].

Akışkan yataklı kazan teknolojisi pülverize yakıtlı kazan teknolojisine alternatif daha yeni bir teknoloji olup, yakıt esnekliği ve düşük emisyonları pülverize kazanlara göre başlıca avantajlarıdır [9]. Akışkan yataklar konusunda yapılan ilk çalışma 1923 yılına dayanmaktaysa da yaygın olarak kullanılması zaman almıştır [10]. Akışkan yataklı kazanlar termik santrallerde elektrik üretiminden önce, sanayide sıcak su, buhar, kurutma amaçlı sıcak gaz elde etmek için kullanılmaya başlanmıştır ve 1970'lerden beri kâğıt ve alüminyum endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. 1976 yılında ilk defa KAY teknolojisi bir termik santralda uygulanmıştır [11].

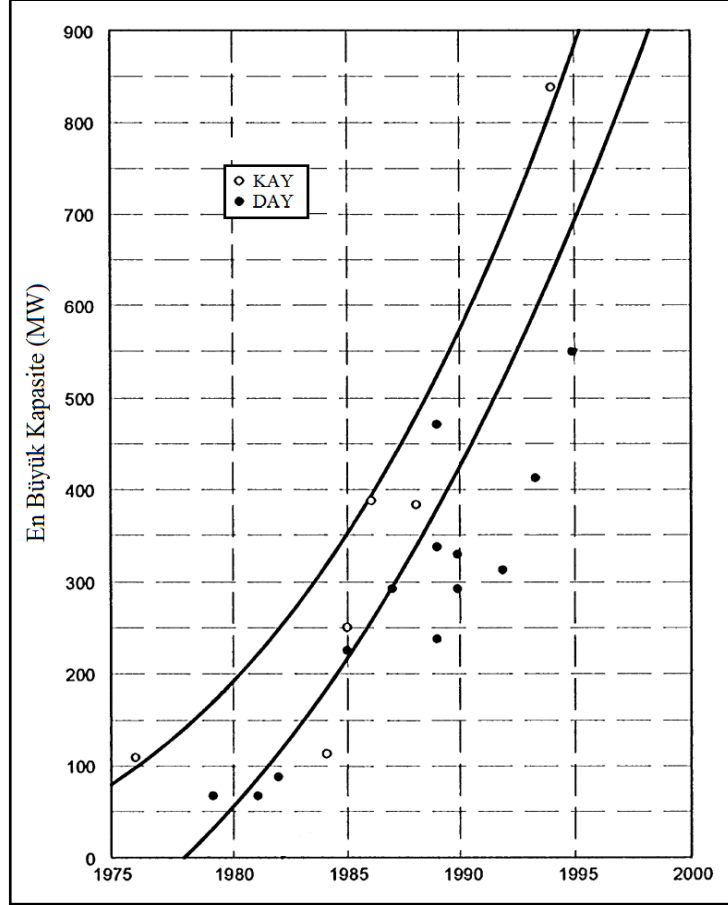
DAY teknolojisine sahip ilk kazan ise 1979 yılında devreye alınmıştır. İlerleyen yıllarda Şekil 1.5'te görüldüğü gibi uygulamalar dolaşımli akışkan yataklı kazanlara yönelmiş ve bugüne kadar da sayıları hızla artan başarılı santral uygulamaları gerçekleştirilmiştir [12].



Şekil 1.5: Akışkan yataklı santrallerin yıllara göre kurulu güç gelişimi.

Akışkan yataklı kazanların sayısı arttıkça Şekil 1.6'da görüldüğü gibi kapasiteleri de artmıştır [11]. Günümüzde dolaşımli akışkan yataklı kazanların kapasitesi 1000 MW'ı geçmiştir [13]. Yüksek kazan kapasitesi sağlayabilmesi ve yüksek kapasitelerde maliyetinin düşüklüğü sayesinde termik santrallerde DAY

kazanlar, KAY kazanlara tercih edilmektedir. Buradan yola çıkarak yeni inşa edilecek 25-50 MW_e gücünden büyük tüm akışkan yataklı kazanların dolaşım olacağı öngörülebilir [14].



Şekil 1.6: Akışkan yataklı kazanların yıllara göre kapasite gelişimi.

1.3. Amaç ve Kapsam

Akışkan yataklı kazanlarda ocak bölgesinin çıkışında, katı sirkülasyonun devam edebilmesi için katıların gazdan ayrılması, küçük boyutlu tanelerin gazlarla beraber toz tutma ünitesine, büyük boyutlu tanelerin ise kazana geri beslenmek üzere döngü kilidine yönlendirilmesi gerekmektedir [5]. Bu işlevi yerine getiren ve dolaşım akışkan yataklı kazanlarda kilit bir ekipman olan katı-gaz separatörlerinin yanma verimi, sirkülasyon oranı, desülfürizasyon verimi, vb. üzerinde de büyük etkisi vardır [15], [16].

Siklonlar yukarıda belirtilen amaç için en yaygın olarak kullanılan ekipmanlardır ve başlıca performans kriterleri ayırma verimleri ve basınç

kayıplarıdır. Bu sebeple siklonların performansının DAY kazan tasarım sürecinde doğru olarak hesaplanabilmesi büyük önem arz etmektedir [17], [18]. Bu amaçla birçok çalışma yapılmış ve matematiksel modeller geliştirilmiş olmakla beraber, hala eksikler bulunmaktadır. Bu eksiklerin başlıcaları, siklonun boyutsal oranları değiştiğinde matematiksel modellerin doğruluklarının azalması ve modern siklonlarda kullanılan eğimli giriş ağzı ve merkezci olmayan girdap bulucu gibi performansı artıran değişikliklerin etkilerinin matematiksel modellerle hesaplanamamasıdır [17], [19].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu ile analizler yapılırsa da yüksek yüklü siklonlardaki yüksek katı konsantrasyonu Euler-Lagrange tipi analizleri yetersiz kılmaktadır [20], [21]. Öte yandan Euler-Euler tipi analizlerin zamana bağlı çözüm üretmesi ve her farklı parçacık çapı için çözülen denklem sayısının artması analiz süresini çok uzatmaktadır [22].

Tez konusunun amacı yeni bir yaklaşım ile DAY kazan siklonlarının performansını daha doğru olarak hesaplamaktır. Bu yaklaşımda siklon performansı önce Euler-Lagrange tipi analizin (katıları ayırma verimi ve basınç kaybı) yeterli olduğu düşük yükler için HAD kullanılarak hesaplanmaktadır. Sonrasında matematiksel modellerde kullanılan siklon veriminin siklon yüküne göre değişimini gösteren grafikler kullanılarak siklon verimi yüksek yüklere uyarlanmaktadır.

Tez konusunun literatüre katkısı siklon performansını mevcut metotlardan daha doğru ve/veya daha kısa sürede hesaplayabilme imkânı tanımasıdır. Ayrıca literatürde çok örneği olmayan büyük ölçekli santral siklonunun performansı incelenmiştir.

Tez kapsamında ticari uygulamada olan bir DAY kazanın siklon performansı önce mevcut matematiksel modeller ile analiz edilmiştir, sonrasında yeni ortaya konulmuş olan hibrit (HAD ve matematiksel modeller) metot ile analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

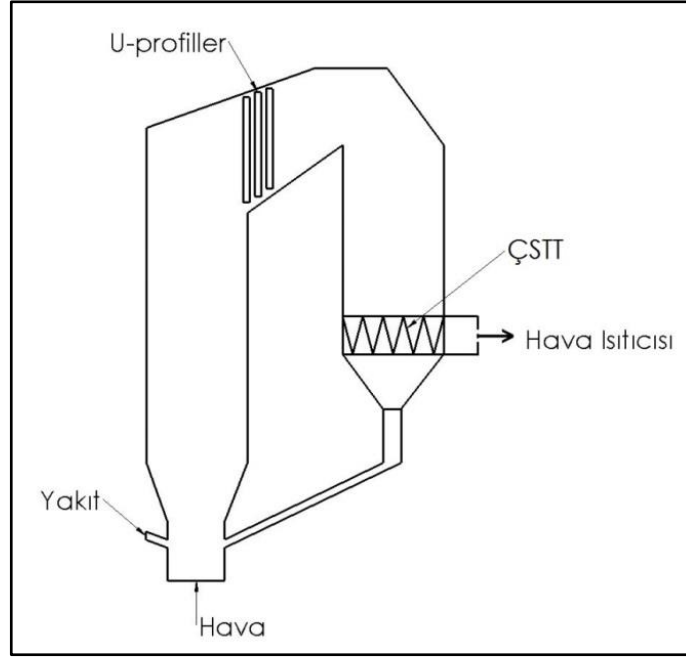
Bu bölümde öncelikle DAY kazanlarda kullanılan ayırma sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında, literatürdeki siklonların performansını hesaplamaya yönelik matematiksel modeller ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı çalışmalar aktarılmıştır.

2.1. DAY Kazanlarda Ayırma Sistemleri

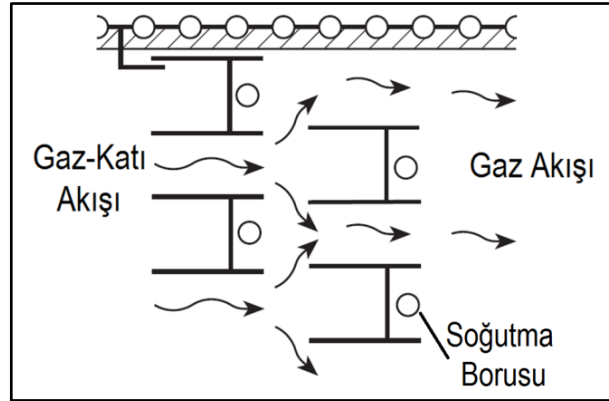
DAY kazanlar yaygınlaştıkça kullanılan sistemler de çeşitlilik kazanmıştır. Bunun paralelinde katı-gaz ayırma sistemlerinde de alternatif tasarımlar ortaya çıkmıştır. Bu alternatiflerin başlıcaları U-profiller ve kompakt siklonlar ve konvansiyonel (geleneksel) siklonlardır. Konvansiyonel siklonlar literatürde sadece siklonlar olarak adlandırılmaktadır. Tezde literatürle paralellik açısından konvansiyonel siklonlar siklonlar olarak adlandırılmıştır.

2.1.1. U-profiller

U-profiller (U-beam) sınıflandırma olarak etki separatörler (impact separators) sınıfına girmektedir. Etki separatörleri farklı şekillerde tasarlanabilmekle birlikte DAY kazanlarda U şeklindeki tasarım yaygın olarak kullanılmaktadır. Etki separatörleri akışkan yataklı kazanlar dışında yaygın kullanıma ulaşamamıştır. Bunun sebebi ufak parçaları ayırma verimlerinin düşük olması ve ufak parçaları tutmak için genelde ÇSTT (çok siklonlu toz tutucu) olarak adlandırılan siklon grubu ile birlikte kullanılmasıdır [23]. Modern tasarımlarda katıların %95-97'si U-profiller ile yakalanabilmektedir. Yine U-profil kullanılan modern tasarımlarda katı sirkülasyonu için ayrıca bir sistem kullanılmamaktadır [24]. U-profiller Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yükseltici kolon (riser column) çıkışına yerleştirilmektedir. ÇSTT ise genelde Şekil 2.1'de görüldüğü gibi hava ısıtıcısının ön tarafına yerleştirilmektedir. Şekil 2.2'de U-profilin genel görünümü verilmiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi U-profillerin arasından geçen hava yön değiştirmekte, eylemsizliği büyük olan parçalar ise akıştan kurtularak profillere çarpmakta ve aşağıya düşmektedir.



Şekil 2.1: U-profil ve ÇSTT'nin kazan içerisindeki yerleşimi.



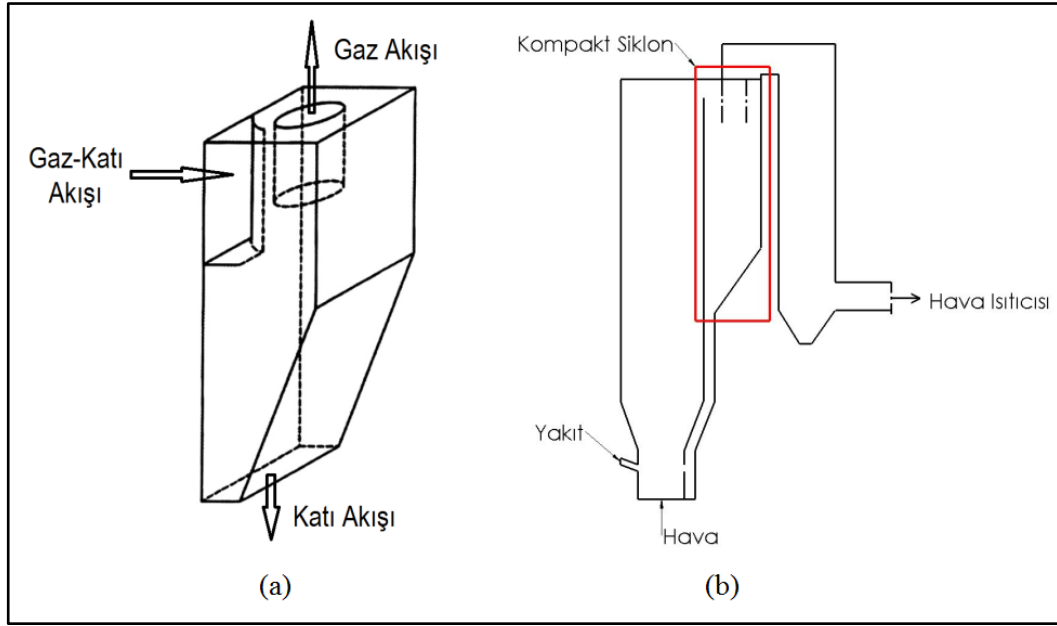
Şekil 2.2: U-profil akış şeması.

Gelişmiş U-profil tasarımlarında profillerin arka tarafından (akışın olmadığı taraf) boru geçirilerek profiller soğutulmaktadır. Böylece profillerde yüksek sıcaklık sonucu oluşan deformasyon vb. problemler önlenmeye çalışılmaktadır. Bu boruların yerleşimi de Şekil 2.2'de görülmektedir.

2.1.2. Kompakt Siklonlar

Kompakt siklonlar geleneksel siklonlarla aynı prensibe sahip olmakla beraber geleneksel siklonların imalatı zorlaştıran dairesel yapısının yerine köşeli (kare,

sekizgen şeklinde) bir yapıya sahiptir. Şekil 2.3'te bir kompakt siklonun yapısı ve kazan içindeki yeri görülmektedir. Bu siklonların alt kısmı da Şekil 2.3'te görüldüğü gibi geleneksel siklonlardan farklıdır. Bu yapı imalat kolaylığı sağlamaktadır. Kompakt siklonlarda refrakter kullanımı azdır. Bazı kompakt siklonlarda refrakter köşeleri yumuşatmak için kullanılmaktadır [25]. Kompakt siklonların bir diğer avantajı da geleneksel siklonların bağlantı noktalarında kullanılan dengeleyicilere ihtiyaç duyulmamasıdır.



Şekil 2.3: a) Kompakt siklon, b) Kompakt siklonun kazan içerisindeki yerleşimi.

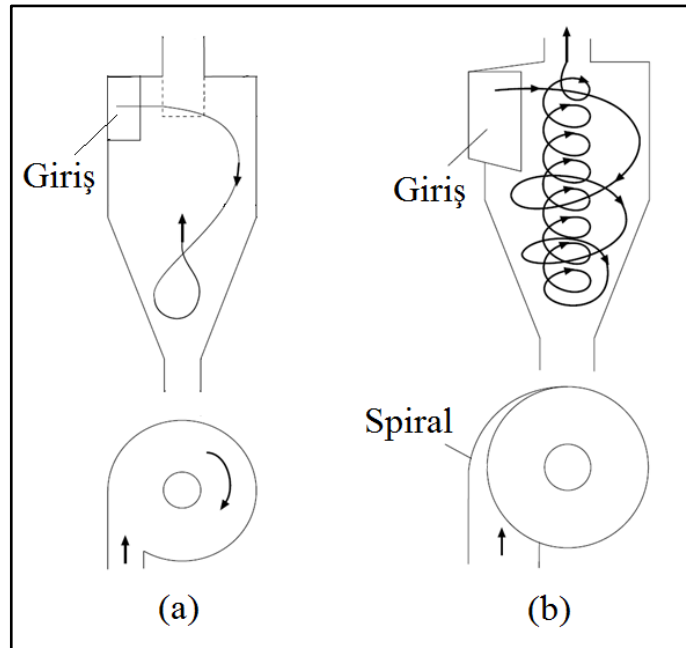
Kompakt siklonlarla ilgili literatür, konvansiyonel siklonlarla ilgili literatür kadar geniş değildir. Bu durum tasarım ve boyutlandırılmasındaki belirsizlikleri arttırmaktadır.

2.1.3. Siklonlar

Sıcak katı-gaz karışımlarının ayrıştırılmasında farklı seçenekler olmasına rağmen siklonlar ayırma verimi ile yatırım, işletme ve bakım maliyetleri arasında en uygun dengeyi sağlamışlardır. Farklı gaz basınç ve sıcaklıklarını ayrıca çok yüksek katı yükünü kaldırabilmelerinin yanında daha yüksek verimli ayırıcılar ile karşılaştırıldıklarında kabul edilebilir bir performans vermektedirler.

Günümüzde siklonlar basınçlı ve dolaşımli akışkan yatak teknolojilerinde kilit bir bileşendir [16]. Siklonlar geçmişte düşük verimli ayırıcılar olarak düşünölmekle beraber ileri tasarım prensipleri verimlerini önemli miktarda artırmıştır. Günümüzde oda koşullarında 5 μm den büyük parçalarda ayırma verimi %98'e ulaşmaktadır [26].

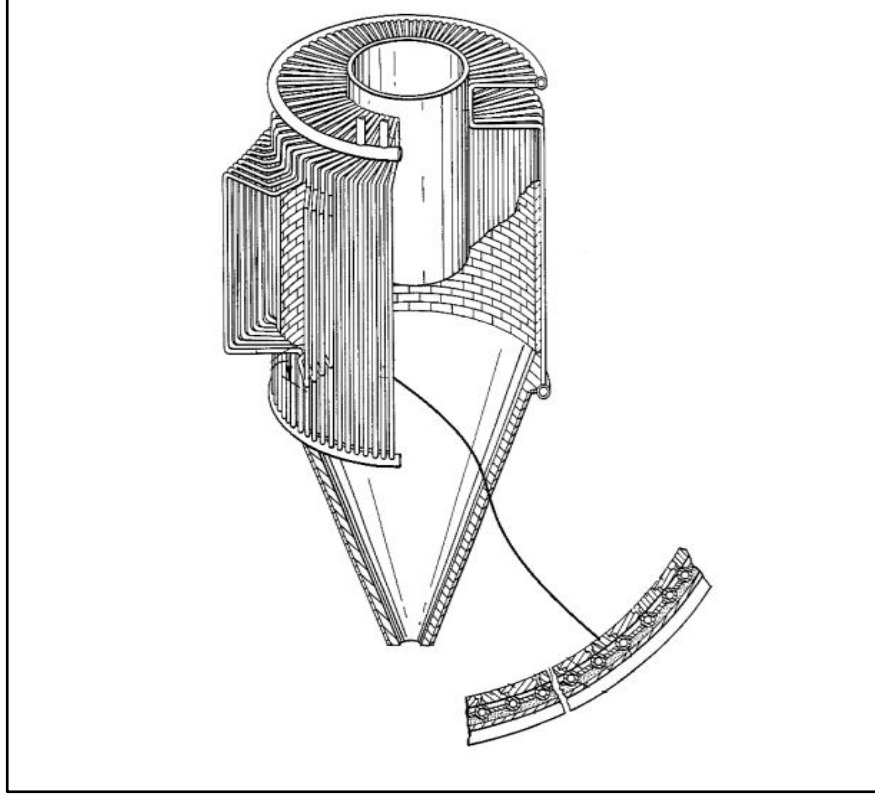
Siklonların kendi içerisinde farklı sınıflandırmaları bulunmaktadır. Tezde akışkan yataklı kazanlarda kullanılan tipler özetlenmiştir. Giriş tipine göre Şekil 2.4'te görölen teğetsel ve spiral girişli siklonların akışkan yataklı kazanlarda kullanımı görölmektedir [5]. Bununla birlikte genelde düşük maliyetleri sebebiyle teğetsel girişli siklonlar spiral girişli siklonlara tercih edilmektedir [17], [27]. Bir başka giriş tipi olan eksenel giriş tasarımısal olarak kazanın yapısına uymadığı için DAY kazanlarda birincil ayırma elemanı olarak kullanılmamaktadır. Fakat U-profil kullanılan kazanlarda ikinci ayırıştırma için kullanılan ÇSTT'ler eksenel girişli siklonlardan oluşmaktadır.



Şekil 2.4: a) Teğetsel girişli siklon, b) Spiral girişli siklon.

Siklonlar soğutmalı ve soğutmasız (sıcak) siklonlar olarak da ikiye ayrılabilir. Soğutmalı siklonlar da kendi içerisinde su ve buhar soğutmalı siklonlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Soğutmalı siklon ve üzerindeki soğutma borularının dizilimi Şekil 2.5'te görölmektedir. Soğutmasız siklonun avantajları yapısal olarak basit olması ve maliyetinin düşük olmasıdır. Dezavantajları ise ısı kaybı, yüksek refrakter bakım maliyeti, ısıl gerilme dengeleme ihtiyacının daha yüksek olması, kazanı devreye

alma süresinin daha uzun olmasıdır. Soğutmalı siklonların avantajları ise daha az ısı kaybı, hacim olarak daha küçük olmaları, bakım maliyetlerinin düşük olması, ısıl gerilme dengeleme ihtiyacının daha düşük olması ve kazanı devreye alma süresinin daha kısa olmasıdır. Soğutmalı siklonlar aynı zamanda kazan ısıtma yüzeyinin bir parçası da olabilmektedir [28].



Şekil 2.5: Soğutmalı siklonun genel görünüşü.

Siklonların performansına etki eden parametreler aşağıdaki şekilde sınıflandırılıp listelenebilir [29], [30], [31]:

- Siklon boyutları
 - Siklon çapı
 - Giriş yüksekliği
 - Giriş genişliği
 - Girdap bulucu çapı
 - Girdap bulucu yüksekliği
 - Silindirik bölge yüksekliği
 - Silindir toplam yüksekliği

- Katı çıkış ağzı çapı
- Parçacık özellikleri
 - Yoğunluk
 - Şekil
 - Çap ve dağılımı
 - Katı yükü
- Gaz özellikleri
 - Hız
 - Yoğunluk
 - Viskozite
- Diğer faktörler
 - Duvar pürüzlülüğü
 - Girdap bulucunun şekli
 - Girdap bulucunun konumu
 - Siklon girişinin açısı

İlerleyen bölümlerde aktarılmış olan siklon performansını hesaplamaya yönelik modeller henüz yukarıda listelenen parametrelerin hepsinin etkilerini değerlendirememektedir [31], [16].

2.2. Matematiksel Modeller

Siklonların performansını hesaplamak amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. Bunları başlıca klasik yaklaşım ve VDI-yaklaşımı olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Her iki yaklaşım ile ilgili yapılan çalışmalar genelde basınç kaybından çok siklonların verimi üzerine odaklanmıştır.

2.2.1. Klasik Yaklaşım

Bu yöntem birçok kişi tarafından üzerinde çalışılmış ve çalışılmakta olan modeldir. Üzerinde farklı geliştirilmeler yapılmış olmakla birlikte, temeli 1950 yılında Lapple [32] tarafından atılmıştır. Metodun temelini kesme çapı hesabı oluşturmaktadır. Siklon tarafından %50 oranda tutulan parçacıkların çapı kesme çapını ifade etmektedir. Lapple'ın kesme çapı hesabı için kullandığı formül Barth

tarafından 1956 yılında modifiye etmiştir [33]. Leith ve Licht 1972 yılında yayınladıkları makalede tüm parçacık çapları için ayırma verimlerini modellemeye çalışmışlardır [34]. Ayırma verimi siklona giren katı parçacıkların gazdan ayrılma oranını ifade etmektedir.

Leith ve Licht modeli popülerliğine rağmen doğruluğu tartışmalıdır. 1991 yılında bu modelin çıkartılmasındaki hata ile ilgili bir makale yayınlanmıştır [35]. Bahsi geçen modeller için kesme çapı ve verim formüllerine bakıldığında önceki kısımda bahsedilen siklon verimini etkileyen birçok parametrenin göz önüne alınmadığı görülmektedir (Tablo 2.3). Örnek olarak Lapple modeli incelendiğinde kesme çapının (d_{50}) siklon geometrisindeki boyutlardan sadece giriş genişliğine (b) bağlı olduğu görülmektedir. Kesme çapı, Barth modelinde ise sadece gaz çıkış çapına (D_e) bağlıdır. Her üç modelde de gazın viskozitesi (μ_g) dahil edilmiştir. Lapple ve Barth modellerinde gaz yoğunluğu da (ρ_g) modele dahil edilmiştir. Leith ve Licht modelinde ihmal edilmesinin sebebi ise gaz yoğunluğunun, katı yoğunluğuna (ρ_k) göre çok düşük olmasıdır.

Tablo 2.1: Farklı modeller için kesme çapı ve verim formülleri.

Referans	Denklem	No
Lapple	$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu_g b}{\pi N_s v_e (\rho_k - \rho_g)}}$	(2.1)
Barth	$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu_g D_e v_{re}}{v_{tw}^2 (\rho_k - \rho_g)}}$	(2.2)
Leith ve Licht	$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{\rho_k}{9\mu_g} \left(\frac{2d_p v_e}{D}\right)^2 \frac{V}{\dot{V}}\right]$	(2.3)

Basu ve Zhang 2004 yılında yayınladıkları makalede DAY kazan siklon veriminin hesaplanması üzerine yaptıkları çalışmaları aktarmışlardır. Yapılan çalışmada DAY kazanın soğuk modeli kurularak, elde edilen deneysel veriler kullanılarak siklon verimi hesaplanmıştır [18]. Siklon geometrisinin verim üzerindeki etkisi de önceki modellerden daha detaylı olarak hesaba dahil edilmiştir. Fakat

modern DAY kazan siklonlarında kullanılan açılı siklon girişi ve eş eksenli olmayan girdap bulucunun verim üzerindeki etkisi hesaba dahil edilmemiştir.

Wang'ın 2004 yılında yaptığı çalışmada Lapple'ın kesme çapı denklemindeki parametrelerden biri olan efektif spiral sayısı farklı siklon geometrileri için değerlendirilmiştir [19]. Bu çalışmada Lapple'ın geliştirdiği efektif spiral sayısı formülünün Lapple'ın çalışmalarında kullandığı siklon tipi için doğru sonuç verdiği farklı siklonlarda doğru sonuç vermediği görülmektedir (Tablo 2.2).

Lapple'ın çalışmalarında kullandığı siklon tipi (2D2D siklonlar), siklon silindir yüksekliğinin (h) ve siklon konik bölge yüksekliğinin ($H - h$) siklon çapına (D) oranının 2 olduğu siklonlardır. 1D3D siklonlar ise siklon silindir yüksekliğinin siklon çapına oranının 1 ve siklon konik bölge yüksekliğinin siklon çapına oranının 3 olduğu siklonlardır.

Tablo 2.2: Efektif spiral sayısı (N_s).

Model	Lapple formülü	Ölçülen
2D2D	6	6
1D3D	5	6
1D3D – dar siklon girişi	2,5	6

Ayrıca bu metotla ilgili yayınlanan birçok makalede Lapple'ın kesme çapı hesabında kullandığı formülün doğruluğu tartışılmıştır ve diğer metotlarla karşılaştırılmıştır. 2008 yılında yayınlanan bir makalede ticari uygulamada olan bir DAY kazanın siklon performansı değerlendirilmiştir [26]. Makalede bulunan kesme çapları Tablo 2.3'te verilmiştir. Üç farklı gaz debisinde yapılan hesap ve ölçümlerde Lapple modeli DAY kazan siklonu için kesme çapını Barth modelinden iyi modellemiştir. Leith ve Licht modeli ise kesme çapı değerlerini ölçülen değerlerden daha küçük bulmuştur.

Aynı çalışmada literatürdeki siklon basınç düşümü ile ilgili korelasyonlar da incelenmiş ve DAY kazan siklonlarını modellemede yetersiz oldukları aktarılmıştır [26]. Bu çalışmada matematiksel modellerdeki basınç kaybının aşağıdaki denklem ile ifade edildiği aktarılmaktadır. Direnç katsayısı (ξ_c) için literatürde kullanılan korelasyonlar Tablo 2.4'te verilmiştir.

$$\Delta P = \xi_c \frac{\rho_g v_e^2}{2} \quad (2.4)$$

Tablo 2.3: Bir DAY kazan siklonu için kesme çapı değerleri.

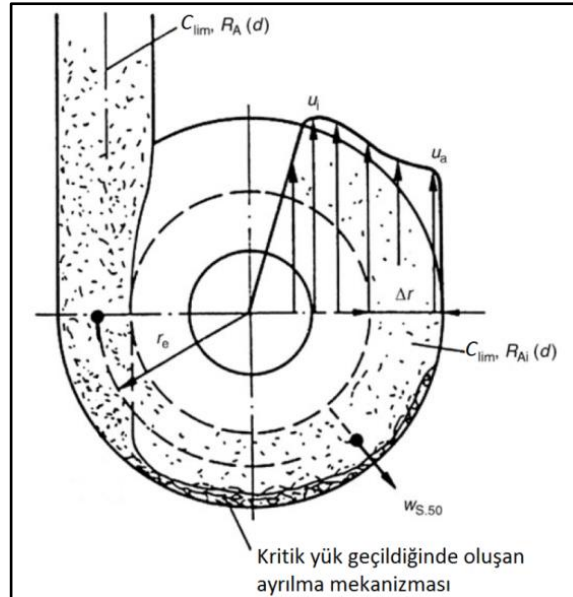
Model	1	2	3
$\dot{V}$ (m ³ /s)	24,9	35,3	43,79
Leith ve Licht (mikrometre)	8,2	7,0	6,1
Lapple (mikrometre)	34,1	28,6	31,2
Barth (mikrometre)	42,3	35,4	31,9
Ölçülen (mikrometre)	18,5	16,5	13,5

Tablo 2.4: Siklon basınç kaybı korelasyonları (sadece gaz akışı durumunda).

Model	Denklem	Notlar	No
Shepherd Lapple (1939)	$\xi_c = \frac{16ab}{D_e^2}$	Teğetsel giriş, NŞA	(2.5)
Barth (1956)	$\xi_c = \left(\frac{ab}{\pi D_e^2/4} \right)^2 (\xi_b + \xi_e)$		(2.6)
	$\xi_b = \frac{D_e}{D} \left(\frac{1}{\left((v_c/u_i) - ((H-S)/D_e) \right)^2} - \left(\frac{u_i}{v_c} \right)^2 \right)$	$3,41 < K < 4,4$	(2.7)
	$\xi_e = K \left(\frac{u_i}{v_c} \right)^{3/4} + \left(\frac{u_i}{v_c} \right)^2$		(2.8)
Muschelknautz Kambrock (1970)	$\xi_c = \frac{ab}{\pi D_e^2/4} (\xi_b + \xi_e)$	Teğetsel ve spiral giriş,	(2.9)
	$\xi_b = \lambda_s \frac{A_R}{0,9\dot{V}} \frac{\rho_g}{2} (u_a u_i)^{3/2}$	Akış alanı Barth	(2.10)
	$\xi_e = 2 + 3 \left(\frac{u_i}{v_c} \right)^{4/3} + \left(\frac{u_i}{v_c} \right)^2$	Modeli'ne dayalıdır	(2.11)

2.2.2. VDI Yaklaşımı

Bu yöntem Alman Mühendisler Derneği'nin (VDI-Association of German Engineers) VDI-Heat Atlas adı ile çıkardığı kitapta sunulan siklon verimini hesaplama yöntemidir [5]. Başka kaynaklarda Muschelknautz metodu olarak da adlandırılmaktadır [31], [16]. Bu yöntemde siklonlardaki iki ayrılma mekanizması için ayrı hesaplar yapılır. Birinci ayrılma mekanizması siklon yükü sınır yükü (C_{lim}) geçtiğinde gazın parçacıkları taşıyamaması sonucu parçacıkların siklon duvarında yoğunlaşarak ayrılmasıdır (Şekil 2.6). VDI metodunda siklon yükü siklona giren katıların kütsel debisinin gaz debisine oranı olarak tanımlanmaktadır. İkinci ayrılma mekanizması ise birinci ayrılma mekanizması ile ayrılamayan parçacıkların siklon duvarına değmeden gaz içinde dairesel hareket ederek ayrılmasıdır. İkincil ayrılma mekanizması için yapılan hesaplar klasik yaklaşıma benzer şekilde yapılmaktadır ve Barth modelinin Muschelknautz tarafından geliştirilmiş halidir [16]. Bu modelde (ikinci ayrılma mekanizması için) önce kesme çapı klasik yaklaşımdan farklı bir formül ile hesaplanmaktadır. Sonra bulunan kesme çapı kullanılarak farklı çaplardaki parçacıkların hangi oranda ayrıldıkları ve toplam ayrılma verimi hesaplanmaktadır.



Şekil 2.6: Siklon sınır yük değerinin geçilmesi ile oluşan ayrılma.

Bu metot incelenen DAY kazanın dokümanlarında ve bazı çalışmalarda referans olarak gösterilmekle beraber, literatürde bu metotla ilgili az sayıda bilimsel

çalışma ve makale vardır. Bu çalışmalardan birisinde Muschelknautz yöntemi üzerinde geliştirilme yapıldığı aktarılmaktadır [36]. Çalışmada geliştirilmiş Muschelknautz yöntemi ve HAD ile bulunan sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır ve HAD sonuçlarının geliştirilmiş Muschelknautz metoduna oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu modele değinilen bir diğer çalışmada bir önceki bölümde de aktarılan bir çalışmadır [26]. Bu çalışmada Muschelknautz modelinin kesme çapı değerlerini klasik yaklaşımdan daha doğru hesapladığı ancak siklon basınç kaybını yanlış hesapladığı aktarılmıştır.

2.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği mühendisliğin birçok alanında olduğu gibi siklonların modellenmesinde de kullanılmaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği akışkanlar mekaniği ile ilgili diferansiyel denklemleri genelde sonlu hacimler, sonlu farklar, spektral yöntemler gibi sayısal metotlarla çözen bir mühendislik aracıdır.

Temel akışkanlar dinamiği denklemleri Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinen süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir. Bu denklemler sırasıyla (2.12), (2.13) ve (2.14)'deki gibi yazılabilir [31].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho H u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial(\tau_{ij} u_j - q_i)}{\partial x_i} \quad (2.14)$$

HAD ile siklonların modellenmesi konusunda ilk çalışmalar 1983 yılında Boysan ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [37]. Yapılan ilk çalışmalarda sadece gazın akışı modellenmiştir ve k-ε türbülans modelinin yeterli olmadığı görülmüştür.

Siklonların modellenmesinde kullanılan türbülans modelleri ilerleyen bölümlerde incelenmiştir.

Katı parçacıkların modellenmesinde öncü çalışmalardan biri yine Boysan ve arkadaşları tarafından 1995 yılında yapılan çalışmadır. Bu çalışmada gaz akışının RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılarak başarılı bir şekilde modellendiği aktarılmaktadır [21].

Yüksek katı yüküne sahip siklonların modellenmesi ile ilgili çalışmalar 2000’li yıllardan sonra bilgisayar teknolojisinin ve HAD yöntemlerinin ilerlemesi ile yaygınlık kazanmıştır [20], [38], [39].

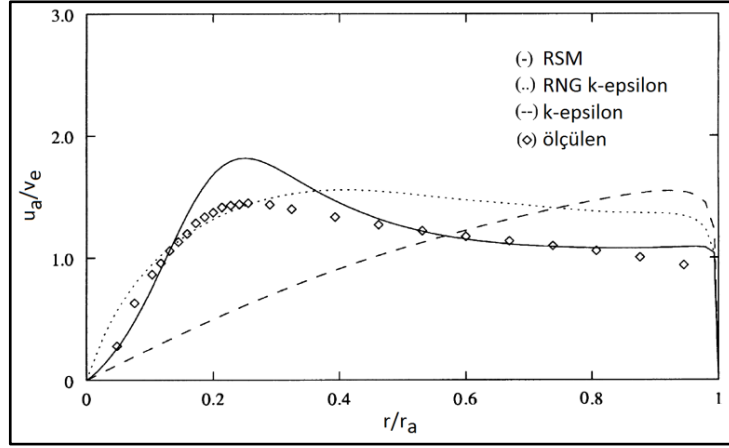
İlerleyen bölümlerde literatürdeki siklonların HAD ile modellenmesinde kullanılan teori, türbülans modelleri ve ikincil fazın modellenmesinde kullanılan modeller hakkında bilgi verilmiştir.

2.3.1. Türbülans Modelleri

Hesaplama akışkanlar dinamiği geliştikçe birçok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu modellerden başlıcaları (standart) k-epsilon modeli, Reynolds Stress Modeli (RSM), ve LES modelleridir.

Siklonların modellenmesinde hangi modelin daha iyi olduğu da yapılan bilimsel çalışmalarda incelenmiştir. Siklonlarda k-epsilon ve türevi türbülans modellerinin deneysel verilerle karşılaştırıldığında yetersiz olduğu birçok çalışmada ortaya konulmuştur [40], [41], [42].

Bu konuda yapılan çalışmalardan birisinde RSM’nin teğetsel hız değerlerini k-epsilon ve RNG k-epsilon modellerinden daha iyi hesapladığı aktarılmaktadır [16]. Yapılan bu çalışmadan alınan grafik Şekil 2.7’de görülmektedir. Grafikte apsis siklon içerisindeki radyal konumun siklon yarıçapına bölünerek boyutsuz hale getirilmiş şeklini, ordinat ise teğetsel hızın siklon giriş hızına bölünerek boyutsuz hale getirilmiş şeklini ifade etmektedir. Aynı çalışmada RNG k-epsilon modeli ile siklon basınç kaybının da deneysel verilere yakın olarak hesaplandığı aktarılmaktadır. Fakat bu sonuçlar siklonun içerisinde tek fazlı akış olduğu durum için verilmiştir. Çalışmada siklonların çift fazlı modellenmesine değinilmekle beraber net sonuçlar aktarılmamıştır ve yüksek yükte çalışan siklonları modellemenin henüz tamamlanmadığı ama gelişmekte olduğu aktarılmıştır.



Şekil 2.7: Türbülans modellerinin deney verileri ile karşılaştırılması.

Diğer bir çalışmada RSM ile bulunan sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve HAD sonuçlarının iyi sonuç verdiği belirtilmiştir [43]. Bu çalışmada RSM kullanılarak siklon içerisindeki basınç profillerinin başarılı bir şekilde modellendiği belirtilmiştir. Çalışmada siklon yükü düşük olduğu için (%3-5) ikinci faz ihmal edilmiştir.

Bir başka çalışmada RSM ile LES modeli karşılaştırılmış. LES modelinin RSM'den biraz daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [44]. Bu çalışmada da sadece gaz faz modellenmiştir ve siklon içerisindeki hız profilleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Basınç kaybı ile ilgili sonuçlar aktarılmamıştır.

2.3.2. İki Fazlı Akış Modelleri

İki fazlı akışların özellikle ikinci fazın oranının yüksek olduğu akışların modellenmesi henüz tam olarak anlaşılamamıştır [20]. İki fazlı akışları modellemede yaygın olarak kullanılan iki model bulunmaktadır [38]. Bunlar Euler-Euler ve Euler-Lagrange modelleridir.

Euler-Euler modelinde her iki faz akışkan gibi kabul edilerek her iki faz içinde Navier-Stokes denklemleri ve fazların birbirlerine olan etkileşimleri zamana bağlı olarak çözülür. Bu model zamana bağlı çözüm yapması, çok fazla denklem çözmesi ve sistemi tamamıyla modellemeyi (genelde DAY kazanın tamamı modellenmektedir) gerektirdiği için bilgisayara çok fazla yük getirmektedir [7], [45]. Ayrıca, siklonların modellenmesinde çok önemli olan farklı parçacık çapları ayrı birer faz olarak tanımlandığı için çözülmesi gereken denklem sayısı her bir parçacık çapı için katlanarak artmaktadır. Örnek olarak 13 farklı parçacık çapı kullanılarak

yapılan 2 boyutlu bir analizde bir iterasyonun süresi 1 saati bulmaktadır. Zamana bağlı çözüm yapıldığı için binlerce iterasyon yapılması gerektiği göz önüne alındığında çözüm süresi haftalar ve aylar mertebesinde bulmaktadır. Bu sebeple bu model kullanılarak yapılan çalışmalarda genelde tek parçacık çapı kullanılmakta ve ağdaki hücre sayısı düşük tutulmaya çalışılmaktadır. Literatürde bu model ile siklonların modellenmesi ile ilgili çok az çalışma vardır. Bunlardan birisi Swain ve Monathy'nin 2013 yılında yaptıkları çalışmadır [46]. Bu çalışmada katı parçacıklar iki farklı çap yani iki farklı faz olarak modellenmiştir ve bunun gerekçesi yukarıda açıklandığı gibi artan parçacık çapı sayısının getirdiği hesaplama yükü olarak belirtilmiştir. Yine hesaplama yükünün fazlalığından dolayı ağdaki hücre sayısının düşük tutulduğu belirtilmiştir.

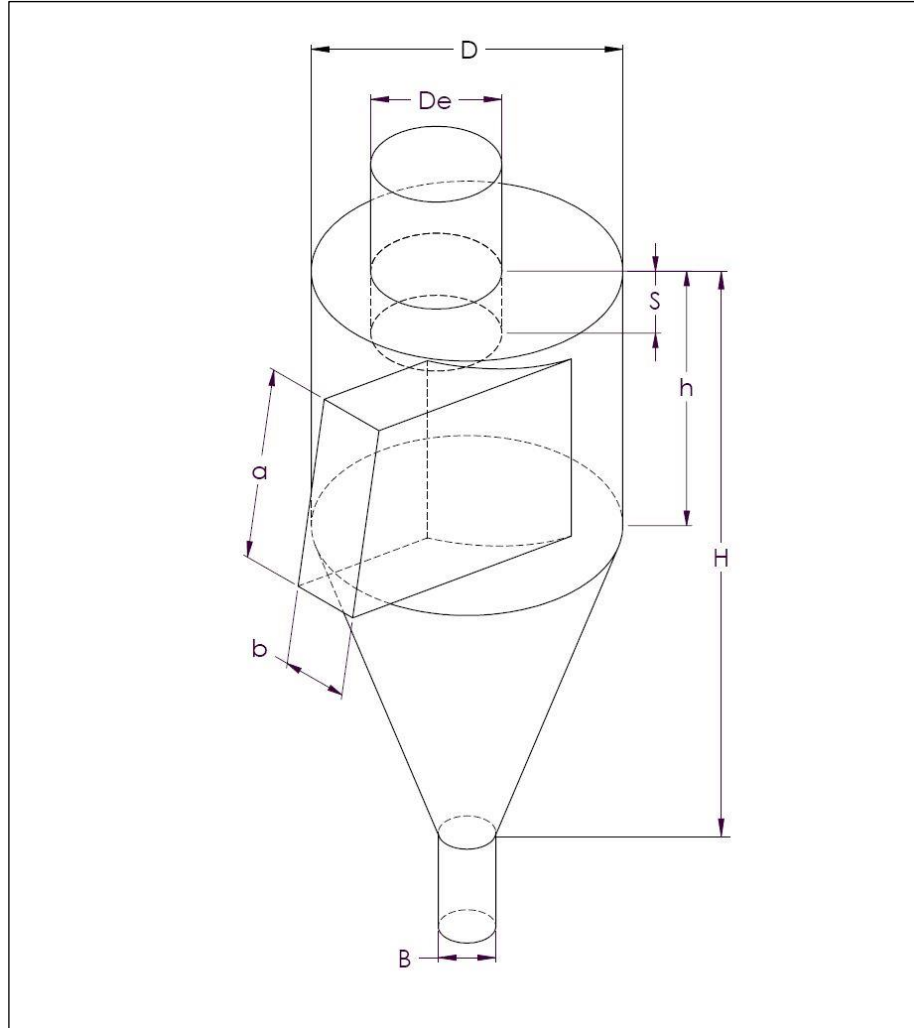
Euler-Lagrange modeli ise birinci faz için Navier-Stokes ve türbülans modeli denklemlerini çözüp ikinci faz için sadece birinci faz içindeki hareket denklemlerini çözmektedir. Bu model çözüm süresi olarak avantajlı olmakla beraber, düşük yükteki akışları çözümlerken daha doğru sonuçlar vermektedir. Yük artıp ikinci faz birinci fazın akışını etkilemeye başladığında çözümün doğruluğu azalmaktadır.

Euler-Lagrange modeli kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır [21], [16], [43]. Bu çalışmaların ortak yanı yukarıda da açıklandığı gibi düşük yükte çalışan siklonlar üzerinde çalışılmış olmasıdır. Örnek olarak, 2011 yılında yapılan kompakt bir siklonu modellemeye yönelik çalışmada katı yükü $8,8 \text{ g katı/m}^3$ gaz olarak verilmiştir [47]. Bu çalışmalarda siklonların HAD ile hesaplanan kesme çapları ile deneysel olarak bulunan kesme çapı değerleri karşılaştırılmış, farklı çaptaki parçacıkların siklon içerisinde izlediği yörüngeler hesaplanmıştır.

3. HESAPLAMALAR ve ANALİZLER

Klasik yaklaşım, VDI yaklaşımı ve HAD analizlerinde kullanılan formüller ile yapılan hesaplamalar bu bölümde aktarılmaktadır.

Modellenen siklonun çizimi ve hesaplamalarda kullanılan boyutsal parametreler Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Modellenen siklonun boyutsal parametreleri.

Modellenen siklona ait ve Şekil 3.1’de tanımlanan parametrelerin değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Buradan anlaşıldığı gibi incelenen siklonun silindirik bölge yüksekliği çapına eşittir. Konik bölge yüksekliği ise silindir çapından büyüktür.

Tablo 3.1: Siklon boyutları.

Parametre	Ölçüsü (m)
a	3,98
b	1,44
S	1,415
h	5,8
H	12,8
D	5,8
D_e	2,44
B	1,07

Ayrıca, hesaplamalarda kullanılan gaz hacimsel debisi, katı debisi vb. bilgiler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Hesaplamalarda kullanılan genel bilgiler.

Parametre	Değer	Birim
$\dot{V}$	145,4	m^3/s
C_e	5,64	kg/m^3
μ_g	$5,64 \times 10^{-5}$	Pa/s
$\dot{m}_{siklon}$	261,516	kg/s
$\dot{m}_{kaçan}$	3	kg/s
ρ_g	0,311	kg/m^3
ρ_k	2223	kg/m^3

Hesaplamalarda kullanılan bir diğer önemli veri ise parçacık dağılımıdır. Santraldan temin edilen numunelerin parçacık çap dağılımı analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 3.3’te görülmektedir.

Tablo 3.3: Parçacık çap dağılımı.

Boyut (mikrometre)	Oran (%)
5	22,33
20	16,92
46	8,00
78	7,22
131	3,91
241	4,61
378	18,52
514	5,41
590	4,78
678	3,78
778	2,62
893	1,47
1026	0,42

Verilen değerleri kullanarak siklonun mevcut verimi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır ve siklon verimi %98,85 olarak bulunmuştur.

$$\eta_{ayırma} = \frac{\dot{m}_{siklon} - \dot{m}_{kaçan}}{\dot{m}_{siklon}} \quad (3.1)$$

$$\eta_{ayırma} = \frac{261,516 - 3}{261,516} = 98,85 \% \quad (3.2)$$

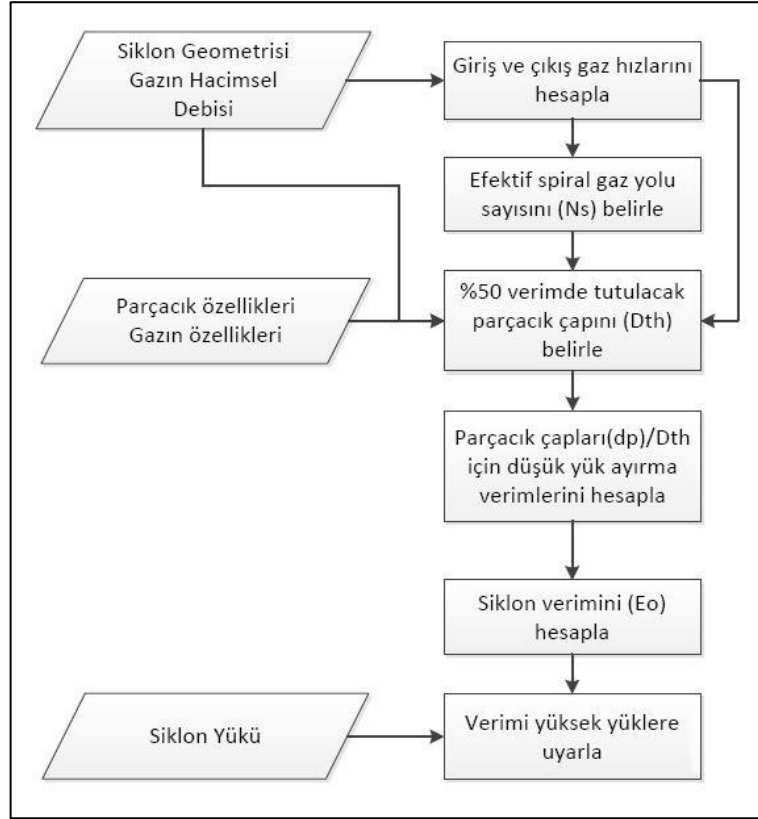
Bu değer benzer özellikte kömür yakan Güney Kore'deki büyük ölçekli bir santral ile karşılaştırılmıştır. Güney Kore'deki santralin siklonları için verim değeri %98,7 olarak verilmektedir [27].

3.1. Klasik Yaklaşım

3.1.1. Ayırma Verimi

Birinci ayırma mekanizması için verim formülü (3.34)'te verilmiştir. Buradan anlaşılacağı gibi sınır yükün üzerindeki bütün yükün ayrıldığı kabul edilmektedir.

Klasik yaklaşım kullanılarak siklon performansı hesaplanırken öncelikle literatürden faydalanılarak Şekil 3.2'deki sistematik çıkarılarak siklonun katıları ayırma verimi hesaplanmıştır [5], [30], [48]. Bölümün son kısmında ise siklonun basınç kaybı hesaplanmıştır.



Şekil 3.2: Siklon tasarım sistematığı.

Siklon tasarım sürecinde ilk aşama Şekil 3.2'de görüldüğü gibi giriş ve çıkış gaz hızlarının hesaplanmasıdır. Siklon girişindeki gaz hızını bulmak için gaz debisi siklon giriş alanına (A_i) bölünmüştür.

$$v_e = \frac{\dot{V}}{A_i} \quad (3.3)$$

$$v_e = \frac{145,4}{3,98 \times 1,44} = \frac{145,4}{5,73} = 25,37 \text{ m/s} \quad (3.4)$$

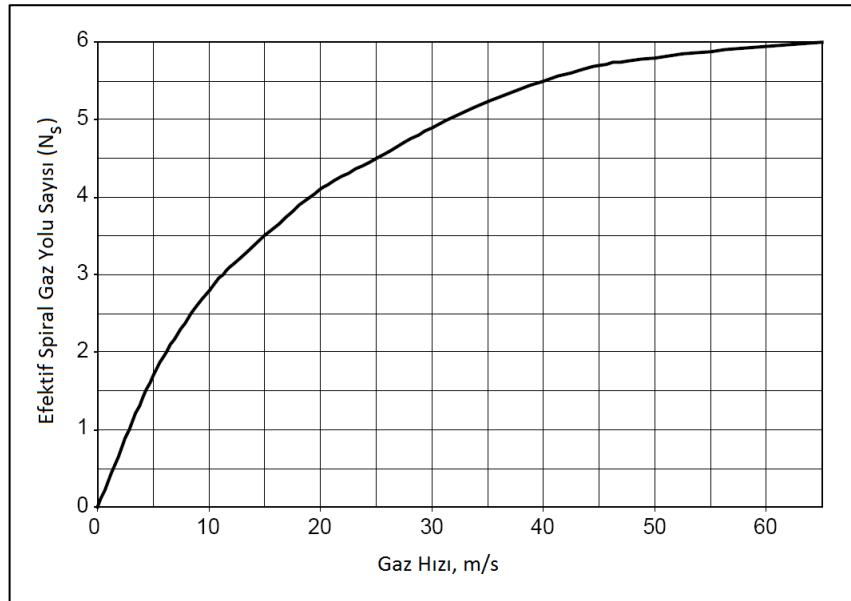
Yukarıdaki hesapta siklon giriş alanı giriş genişliği ($b = 1,44 \text{ m}$) ile giriş yüksekliğinin ($a = 3,98 \text{ m}$) çarpılması ile elde edilmiştir.

Siklon çıkışındaki gaz hızı ise gaz debisi siklon çıkış alanına (A_c) bölünerek hesaplanmıştır.

$$v_c = \frac{\dot{V}}{A_c} \quad (3.5)$$

$$v_c = \frac{145,4}{\pi \times \left(\frac{2,44}{2}\right)^2} = 31,095 \text{ m/s} \quad (3.6)$$

Bulunan değerler karşılaştırıldığında siklon çıkışında gaz hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla efektif spiral gaz yolu sayısı (N_s) grafikten okunurken siklon çıkışındaki gaz hızı kullanılır. Efektif spiral gaz yolu sayısı Şekil 3.3'ten 4,95 olarak okunmuştur.



Şekil 3.3: Efektif spiral gaz yolu sayısı.

Efektif spiral gaz yolu sayısı kesme çapı hesabında kullanılır. Kesme çapı hesabında kullanılan Lapple formülü ve yapılan kesme çapı hesabı aşağıda verilmiştir [30].

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu_g b}{\pi N_s v_e (\rho_k - \rho_g)}} \quad (3.7)$$

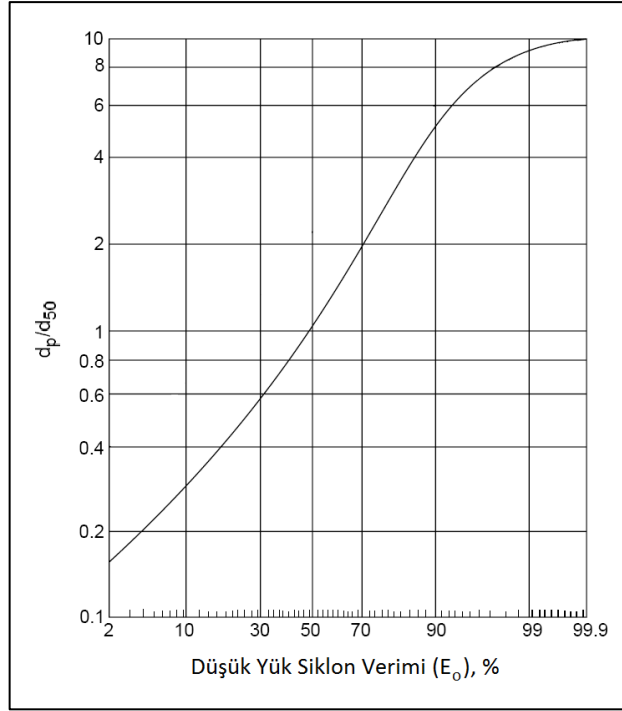
$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \times 4,4 \times 10^{-5} \times 1,44}{3,14 \times 4,95 \times 25,37 \times (2223 - 0,311)}} \quad (3.8)$$

$$d_{50} = 25,50 \times 10^{-6} m = 25,50 \text{ mikrometre} \quad (3.9)$$

Bulunan kesme çapı değeri (d_{50}) farklı çaplardaki parçaların düşük yük ayırma verimlerinin hesaplanmasında kullanılır. Bu işlem için önce parçacık çapları kesme çapına bölünür. Bu değerler Tablo 3.4'te verilmiştir. Sonrasında Şekil 3.4'te verilen grafikten düşük yük ayırma verimleri bulunur [48]. Düşük yük ayırma verimleri (E_o) için grafikten okunan değerler Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Parçacık çaplarının kesme çapına oranı.

Parçacık Çapı (d_p) (mikrometre)	d_p/d_{50}
5	0,19
20	0,77
46	1,79
78	3,06
131	5,12
241	9,45
378	14,83
514	20,16
590	23,15
678	26,58
778	30,51
893	35,03
1026	40,22



Şekil 3.4: Düşük yük ayırma verimi grafiği.

Tablo 3.5: Parçacık çapları için düşük yük ayırma verimleri.

d_p/d_{50}	E_o (%)
0,20	4
0,77	38
1,82	68
3,09	80
5,19	91
9,57	99,7
15,02	100
20,41	100
23,44	100
26,91	100
30,90	100
35,48	100
40,73	100

Belirli bir çaptaki parçacıkların düşük yükte ayrılma debisi, siklona giren toplam katı debisinin $\dot{m}_{siklon}$ ile Tablo 3.3'ten okunan parçacık oranı çarpılarak hesaplanılan ilgili çaptaki parçacıkların kütleli debisi, Tablo 3.5'ten okunan düşük

yük ayırma verimi (E_o) ile çarpılarak hesaplanır. 5 mikrometre çapındaki parçalar için hesap aşağıda verilmiştir. Diğer parçaların sonuçları ise Tablo 3.6'da verilmiştir.

$$\dot{m}_{5 \text{ mikron}} = \dot{m}_{siklon} \times (5 \text{ mikrometre çaplı parçacıkların oranı}) \quad (3.10)$$

$$58,40 \text{ kg/s} = 261,516 \times 22,33\% \quad (3.11)$$

Bu işlem ile siklona giren toplam katı debisi, 5 mikrometre çaplı parçacıkların oranı ile çarpılarak siklona giren 5 mikrometre çapındaki parçacıkların debisi bulunmuştur. Bu parçacıkların ayrılma debisi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{5 \text{ mikron, ayrılan}} = \dot{m}_{5 \text{ mikron}} \times (5 \text{ mikrometre çaplı parçacıkların ayrılma verimi}) \quad (3.12)$$

$$2,336 \text{ kg/s} = 58,40 \times \%4 \quad (3.13)$$

Tablo 3.6. Parçacık çapları için ayrılma debileri.

Parçacık Çapı (d_p) (mikrometre)	Ayrılma Debisi ($\dot{m}_a$) (kg/s)
5	2,336
20	16,817
46	14,224
78	15,111
131	9,302
241	12,016
378	48,429
514	14,155
590	12,508
678	9,897
778	6,848
893	3,833
1026	1,110
Toplam	166,585

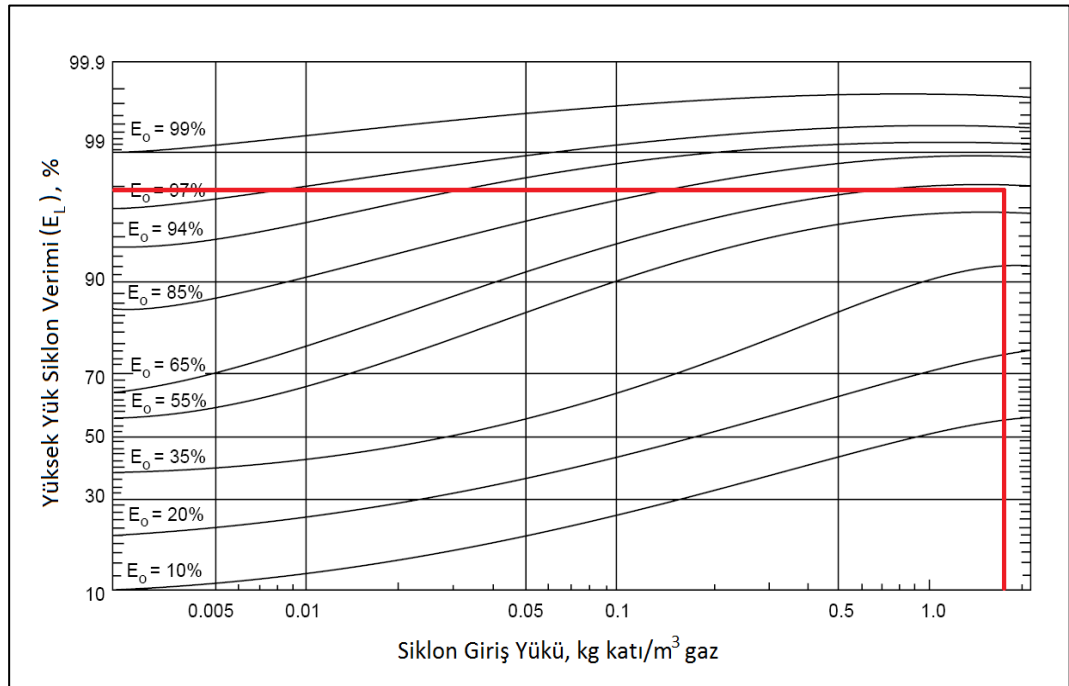
Toplam ayrılma debisinin siklon girişı katı debisine bölünmesi ile siklonun düşük yük ayırma verimi aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$E_{o,top} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{siklon}} \quad (3.14)$$

$$63,70\% = \frac{166,585}{261,516} \quad (3.15)$$

Düşük yükte %63,70 olarak bulunan siklon veriminin yüksek yüklere uyarlanması için Şekil 3.5'teki grafik kullanılmıştır [48]. Burada siklon girişı yükü hesabı aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

$$\text{Siklon Giriş Yüğü (L)} = \frac{\dot{m}_{siklon}}{\dot{V}} = \frac{261,516}{145,4} = 1,80 \text{ kg/m}^3 \quad (3.16)$$



Şekil 3.5: Yüksek yük siklon verimi grafiği.

Bulunan siklon giriş yükü ve düşük yük siklon verimi kullanılarak grafikten yüksek yük verimi okunduğunda siklon veriminin %98'in biraz altında olduğu görülmektedir.

3.1.2. Basınç Kaybı

Klasik yaklaşımda basınç kaybı farklı mekanizmalar sonucu oluşan basınç kaybının toplamı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca siklon yüküne göre bir düzeltme yapılmaktadır. Bu mekanizmalar aşağıda listelenmiştir:

- Siklon girişi daralma basınç kaybı,
- Parçacıkların hızlanmasından kaynaklı basınç kaybı,
- Sürtünme kaynaklı basınç kaybı,
- Gazın yön değiştirmesinden kaynaklı basınç kaybı,
- Siklon çıkışı daralma basınç kaybıdır.

Yukarıdaki birinci mekanizma, geniş olan kazan kesitinden dar olan siklon kesitine giriş yapan havanın basıncının düşmesidir ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

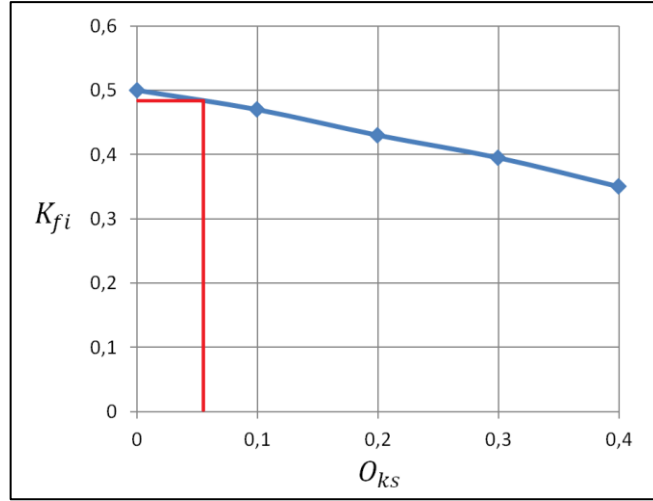
$$\Delta P_{f(i-g)} = 0,5\rho_g(v_e^2 - v_f^2 + K_{fi}v_e^2) \quad (3.17)$$

Formüldeki siklon giriş hızı (v_e) bir önceki bölümde 25,37 m/s olarak hesaplanmıştır. Kazandaki gaz hızı (v_f) ise 4 adet siklona giren gaz debisinin ($\dot{V}$) kazan alanına (98 m^2) bölümü ile 5,9 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu hesap aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

$$v_f = \frac{4 \times 145,4}{98} = 5,9 \text{ m/s} \quad (3.18)$$

Siklon girişi daralma katsayısı (K_{fi}) ise Şekil 3.6'da verilen grafikten 0,48 olarak okunmuştur. Grafikte " O_{ks} " ifadesi siklon giriş alanının (A_i) kazan alanına oranıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$O_{ks} = \frac{5,73}{98} = 0,06 \quad (3.19)$$



Şekil 3.6: Siklon girişi daralma katsayısı.

Elde edilen parametreleri (3.17)'de verilen denklemde yerine koyduğumuzda siklon girişi daralma basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{f(i-g)} = 0,5 \times 0,311 \times (25,37^2 - 5,9^2 + 0,48 \times 25,37^2) = 142,86 \text{ Pa} \quad (3.20)$$

İkinci mekanizma, kazandan daha düşük hızda gelen katı parçacıkların siklon girişinde hızlanmasından kaynaklanan basınç kaybıdır. Bu basınç kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. Bu formül yazılırken parçacıkların kazan ve siklon içerisinde gaz hızına eşit hızda hareket ettiği kabul edilmiştir.

$$\Delta P_{(f-i)p} = L v_e (v_e - v_f) \quad (3.21)$$

Formülde katı yükü (L) değeri bir önceki bölümde $1,80 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda parçacıkların hızlanmasından kaynaklı basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{(f-i)p} = 1,80 \times 25,37(25,37 - 5,9) = 886,83 \text{ Pa} \quad (3.22)$$

Üçüncü kayıp mekanizması olan sürtünme kaynaklı basınç kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır. Sürtünme katsayısı 0,005 olarak VDI-Heat Atlas kitabından alınmıştır.

$$\Delta P_{bf} = \frac{2\lambda_0 \rho_g v_e^2 \pi D N_s}{d_{hi}} \quad (3.23)$$

Siklon girişinin hidrolik çapı (d_{hi}) ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$d_{hi} = \frac{4 \times a \times b}{2 \times (a + b)} = \frac{4 \times 3,98 \times 1,44}{2 \times (3,98 + 1,44)} = 2,11m \quad (3.24)$$

Bu durumda sürtünme kaynaklı basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{bf} = \frac{2 \times 0,005 \times 0,311 \times 25,37^2 \times \pi \times 5,8 \times 4,95}{2,11} = 85,37 Pa \quad (3.25)$$

Dördüncü kayıp mekanizması olan gazın yön değiştirmesinden kaynaklı basınç kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\Delta P_r = \frac{\rho_g v_s^2}{2} = \frac{0,311 \times 5,503^2}{2} = 100,08 Pa \quad (3.26)$$

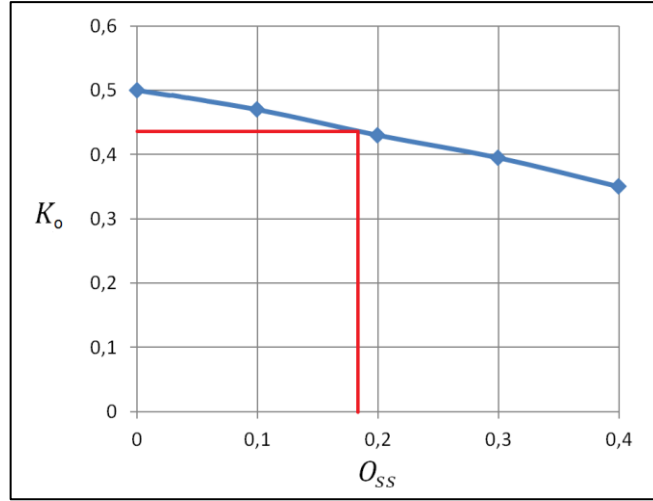
Formülde verilen siklon içi gaz hızı ise siklona giren gazın hacimsel debisinin siklon kesit alanına bölünmesi ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$v_s = \frac{145,4}{\pi \times \left(\frac{5,8}{2}\right)^2} = 5,503 m/s \quad (3.27)$$

Beşinci kayıp mekanizması olan siklon çıkışı daralma kaynaklı basınç kaybı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\Delta P_o = 0,5\rho_g(v_\zeta^2 - v_s^2 + K_o v_\zeta^2) \quad (3.28)$$

Siklon çıkışı daralma katsayısı 0,44 olarak Şekil 3.7’de verilen grafikten okunmuştur.



Şekil 3.7: Siklon çıkışı daralma katsayısı.

Grafikte apsiste verilen “ O_{ss} ” değeri siklon çıkış alanının, siklon kesit alanına oranıdır ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$O_{ss} = \frac{\pi \times \left(\frac{2,44}{2}\right)^2}{\pi \times \left(\frac{5,8}{2}\right)^2} = 0,18 \quad (3.29)$$

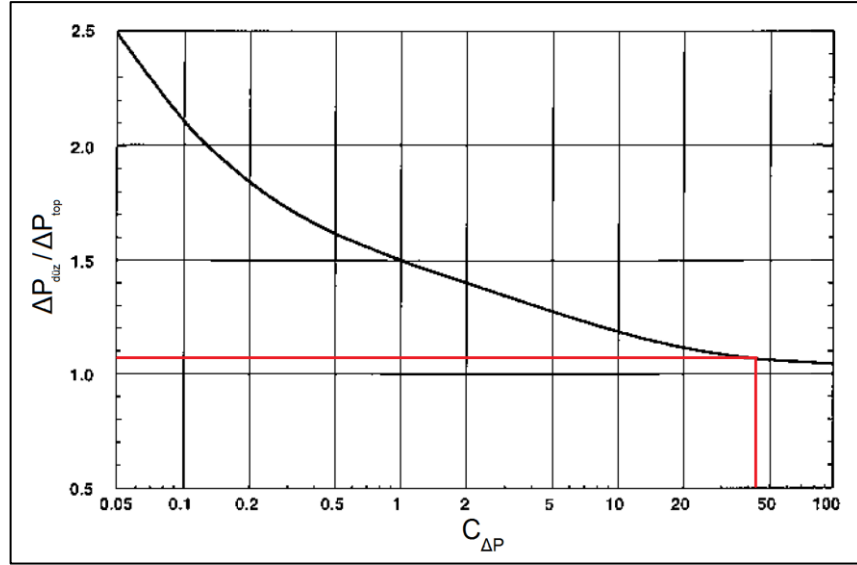
Bu durumda siklondaki toplam basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{top} = \Delta P_{f(i-g)} + \Delta P_{(f-i)p} + \Delta P_{bf} + \Delta P_r + \Delta P_o \quad (3.30)$$

$$\Delta P_{top} = 142,86 + 886,83 + 85,37 + 100,08 + 211,97 = 1427,11 \text{ Pa} \quad (3.31)$$

Bulunan bu değer siklon yüküne göre Şekil 3.8’deki grafikten faydalanılarak düzeltilmelidir. Grafikte apsis değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$C_{\Delta P} = 0,05 + \frac{\dot{m}_{siklon}}{A_i} = 0,05 + \frac{261,516}{5,731} = 45,68 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad (3.32)$$



Şekil 3.8: Siklon basınç kaybı düzeltme katsayısı.

Grafikten düzeltme katsayısı yaklaşık 1,1 olarak okunmuştur. Bu durumda siklonun basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{düz} = 1,1 \times \Delta P_{top} = 1569,82 \text{ Pa} \quad (3.33)$$

3.2. VDI Yaklaşımı

Bu bölümde VDI yöntemi ile incelenen siklonun verim hesabı aktarılmıştır. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi bu yöntemde iki ayrı mekanizma için ayrı ayrı hesaplar yapıp bunların toplamı ile toplam verim bulunmaktadır.

3.2.1. Duvar Ayrımı

Birinci ayrılma mekanizması için verim formülü (3.34)'te verilmiştir. Siklon yükü (C_e) siklona giren 1kg gaz için siklona kaç kg katı girdiğini gösterir. Buradan anlaşılacağı gibi sınır yükün üzerindeki bütün yükün ayrıldığı kabul edilmektedir.

$$\eta_e = 1 - \frac{C_{lim}}{C_e} \quad (3.34)$$

Formülü kullanabilmek için siklon yükünün (C_e) bilinmesi ve sınır yük değerinin (μ_{lim}) hesaplanması gerekmektedir. Siklon yükü (C_e) değeri olan 5,64 kg katı/kg gaz santral dokümanlarından temin edilmiştir. Sınır yük değeri (C_{lim}) ise aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$C_{lim} = K_{lim} \left(\frac{d_e^*}{d_{50,A}} \right) (10C_e)^k \quad (3.35)$$

K_{lim} değeri 0,02 ile 0,03 arasında değişmekle beraber, VDI-Heat Atlas kitabında yüksek yüklü siklonlar için 0,025 olarak verilmiştir [49].

Siklon girişindeki parçacıkların kesme çapı ($d_{50,A}$) ise yapılan analizlerde 73,25 mikrometre olarak ölçülmüştür.

Formüldeki üs değeri (k) ise (3.36)'daki gibi verilmiştir [49]. Buradan siklon yükü (C_e) olan 5,64 kg katı/kg gaz için “ k ” değeri 0,15 olarak bulunmuştur.

$$k = \begin{cases} 0,81; & C_e < 2,2 \times 10^{-5} \\ 0,15 + 0,66e^{-(\mu_e/0,015)^{0,6}}; & 2,2 \times 10^{-5} \leq C_e \leq 0,1 \\ 0,15; & C_e \geq 0,1 \end{cases} \quad (3.36)$$

Bu durumda duvar ayrımı için kesme çapı (d_e^*) hesabı da yapılırsa (3.35)'da verilmiş olan formülü kullanarak sınır yük değeri hesaplanabilir. Duvar ayrımı için kesme çapı hesabı ilerleyen sayfalarda yapılmıştır. Fakat öncesinde hesaplamalarda kullanılmış olan bazı geometrik oranlar ve değerler aktarılmıştır.

Birinci adımda, geometrik oran (β) siklon giriş genişliğinin, siklon yarıçapına bölünmesi ile (3.37)'deki şekilde elde edilmiştir. Siklon yarıçapı, siklon çapının ikiye bölünmesi ile elde edilmiştir.

$$\beta = \frac{b}{r_a} = \frac{1,44}{2,90} = 0,497 \quad (3.37)$$

Bulunan geometrik oran, daralma katsayısının (α) hesaplanmasında kullanılır. Daralma katsayısının formülü ve hesabı (3.38), (3.39) ve (3.40)'de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{1 - \sqrt{1 + 4 \left[\left(\frac{\beta}{2} \right)^2 - \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \sqrt{1 - \frac{1 - \beta^2}{1 + \mu_e}} (2\beta - \beta^2)}}{\beta} \quad (3.38)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sqrt{1 + 4 \left[\left(\frac{0,497}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,497}{2} \right) \right] \sqrt{1 - \frac{1 - 0,497^2}{1 + 5,64}} (2 \times 0,497 - 0,497^2)}}{0,497} \quad (3.39)$$

$$\alpha = 0,937 \quad (3.40)$$

Daralma katsayısı değeri dış teğetsel hız (u_a) hesaplanırken kullanılmaktadır. Dış teğetsel hız hesabı için ayrıca siklon girişi hızı (v_e) ve merkezi akış çizgisi yarıçapı (r_e) hesaplanmalıdır.

Siklon girişi hızı bir önceki bölümde $25,37 \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır. Merkezi akış çizgisi yarıçapının hesabı için kullanılan formül ve yapılan hesap (3.41) ve (3.42)'de verilmiştir.

$$r_e = r_a - \frac{b}{2} \quad (3.41)$$

$$r_e = 2,9 - \frac{1,44}{2} = 2,18 \text{ m} \quad (3.42)$$

Giriş jeti açısal momentumunu siklon dış yarıçapı cinsinden ifade ederek, dış teğetsel hız aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_a = \frac{r_e v_e}{r_a \alpha} \quad (3.43)$$

$$u_a = \frac{2,18 \times 25,37}{2,9 \times 0,937} = 20,3 \text{ m/s} \quad (3.44)$$

Katı gaz karışımı için duvar sürtünme katsayısı (3.45)'te verilen formül ile hesaplanmıştır. Yalnızca gaz ile siklon duvarı arasında olan sürtünme katsayısı (λ_0)

değeri olarak VDI-Heat Atlas kitabında kullanılan 0,005 değeri kullanılmıştır. Bu durumda duvar sürtünme katsayısı için yapılan hesap (3.46)'da verilmiştir.

$$\lambda_s = \lambda_0(1 + 2\sqrt{\mu_e}) \quad (3.45)$$

$$\lambda_s = 0,005(1 + 2\sqrt{5,64}) = 0,0287 \quad (3.46)$$

Son bir parametre olarak bölümün devamında detaylı bahsedilmiş olan ayırma alanının (A_w) son bulduğu noktadaki yarıçap değeri (3.47)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$r_2 = \frac{1}{4}(D + B) = \frac{1}{4}(5,8 + 1,07) = 1,72 \text{ m} \quad (3.47)$$

Duvar ayırımı için kesme çapı (d_e^*) formülü (3.48)'da verilmiştir.

$$d_e^* = \sqrt{w_{s,50} \frac{18\mu_g}{\Delta\rho\bar{z}_e}} \quad (3.48)$$

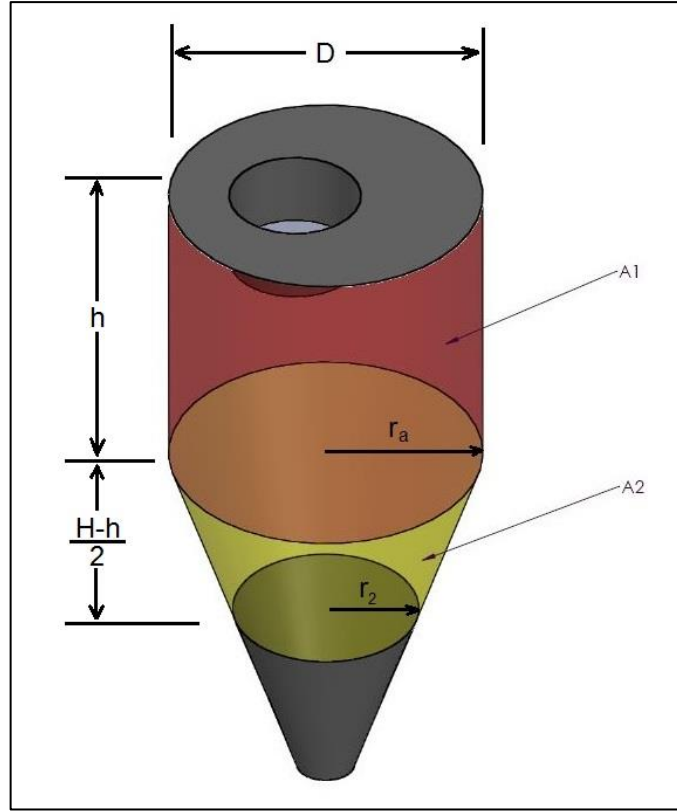
Verilen formülde gazın viskozite değeri (μ_g) bilinmektedir. Yoğunluk farkı ($\Delta\rho$) ise (3.49)'daki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta\rho = \rho_k - \rho_g = 2223 - 0,311 = 2222,7 \text{ kg/m}^3 \quad (3.49)$$

Gazdan %50 oranında ayrılan parçacıklar için çökelme hızı (3.50)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$w_{s,50} = \frac{0,45 \times \dot{V}}{A_w} \quad (3.50)$$

Ayrılma alanı (A_w) ise konik bölgenin yarısına kadar olan siklon yüzey alanıdır. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi 2 bölgeden oluşmaktadır.



Şekil 3.9: Siklon ayırma alanı.

Bu alanlar (3.51), (3.52) ve (3.53)'de ve A_w değeri (3.54)'te hesaplanmıştır.

$$A_1 = \pi \times D \times h = \pi \times 5,8 \times 5,8 = 105,63 \text{ m}^2 \quad (3.51)$$

$$A_2 = \pi(r_a + r_2) \sqrt{\left(\frac{H-h}{2}\right)^2 + (r_a - r_2)^2} \quad (3.52)$$

$$A_2 = \pi \times (2,9 + 1,72) \times \sqrt{3,5^2 + (2,9 - 1,72)^2} = 53,58 \text{ m}^2 \quad (3.53)$$

$$A_w = A_1 + A_2 = 159,275 \text{ m}^2 \quad (3.54)$$

Ayrılma alanı (A_w) kullanılarak (3.50)'de formülü verilen çökelme hızı (3.55)'de hesaplanmıştır.

$$w_{s,50} = \frac{0,45 \times \dot{V}}{A_w} = \frac{0,45 \times 145,4}{159,275} = 0,42 \text{ m/s} \quad (3.55)$$

Tekrar duvar ayrımı için kesme çapı (d_e^*) formülüne (3.48) bakıldığında sadece merkezkaç ivmesinin ($\bar{z}_e$) hesaplanması gerektiği görülmektedir.

Merkezkaç ivmesinin ($\bar{z}_e$) formülü (3.56)'da ve merkezkaç ivmesi hesaplanırken kullanılan u_e , u_2 ve $\bar{r}_z$ formülleri sırasıyla (3.57), (3.58) ve (3.59)'da verilmiştir.

$$\bar{z}_e = \frac{u_e \times u_2}{\bar{r}_z} \quad (3.56)$$

$$u_e = \frac{u_a r_a / r_e}{1 + \frac{\lambda_s}{2} \frac{A_{e1}}{0,9\bar{V}} u_a \sqrt{r_a / r_e}} \quad (3.57)$$

$$u_2 = \frac{u_a r_a / r_2}{1 + \frac{\lambda_s}{2} \frac{A_w}{0,9\bar{V}} u_a \sqrt{r_a / r_2}} \quad (3.58)$$

$$\bar{r}_z = \sqrt{r_e \times r_2} \quad (3.59)$$

Bu bölüm ve bir önceki bölümlerde yukarıdaki formüllerde kullanılan parametreler gazın siklon içindeki ilk turunda kapsadığı alan (A_{e1}) hariç hesaplanmıştır. Bu alan (3.60)'taki formül ile hesaplanabilir.

$$A_{e1} = \pi r_a a = \pi \times 2,9 \times 3,98 = 36,24 \text{ m}^2 \quad (3.60)$$

Elde edilen değerler kullanılarak u_e , u_2 ve $\bar{r}_z$ sırasıyla (3.61), (3.62) ve (3.63)'te merkezi ivme ise bu işlemlerin sonuçları kullanılarak (3.64)'te hesaplanmıştır.

$$u_e = \frac{20,3 \times 2,9 / 2,18}{1 + \frac{0,0287}{2} \frac{36,24}{0,9 \times 145,4} 20,3 \sqrt{2,9 / 2,18}} = 24,8 \text{ m/s} \quad (3.61)$$

$$u_2 = \frac{20,3 \times 2,9 / 1,72}{1 + \frac{0,0287}{2} \frac{159,28}{0,9 \times 145,4} 20,3 \sqrt{2,9 / 1,72}} = 23,5 \text{ m/s} \quad (3.62)$$

$$\bar{r}_z = \sqrt{2,18 \times 1,72} = 1,94 \text{ m} \quad (3.63)$$

$$\bar{z}_e = \frac{24,8 \times 23,5}{1,94} = 300,5 \text{ m/s}^2 \quad (3.64)$$

Merkezkaç ivmesi ve hesaplanan diğer parametreler duvar ayrımı için kesme çapı formülünde (3.48) yerine yazıldığında sonuç (3.65)'te verildiği gibi bulunmuştur. Bu sonuç kullanılarak sınır yük değeri (3.35)'te verilen formül kullanılarak (3.66)'da hesaplanmıştır.

$$d_e^* = \sqrt{0,37 \frac{18 \times 4,4 \times 10^{-5}}{2222,7 \times 300,5} \times 10^6} = 21,8 \text{ mikrometre} \quad (3.65)$$

$$C_{lim} = 0,025 \left(\frac{21,8}{73,26} \right) (10 \times 5,64)^{0,15} = 0,014 \text{ kg katı/kg gaz} \quad (3.66)$$

Sınır yük değeri kullanılarak duvar ayrımı ile ayrılan parçacıkların oranı (3.34)'te verilen formül ile (3.67)'de hesaplanmıştır. Sonuca baktığımızda duvar ayrımı ile parçacıkların %99,76'sinin ayrıldığı görülmektedir.

$$\eta_e = 1 - \frac{0,014}{5,64} = 0,9976 \quad (3.67)$$

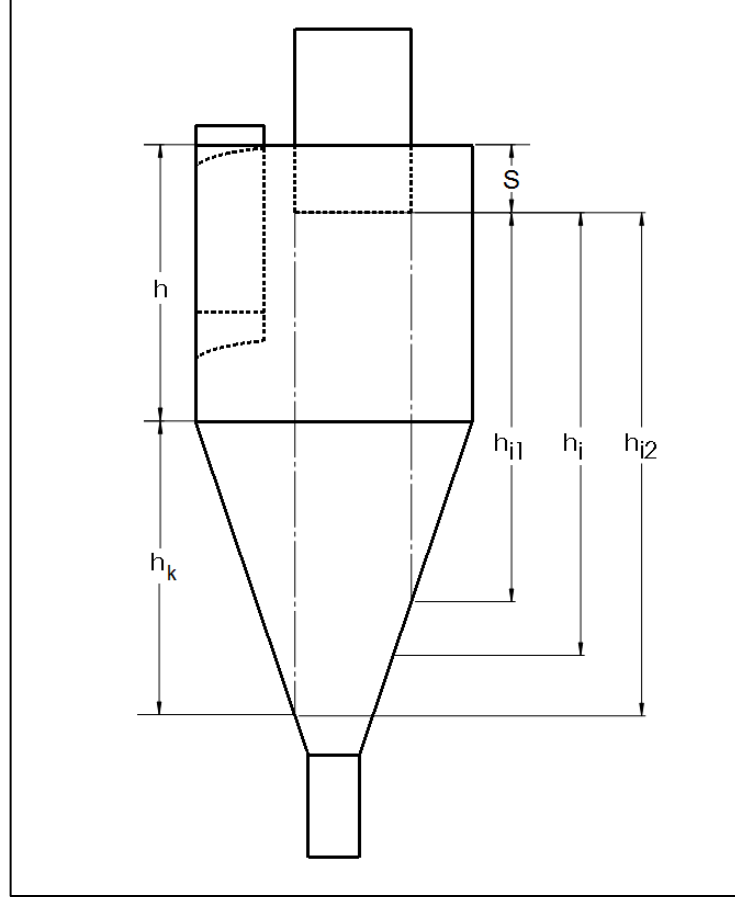
3.2.2. İç Vorteks Ayrımı

İç vorteks ayrımının karakteristiği aşağıda verilen iç vorteks ayrımı kesme çapı ile belirlenmektedir.

$$d^* = \sqrt{\frac{8,1\mu_g \dot{V}}{\Delta\rho u_i^2 \pi h_i}} \quad (3.68)$$

Formülde verilen iç teğetsel hız (u_i) ve kesme yüksekliği (h_i) değerlerinin bulunması gerekmektedir. Kesme yüksekliği vorteks bulucunun siklon tabanını kestiği yer ile vorteks bulucunun alt noktası arasındaki yüksekliktir. Vorteks bulucu

ile siklon gövdesi eş eksenli olmadıkları için Şekil 3.10’da görüldüğü gibi 2 farklı kesme yüksekliği (h_{i1} , h_{i2}) görülmektedir. Bunların uzunlukları bulunup ortalaması alındığında kesme yüksekliği (h_i) 9,36 m olarak hesaplanmıştır.



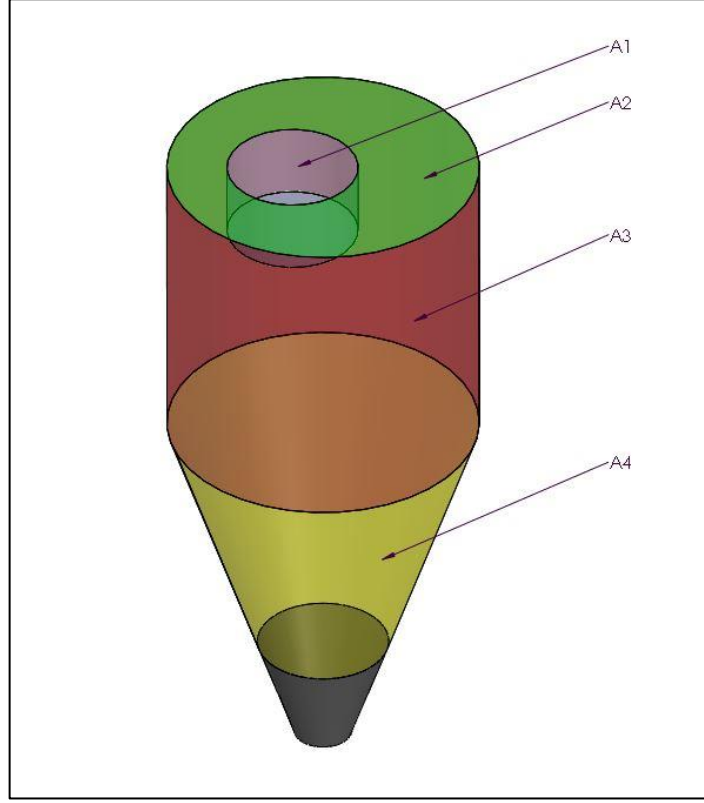
Şekil 3.10: Kesme yüksekliği.

İç teğetsel hız hesabında kullanılan formül (3.69)’da verilmiştir. Formüldeki r_i vorteks bulucu yarıçapıdır ve vorteks bulucu çapının (D_e) ikiye bölünmesi ile elde edilmiştir.

$$u_i = \frac{u_a r_a / r_i}{1 + \frac{\lambda_s A_R}{2 \dot{V}} u_a \sqrt{r_a / r_i}} \quad (3.69)$$

Formüldeki diğer bilinmeyen olan toplam iç alan ise Şekil 3.11’de görüldüğü gibi 4 bölgeden oluşmaktadır. Bu alanlar ve A_R sırasıyla (3.70), (3.71), (3.72), (3.73), (3.74) ve (3.75)’te hesaplanmıştır. Burada konik bölge alanının tamamı değil vorteks bulucunun konik bölgeyi kestiği noktaya kadar olan alan hesaplanmıştır. Konik

bölgenin yüksekliği (h_k) bu durumda kesme yüksekliğine benzer şekilde hesaplandığında 4,97 m olarak bulunmuştur (Şekil 3.10). Bunun sebebi siklon katı çıkışı çapının (B) vorteks bulucu çapından küçük olmasıdır.



Şekil 3.11: Toplam iç alan.

$$A_1 = \pi \times D_e \times S = \pi \times 2,44 \times 1,415 = 10,85 \text{ m}^2 \quad (3.70)$$

$$A_2 = \pi \left(\frac{D^2}{4} - \frac{D_e^2}{4} \right) = \pi \left(\frac{5,8^2}{4} - \frac{2,44^2}{4} \right) = 21,74 \text{ m}^2 \quad (3.71)$$

$$A_3 = \pi \times D \times h = \pi \times 5,8 \times 5,8 = 105,68 \text{ m}^2 \quad (3.72)$$

$$A_4 = \pi \left(\frac{D}{2} + \frac{D_e}{2} \right) \sqrt{(h_k)^2 + \left(\frac{D}{2} - \frac{D_e}{2} \right)^2} \quad (3.73)$$

$$A_4 = \pi \left(\frac{5,8}{2} + \frac{2,44}{2} \right) \sqrt{(4,97)^2 + \left(\frac{5,8}{2} - \frac{2,44}{2} \right)^2} = 67,94 \text{ m}^2 \quad (3.74)$$

$$A_R = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 206,21 \text{ m}^2 \quad (3.75)$$

Bulunan A_R değeri kullanılarak iç teğetsel hız ve iç teğetsel hız kullanılarak iç vorteks ayrımı kesme çapı (d^*) (3.69) ve (3.68)'de verilen denklemler kullanılarak (3.76) ve (3.77)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$u_i = \frac{20,3 \times 2,9/1,22}{1 + \frac{0,0287}{2} \frac{206,21}{145,4} 20,3 \sqrt{2,9/1,22}} = 29,5 \text{ m/s} \quad (3.76)$$

$$d^* = \sqrt{\frac{8,1 \times 4,4 \times 10^{-5} \times 145,4}{2222,7 \times 29,5^2 \times \pi \times 9,36}} \times 10^6 = 29,81 \text{ mikrometre} \quad (3.77)$$

İç vorteks ayrımı kesme çapı kullanılarak farklı çaplardaki parçacıkların iç vorteksteeki ayrılma oranları (3.78)'de verilen denklem ile hesaplanabilir.

$$\eta_F(d) = 0,5 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(1 - \frac{\log\left(\frac{d}{d^*}\right) + \log(m)}{2 \times \log(m)} \right) \right] \right\} \quad (3.78)$$

Örnek olması açısından 5 mikrometre çapındaki parçacıklar için yapılan hesap (3.79)'da verilmiştir. Diğer çaplar için yapılan hesaplar ise Tablo 3.7'de verilmiştir. Denklemdaki iç vorteks ayrımı parametresi (m) 2 ile 4 arasında değer almakla birlikte bu çalışmada 3 olarak alınmıştır [49].

$$\eta_F(5) = 0,5 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(1 - \frac{\log\left(\frac{5}{29,81}\right) + \log(3)}{2 \times \log(3)} \right) \right] \right\} = 0,23 \quad (3.79)$$

Tablo 3.7: İç vortekste çapa göre ayrılma oranları.

Parçacık Çapı (mikrometre)	$\eta_F(d)$
5	0,232
20	0,215
46	0,787
78	0,990
131	0,929
241	0,576
378	0,264
514	0,099
590	0,048
678	0,015
778	0,001
893	0,006
1026	0,030

İç vorteks ayrımı için verim formülü ise (3.80)'de verilmiştir. Formülde m parçacık çap dağılımının kaç parçaya ayrıldığını belirtmektedir. İncelenen durum için parçacık çap dağılımı 13 parçaya ayrılmıştır. ΔR_{Ai} ise her parçacık çapının kütleli olarak oranıdır ve Tablo 3.3'te verilmiştir. Parçacık çapları için ayrılma verimleri ile oranlarının çarpımı Tablo 3.8'de verilmiştir. Toplam iç vorteks ayrımı ise %34,28 olarak bulunmuştur.

$$\eta_i = \sum_{j=1}^m \eta_F(\bar{d}_j) \Delta R_{Ai}(\bar{d}_j) \quad (3.80)$$

Tablo 3.8: İç vorteks ayrımı verim hesapları.

j	Parçacık Çapı (mikrometre)	$\eta_F(\bar{d}_j)\Delta R_{Ai}(\bar{d}_j)$
1	5	0,05171
2	20	0,03642
3	46	0,06295
4	78	0,07153
5	131	0,03629
6	241	0,02655
7	378	0,04891
8	514	0,00537
9	590	0,00231
10	678	0,00057
11	778	0,00002
12	893	0,00008
13	1026	0,00013
Toplam		0,3428

3.2.3. Toplam Ayırma Verimi

Toplam ayırma verimi iki mekanizmanın toplamından oluşmaktadır ve aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$\eta_{ges} = \eta_e + \frac{C_{lim}}{C_e} \eta_i \quad (3.81)$$

Formülü ve önceki bölümlerde elde edilen sonuçları kullanarak (3.82)'de yapılan hesapta siklonun ayrılma verimi %99,84 olarak bulunmuştur.

$$\eta_{ges} = 0,9976 + \frac{0,014}{5,64} \times 0,3428 = 0,9984 \quad (3.82)$$

3.2.4. Basınç Kaybı

VDI yönteminde basınç kaybı iki bileşenin toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu bileşenleri hesaplamada kullanılan formüller ve yapılan hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_e = -\lambda_s \frac{A_R}{0,9\dot{V}} \frac{\rho_g}{2} (u_a u_i)^{3/2} \quad (3.83)$$

$$\Delta P_e = -0,0287 \frac{206,2}{0,9 \times 145,4} \frac{0,311}{2} (20,3 \times 29,5)^{\frac{3}{2}} = 103,59 \text{ Pa} \quad (3.84)$$

$$\Delta P_i = - \left[2 + 3 \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{4/3} + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right] \frac{\rho_g}{2} v_i^2 \quad (3.85)$$

$$\Delta P_i = - \left[2 + 3 \left(\frac{29,5}{31,1} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{29,5}{31,1} \right)^2 \right] \frac{0,311}{2} \times 31,1^2 = 856,51 \text{ Pa} \quad (3.86)$$

Bu durumda VDI yöntemine göre toplam basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{top} = \Delta P_e + \Delta P_i = 103,59 + 856,51 = 960,10 \text{ Pa} \quad (3.87)$$

3.3. HAD Analizi

Bu bölümde HAD analizleri ve tez kapsamında öne sürülen hibrit metot ile siklonun verimi incelenmiştir.

3.3.1. Kullanılan Modeller ve Sınır Koşulları

Yapılan HAD analizlerinde tanımlanan parametrelerden başlıcaları gaz ve katı fiziksel özellikleri, sınır koşulları ve türbülans modelidir.

Analizlerde gaz ve katı özellikleri önceki bölümlerde aktarıldığı gibi tanımlanmıştır. Bu parametrelerden HAD analizlerinde kullanılanlar Tablo 3.9’da verilmiştir.

Giriş sınır koşulu olarak gazın hızı (3.4)’te hesaplandığı gibi 25,37 m/s olarak tanımlanmıştır. Katı ve gaz çıkışı için sınır koşulları ise atmosferik basınç olarak tanımlanmıştır. Yer çekimi de katıların ayrılmasında etkili olduğu için modele dahil edilmiştir.

Tablo 3.9: Hesaplamalarda kullanılan genel bilgiler.

Parametre	Değer	Birim
ρ_g	0,311	kg/m^3
η_g	$4,4 \times 10^{-5}$	kg/ms
ρ_k	2223	kg/m^3
g	9,81	m/s^2

Türbülans modelleri bölümünde belirtildiği gibi Reynolds Stress Model (RSM) türbülans modeli, yüksek swirle sahip akışlarda kullanıma uygundur. Yapılan analizlerde esas olarak bu model kullanılmıştır. RSM türbülans modeli için transport denklemi (3.88)’de verilmiştir [50], [51]. Ayrıca k-epsilon ve RNG k-epsilon modelleri ile de çözüm yapılarak bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_k u'_i u'_j) = & -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k} \right) - \rho \left(u'_i u'_k \frac{\partial u_j}{\partial z} + u'_j u'_k \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \\ & + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial y} + \frac{\partial u'_j}{\partial x} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial z} \frac{\partial u'_j}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.88)$$

Yukarıdaki denklemde eddy viskozitesi (μ_t) aşağıdaki denklem ile belirlenir. Analizlerde eddy viskozitesi denklemindeki sabit $C_\mu = 0,09$ olarak alınmıştır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.89)$$

İki fazlı akış modeli olarak kullanılan Euler-Lagrange modelinde katı fazın çözümü için kullanılan başlangıç değer denklemi (3.90)'da verilmiştir [52].

$$\frac{dv_p}{dt} = F_A(v_g - v_p) + g \quad (3.90)$$

Denklemdaki $F_A(v_g - v_p)$ ifadesi birim kütleyle uygulanan sürüklenme kuvveti ve g yer çekimidir. Bu durumda denklemin sağ tarafı parçacığa etkiyen net kuvveti denklemin sol tarafı ise parçacığın ivmesini vermektedir. Parçacığın çözüm yapılan geometriye giriş hızı tanımlandığında başlangıç değer denklemi çözülebilir. Bu hız gaz hızına eşit olarak kabul edildiğinde (3.91)'deki gibi yazılabilir.

$$v_p(0) = v_g(0) \quad (3.91)$$

Birim kütleyle birim kayma hızı için etkiyen sürüklenme kuvveti denklemi (3.92)'de verilmiştir.

$$F_A = \frac{3}{4} \frac{\mu}{\rho_p d_p^2} C_D Re \quad (3.92)$$

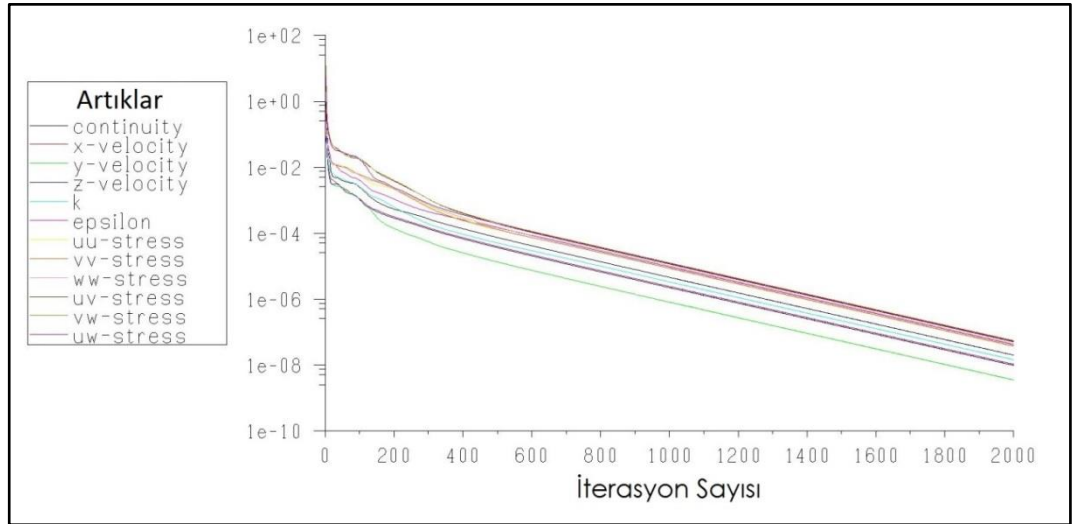
Başlangıç değer denklemi kullanılarak parçacıkların izlediği yörünge ve konumlarının (x_p) hesaplanması için kullanılan denklem (3.93)'te verilmiştir.

$$\frac{dx_p}{dt} = v_p \quad (3.93)$$

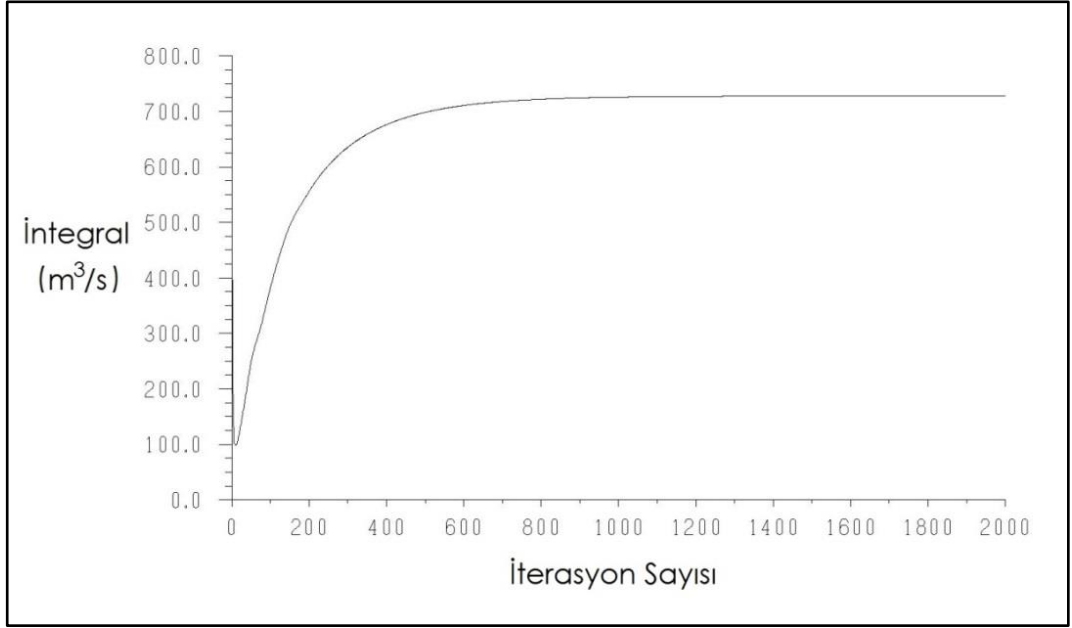
3.3.2. Ağ Bağımsızlık Çalışması

Çözüm ağı bağımsızlığının sağlanabilmesi için ağıdaki hücre sayısı artırılarak düşük yük (Euler-Lagrange) siklon verimine bakılmış ve siklon ayırma performansının ağda kullanılan hücre sayısına göre değişiminin azaldığı noktadaki hücre sayısı seçilerek analizlere bu hücre sayısı üzerinden devam edilmiştir.

Birinci ağ için 300.000 hücre sayısı hedeflenerek oluşturulan ağ 297.323 hücreden oluşmaktadır. Birinci ağ ile yapılan analiz için artıklar Şekil 3.12’de görülmektedir. Aynı hücre sayısında yakınsamayı takip amacıyla konik bölge başlangıç düzlemindeki hız değerleri de takip edilmiştir (Şekil 3.13). İki grafik beraber olarak yorumlanırsa 1400 iterasyondan sonra hem hız değerlerinin değişmediği hem de artıkların 10^{-6} ’nın altına indiği görülmektedir.

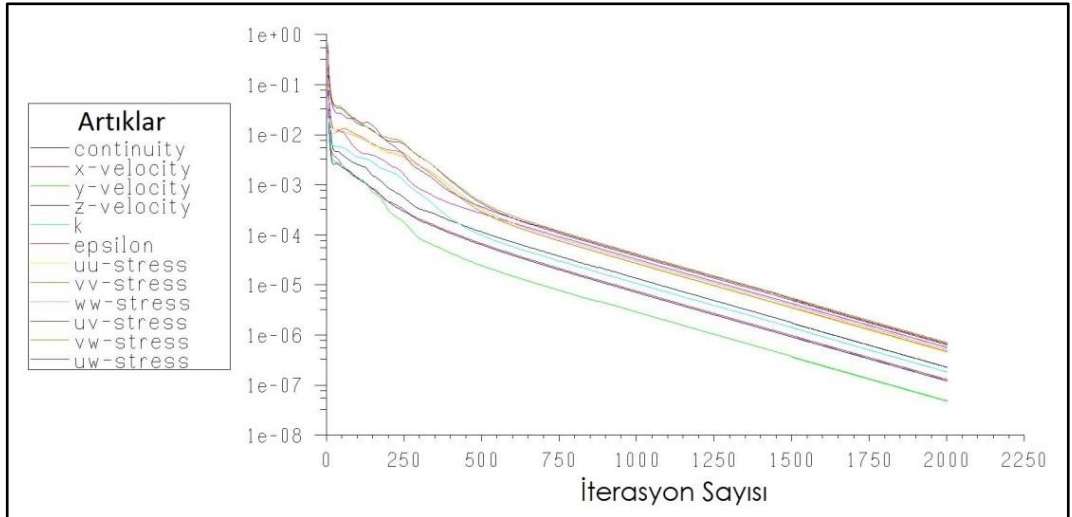


Şekil 3.12: 297.323 hücreli çözüm ağındaki artıklar grafiği.

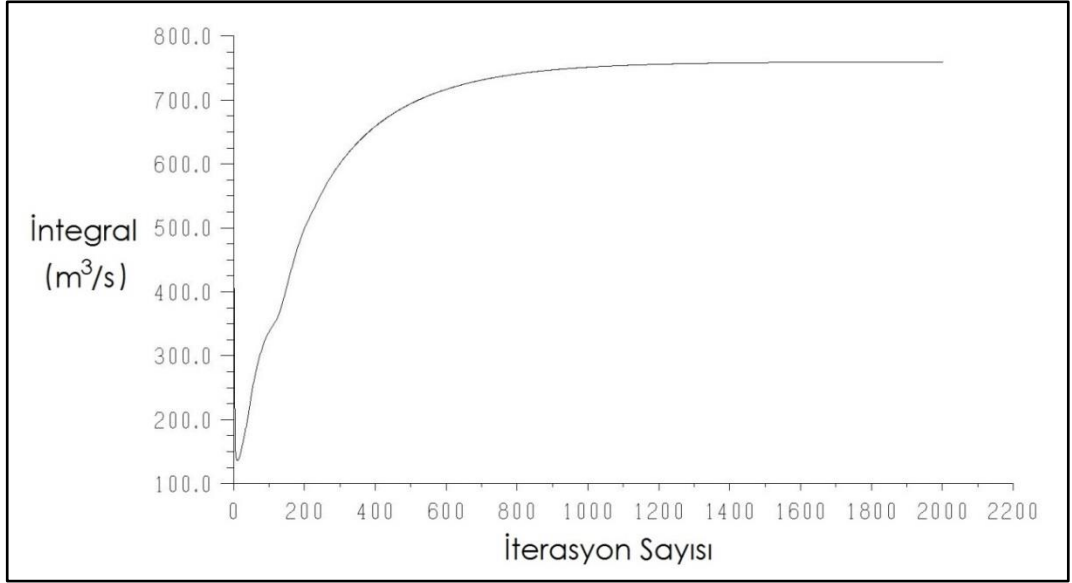


Şekil 3.13: 297.000 hücreli çözüm ağında yakınsama grafiği.

İkinci ağ oluşturulurken ilk ağın 1,5 katı hücre içeren bir ağ oluşturulmak istenilmiştir ve 452.042 hücre içeren bir ağ oluşturulmuştur. Bu ağ ile yapılan analiz için artılar Şekil 3.14'te görülmektedir. Yine yakınsamayı takip amacıyla konik bölge başlangıç düzleminde hacimsel debi de takip edilmiştir (Şekil 3.15). İki grafik beraber olarak yorumlanırsa 1400 iterasyondan sonra hem hız değerlerinin değişmediği hem de artıkların 10^{-6} 'nın altına indiği görülmektedir.

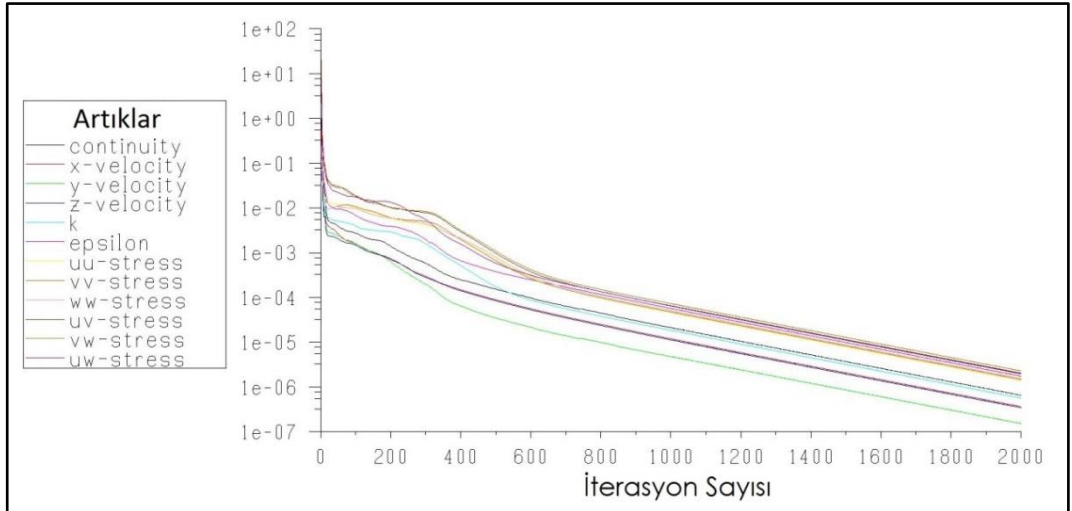


Şekil 3.14: 452.042 hücreli çözüm ağında artıklar grafiği.

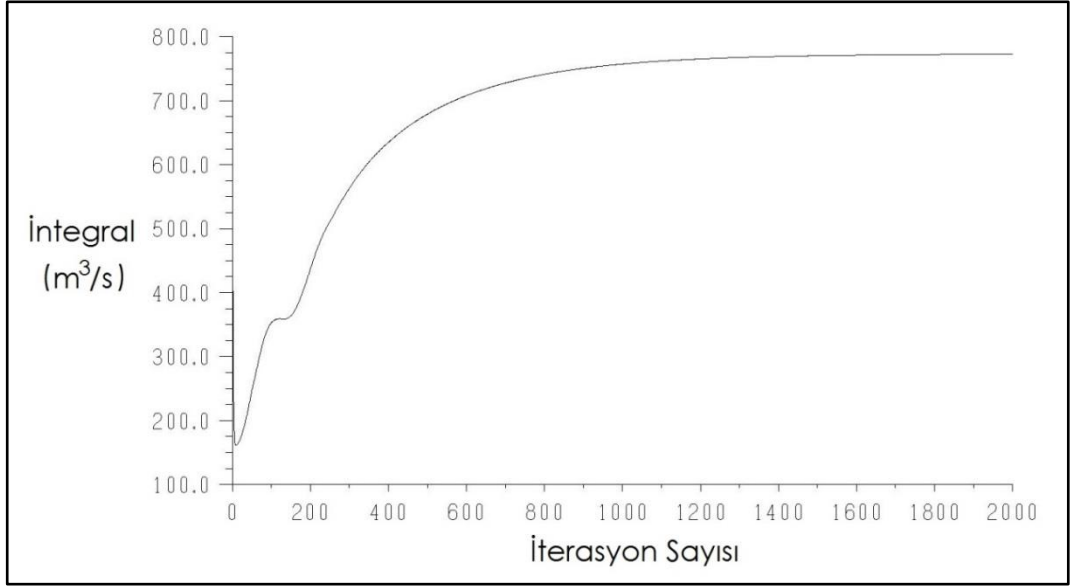


Şekil 3.15: 452.000 hücreli çözüm ağında yakınsama grafiği.

İkinci ağı yaklaşık 1,5 katı hücre sayısına sahip olan üçüncü ağ ise 681.920 hücre içermektedir. Bu ağ ile yapılan analiz için artıklar Şekil 3.16’da ve konik bölge başlangıç düzleminde hacimsel debi Şekil 3.17’de görülmektedir. İki grafik beraber olarak yorumlanırsa 1400 iterasyondan sonra hem hız değerlerinin değişmediği hem de artıkların 10^{-6} ’nın altına indiği görülmektedir.

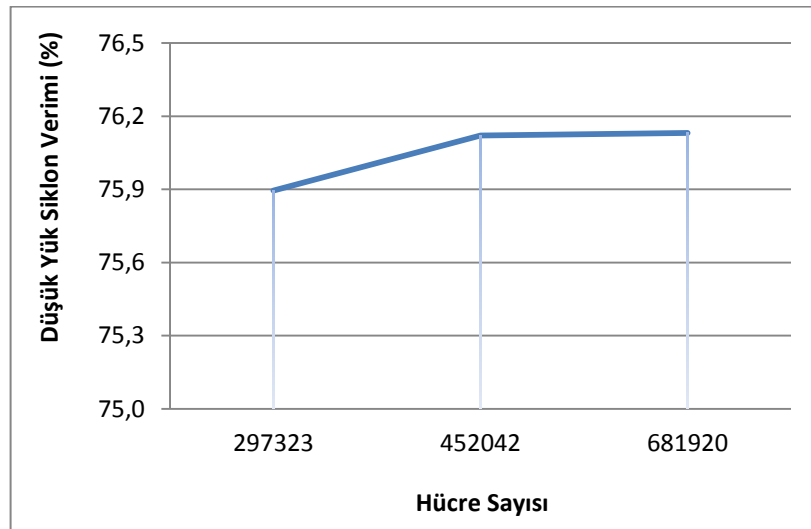


Şekil 3.16: 681.920 hücreli çözüm ağında artıklar grafiği.

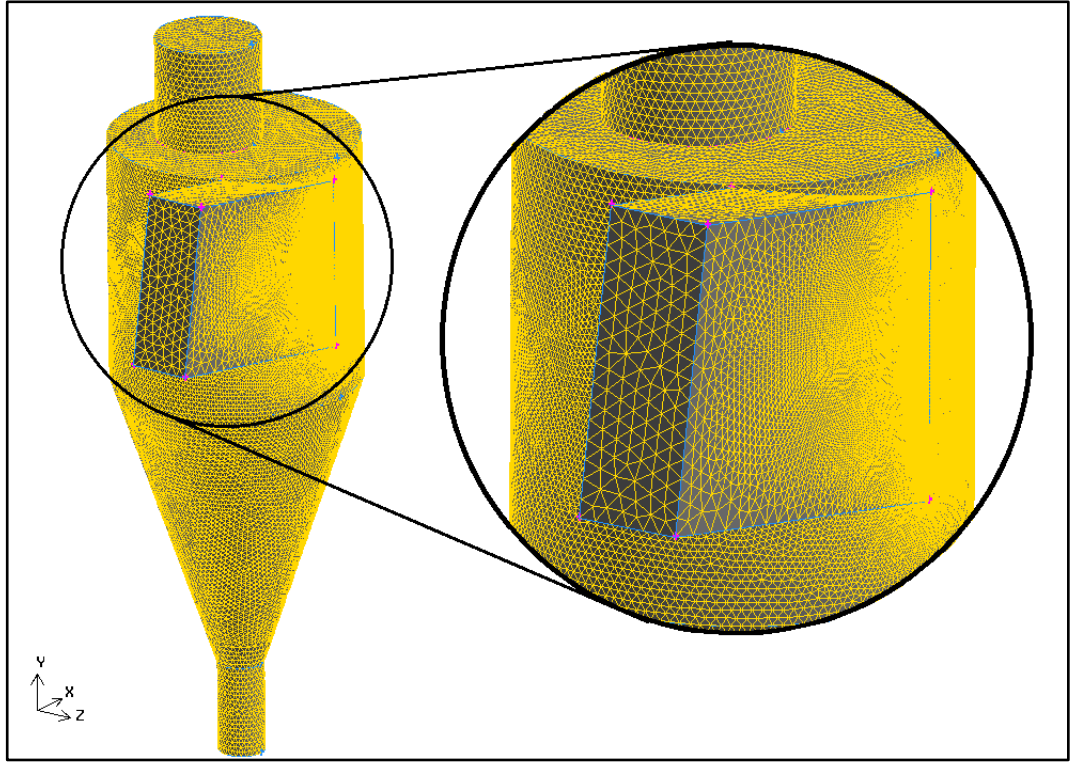


Şekil 3.17: 681.920 hücreli çözüm ağında yakınsama grafiği.

Üç çözüm ağı için de çözümler yakınsadıktan sonra düşük yük siklon veriminin hücre sayısına göre grafiği Şekil 3.18'deki gibi bulunmuştur. Buradan anlaşılacağı gibi hücre sayısı arttıkça çözümler arasındaki fark azalmıştır. Bu sonuçlara göre 450.000 hücre sayısı yeterli doğruluk vermektedir. 450.000 hücreye sahip ağ yapısı Şekil 3.19'da görülmektedir. Burada görüldüğü gibi siklon girişinin siklon gövdesine birleştiği yerde daha sık bir ağ yapısı oluşturularak çözüm hassasiyeti artırılmış ve eğikliği (skewness) yüksek hücre oluşumunun önüne geçilmiştir.



Şekil 3.18: Hücre sayısına göre düşük yük siklon verimi.

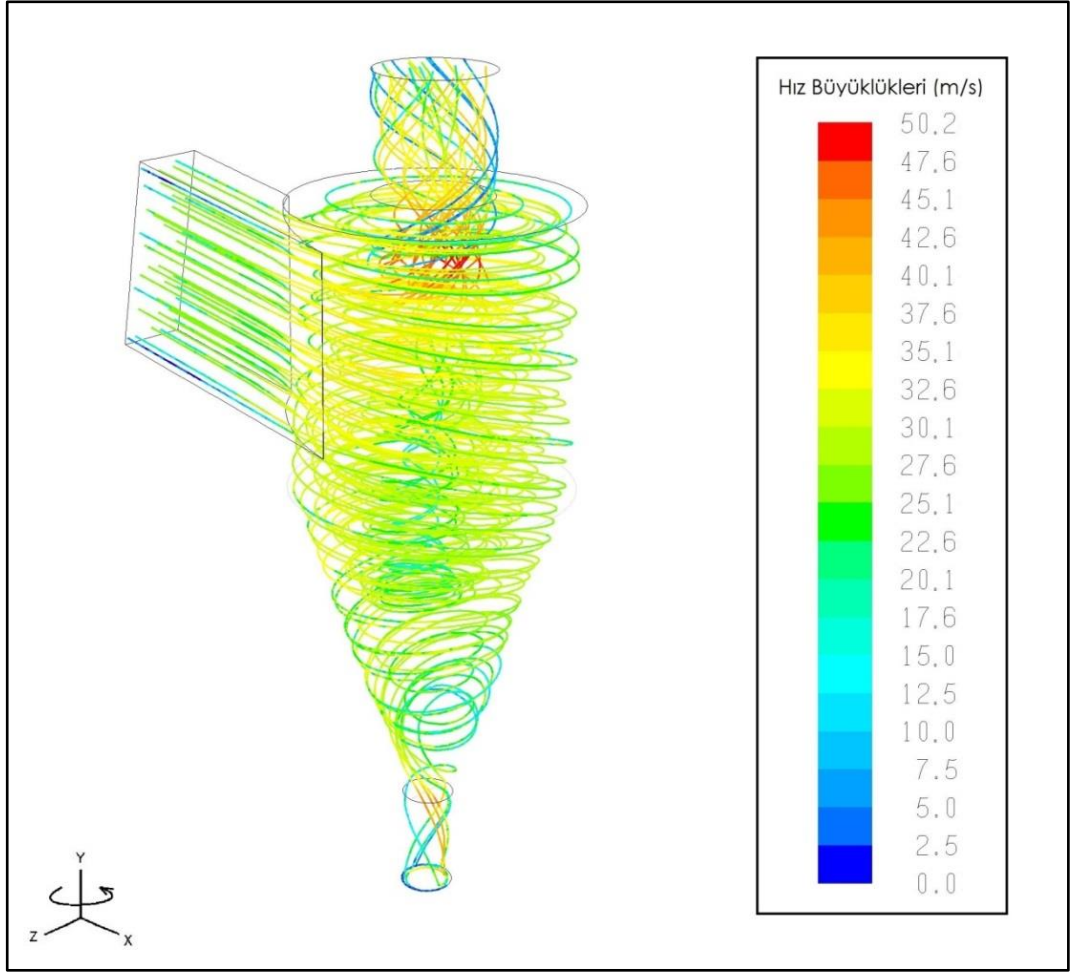


Şekil 3.19: Analizlerde kullanılan 450.000 hücreli ağ yapısı.

3.3.3. HAD Sonuçları

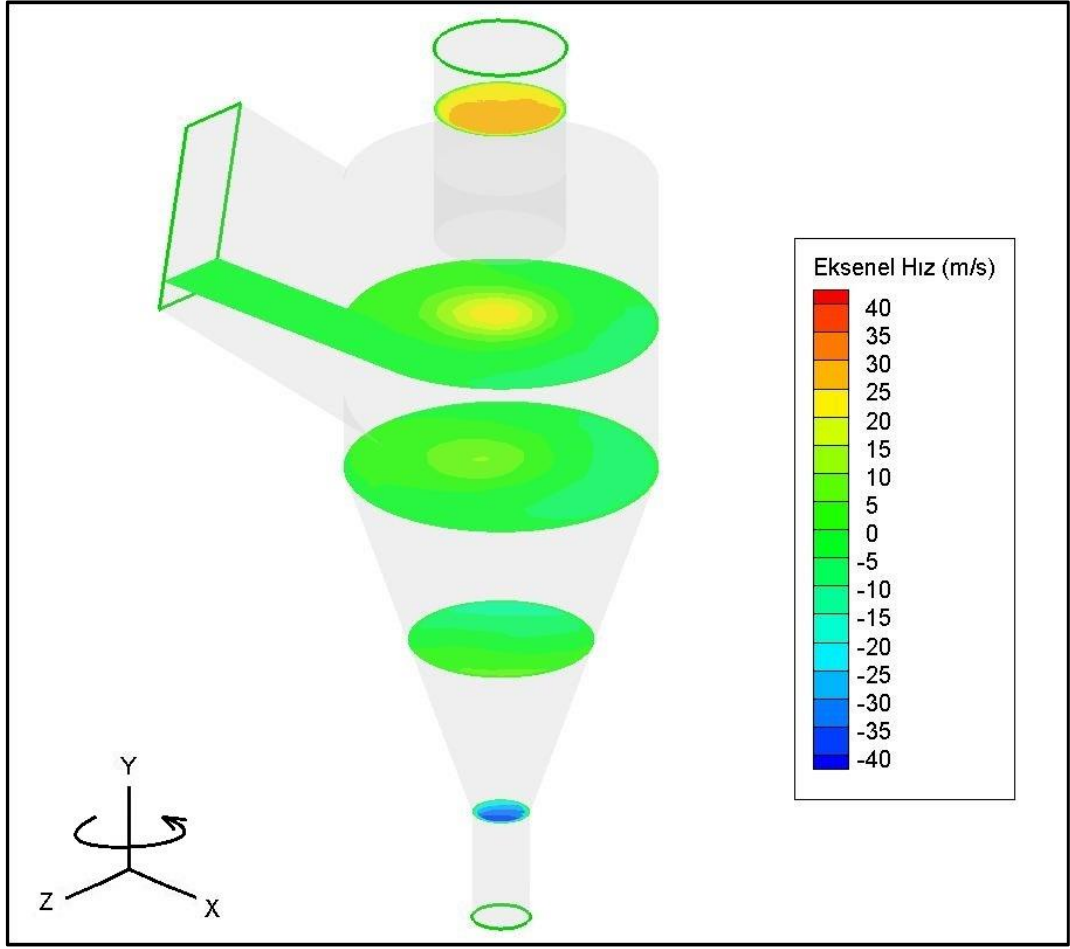
Bu bölümde RSM türbülans modeli kullanılarak yapılan analizin sonuçları aktarılmıştır. HAD analizinin başlıca sonucu siklonun düşük yük ayırma verimi olmakla beraber, klasik yaklaşımda ve VDI yaklaşımında inceleyemediğimiz gazın hız dağılımları, gazın ve parçacıkların izlediği yörüngeler ve benzeri sonuçlar da bu bölümde aktarılmıştır. Bölümün sonunda ise HAD sonucu ve klasik yaklaşım kullanılarak siklonun yüksek yükteki verimi bulunmuştur.

İlk olarak siklon içindeki gaz hareketinin incelenmesi hız dağılımlarını yorumlamayı kolaylaştırmıştır. Siklon içerisinde gazın izlediği yörüngeler ve ulaştığı hızlar Şekil 3.20’de görülmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi siklon merkezinden geçen y-eksenine göre gaz pozitif yönde bir dönme hareketi yapmaktadır. Gazın ulaştığı en yüksek hız ise yaklaşık 50 m/s ile gaz çıkışı bölgesinde oluşmaktadır.



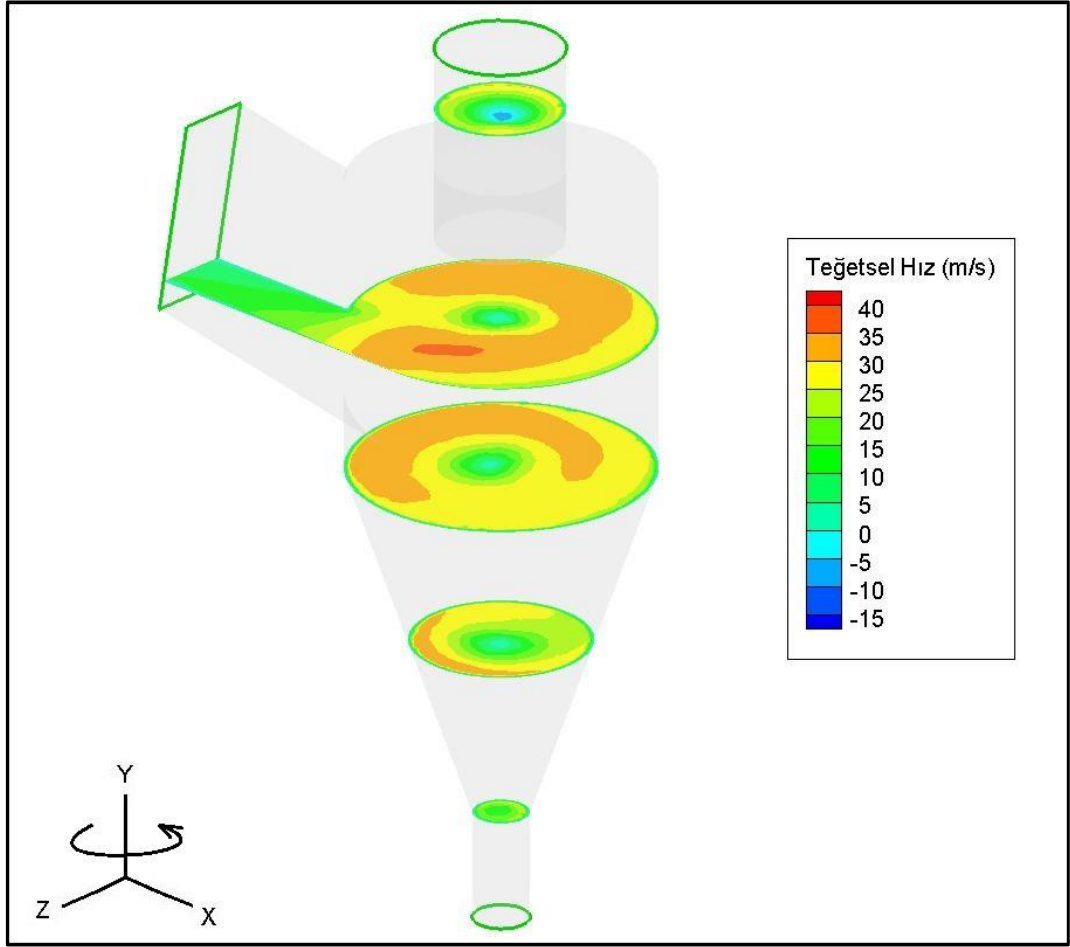
Şekil 3.20: Siklon içerisinde gazın hareketi.

Siklon içinde oluşan eksenel gaz hızı dağılımı Şekil 3.21’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde pozitif ve negatif yönde en büyük eksenel hızların siklon merkezinde olduğu görülmektedir.



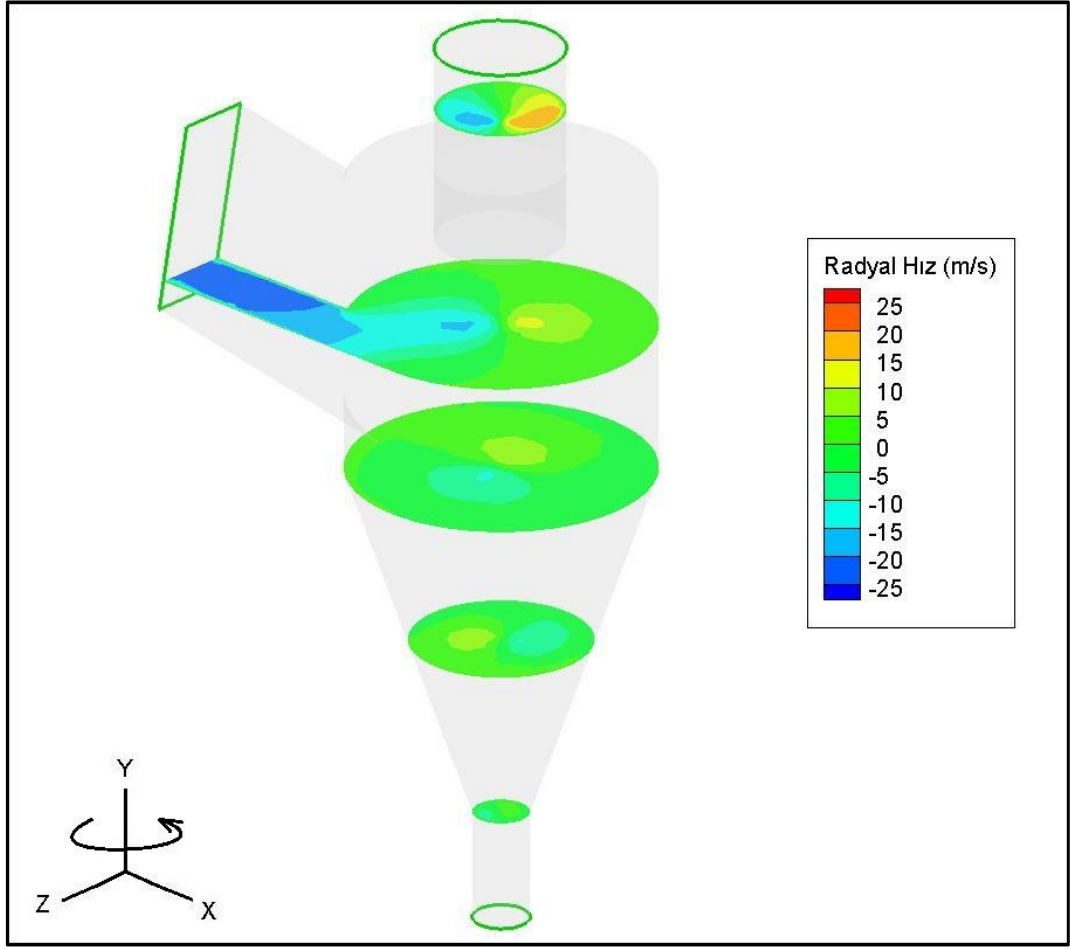
Şekil 3.21: Siklon merkezinden geçen y-eksenine göre eksenel hız dağılımı.

Siklon içinde oluşan teğetsel gaz hızı dağılımı Şekil 3.22’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde en büyük teğetsel hızın siklon girişinin siklona birleştiği bölgede oluştuğu gözlenmektedir. Ayrıca gaz çıkış bölgesindeki konturlar incelendiğinde negatif teğetsel hızlar görülmektedir bu durum gazın dönme yönünün değiştiği anlamına gelmektedir.



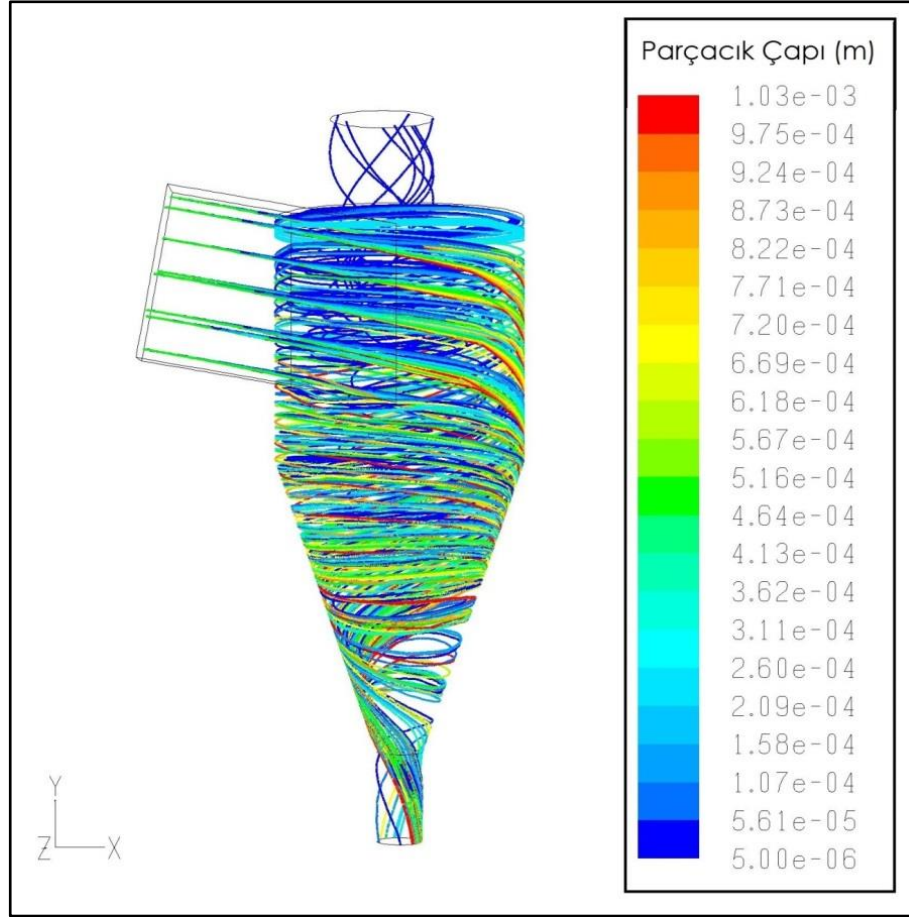
Şekil 3.22: Siklon merkezinden geçen y-eksenine göre teğetsel hız dağılımı.

Siklon içinde oluşan radyal gaz hızı dağılımı Şekil 3.23'te görülmektedir. Şekil incelendiğinde radyal hızların eksenel ve teğetsel hızlara göre daha düşük mertebede olduğu görülmektedir. Radyal hızlar daha çok siklon merkezinden geçen eksene yakın olan bölgelerde yüksek değerler almaktadır.



Şekil 3.23: Siklon merkezinden geçen y-eksenine göre radyal hız dağılımı.

Siklon içerisinde parçacıkların hareketi Şekil 3.24'te verilmiştir. Burada görüldüğü üzere küçük çaplı parçacıklar daha düşük oranlarda, büyük çaplı parçacıklar ise daha yüksek oranlarda tutulmuştur. Parçacıkların ayrılma verimi ve ayrılma debileri Tablo 3.10'da verilmiştir. Buradan toplam ayrılma debisi (199,067 kg/s) siklonun giriş debisine bölünerek siklonun düşük yük, ya da Euler-Lagrange verimi %76,12 olarak bulunmuştur.

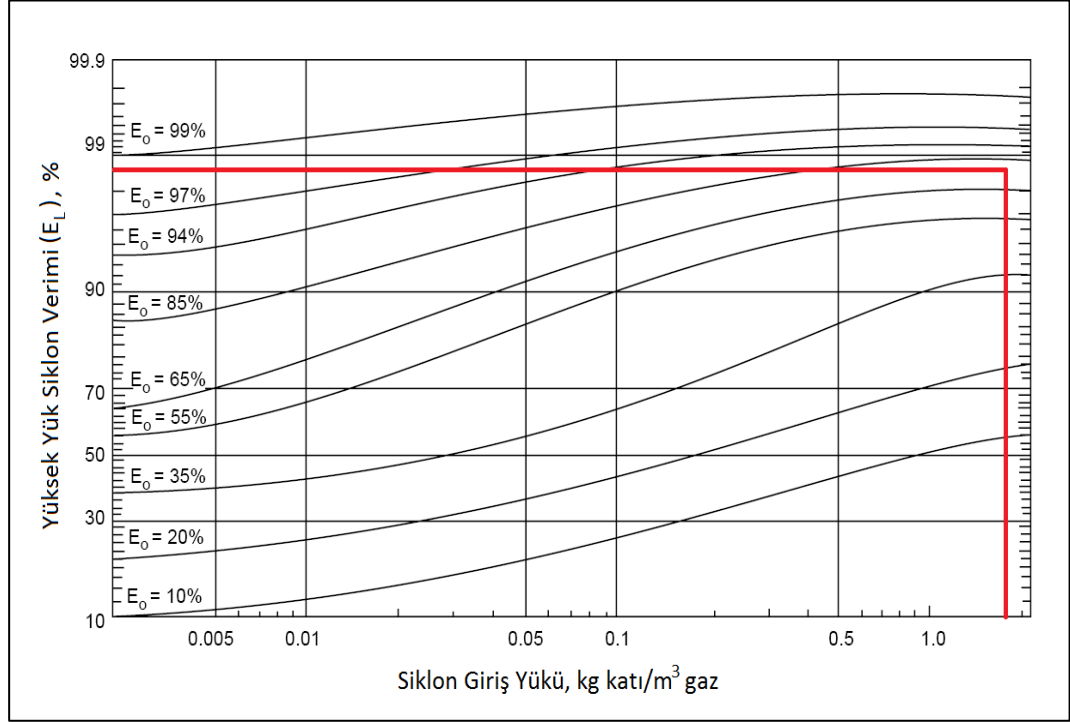


Şekil 3.24: Siklon içerisinde parçacıkların çaplarına göre hareketi.

Tablo 3.10: Parçacık çaplarının HAD analizi ayrılma oranları ve debileri.

Parçacık Çapı (d_p) (mikrometre)	Ayrılma Oranı E_o (%)	Ayrılma Debisi (kg/s)
5	31,30	18,280
20	49,54	21,926
46	100	20,918
78	100	18,889
131	100	10,222
241	100	12,052
378	100	48,429
514	100	14,155
590	100	12,508
678	100	9,897
778	100	6,848
893	100	3,833
1026	100	1,110
Toplam		199,067

Bulunan düşük yük siklon verimi ve siklonun giriş yükü (L) olan $1,8 \text{ kg katı/m}^3 \text{ gaz}$ kullanılarak Şekil 3.25'te verilen grafikten siklon verimi okunduğunda yüksek yük siklon verimi %98,5 olarak bulunmuştur [48].



Şekil 3.25: Siklon giriş yükü ve HAD ile hesaplanan düşük yük siklon veriminin fonksiyonu olarak yüksek yük siklon verimi grafiği.

HAD ile kesme çapını bulmak için Tablo 3.10'dan faydalanılarak 20 mikrometre çapındaki parçacıkların %50'ye yakın bir verim ile ayrıldığı görülmüştür. 46 mikrometre çapındaki parçacıklar ise %100 verim ile ayrılmaktadır. Buradan kesme çapının 20 mikrometrenin biraz üstünde bir değer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Böylece 20 mikrometreden başlanılarak çap küçük aralıklarla artırılarak HAD ile ayrılma verimine bakılmış ve kesme çapı 20,02 mikrometre olarak bulunmuştur.

HAD ile basınç kaybı bulunurken yine hibrit bir yaklaşım yapılmıştır. Bu yaklaşımda HAD ile modellenmemiş olan giriş basınç kaybı ($\Delta P_{f(i-g)}$) ve parçacıkların hızlanması kaynaklı basınç kaybı ($\Delta P_{(f-i)p}$) klasik yaklaşım ile yapılan hesaplamalardan alınmıştır. Sonrasında basınç kaybı için klasik yaklaşımdaki düzeltme yapılmıştır. Bu durumda siklonun toplam basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{top} = \Delta P_{f(i-g)} + \Delta P_{(f-i)p} + \Delta P_{HAD} \quad (3.94)$$

$$\Delta P_{top} = 142,86 + 886,83 + 521,71 = 1551,40 \text{ Pa} \quad (3.95)$$

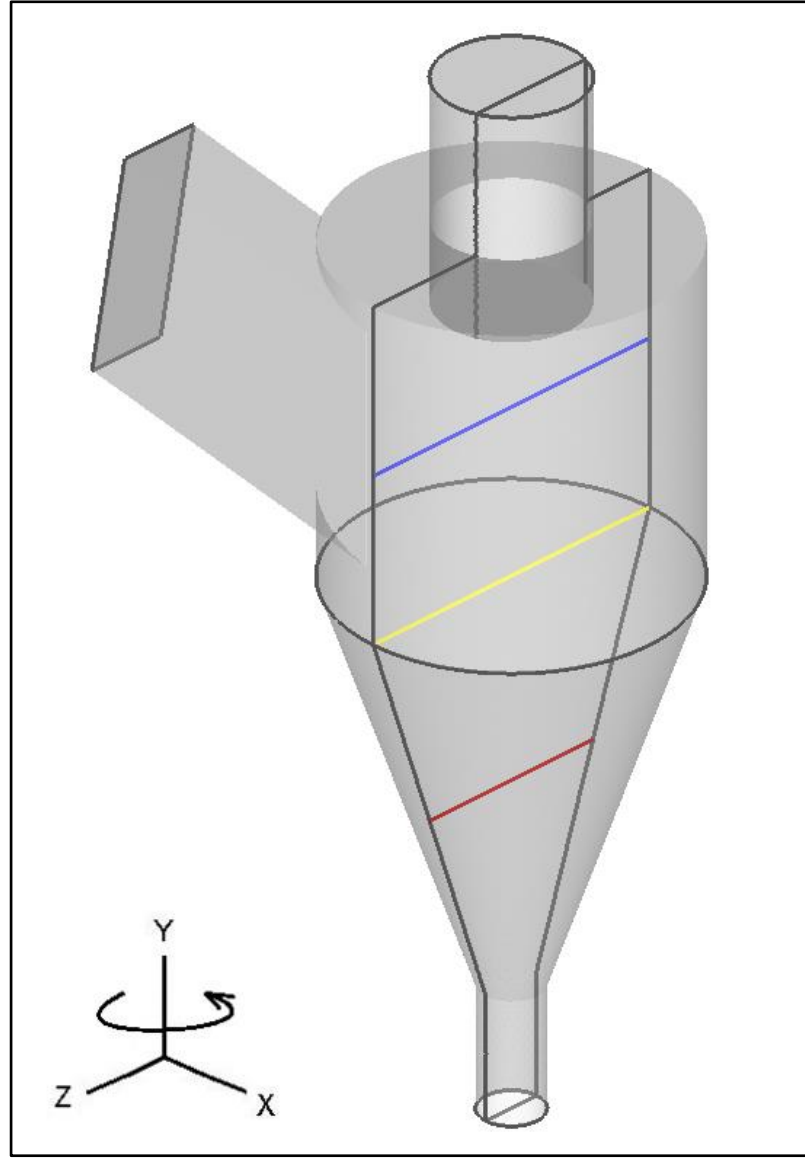
Yukarıdaki denklemlerde ΔP_{HAD} ifadesi HAD ile hesaplanan basınç kaybını ifade etmektedir. Bulunan toplam basınç kaybı (hibrit yaklaşım basınç kaybı) ve klasik yaklaşımdaki düzeltme katsayısı kullanılarak, gerçek basınç kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{düz} = 1,1 \times \Delta P_{top} = 1706,54 \text{ Pa} \quad (3.96)$$

3.3.4. Farklı Türbülans Modellerinin Karşılaştırılması

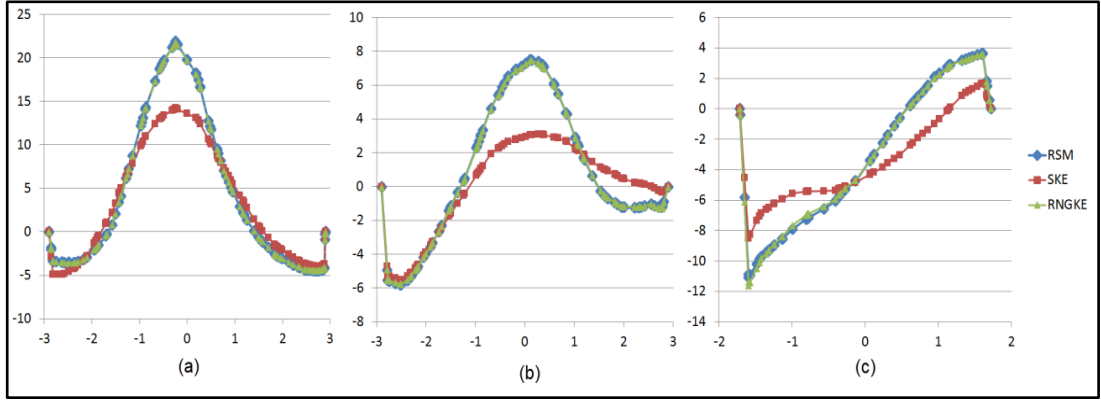
Üç türbülans modeli ile yapılan analizler karşılaştırılırken hız profillerine, basınç profillerine bakılmıştır.

Hız profilleri karşılaştırılırken birçok makaledeki gibi siklon içerisinde hayali çizgiler üzerindeki eksenel, teğetsel ve radyal hızlar karşılaştırılmıştır. Bunun için Şekil 3.26'da görülen 3 hayali çizgi kullanılmıştır. Bunlardan mavi olan çizgi silindirik bölgenin orta noktasında, sarı olan çizgi konik bölgenin başlangıcında ve kırmızı olan çizgi ise konik bölgenin orta noktasındadır.

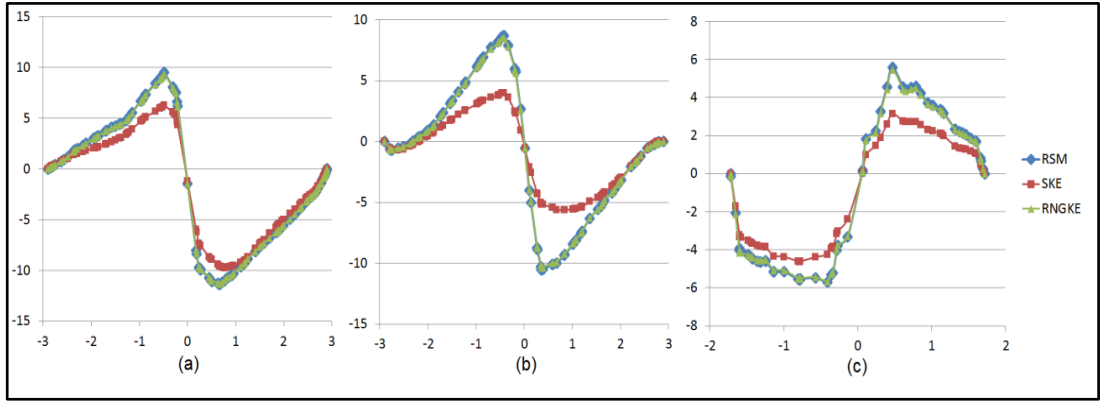


Şekil 3.26: Siklon içerisinde hız profillerinin karşılaştırıldığı yerler.

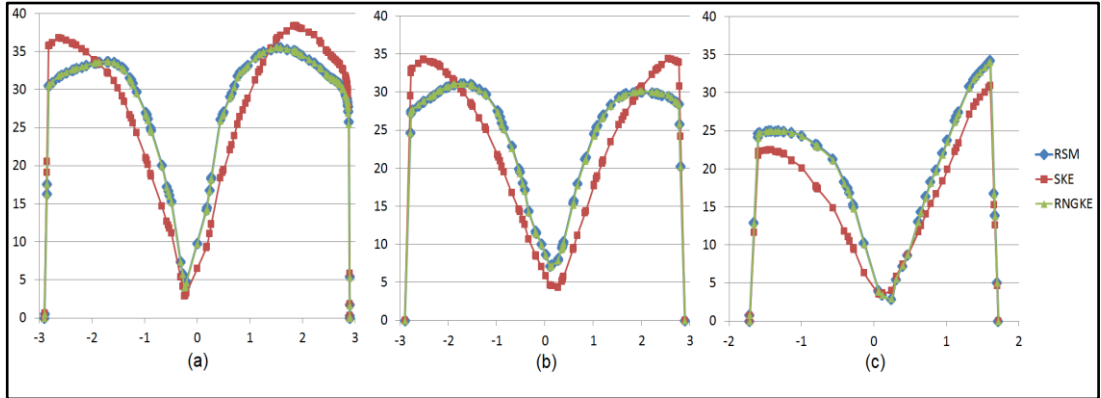
Bu çizgiler üzerindeki aksenal, radyal ve teğetsel hız değerlerine bakıldığında RSM ile RNG k-epsilon modellerinin her üç çizgi üzerinde de benzer sonuç verdiği görülmüştür (Şekil 3.27), (Şekil 3.28), (Şekil 3.29).



Şekil 3.27: a) Mavi çizgi üzerinde eksenel hızlar, b) Sarı çizgi üzerinde eksenel hızlar, c) Kırmızı çizgi üzerinde eksenel hızlar.



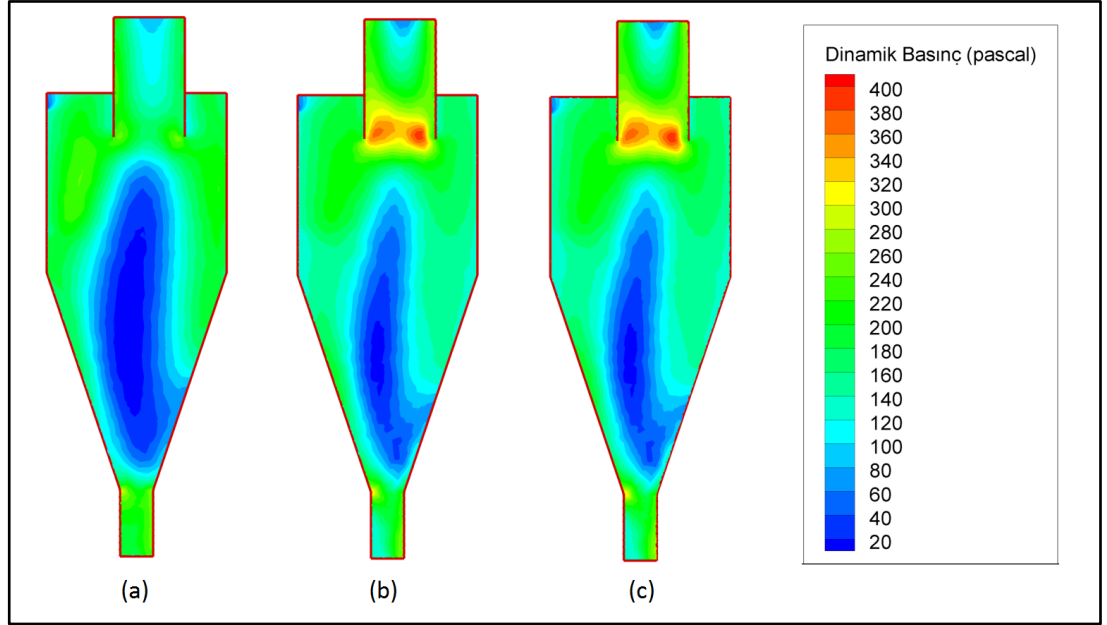
Şekil 3.28: a) Mavi çizgi üzerinde radyal hızlar, b) Sarı çizgi üzerinde radyal hızlar, c) Kırmızı çizgi üzerinde radyal hızlar.



Şekil 3.29: a) Mavi çizgi üzerinde teğetsel hızlar, b) Sarı çizgi üzerinde teğetsel hızlar, c) Kırmızı çizgi üzerinde teğetsel hızlar.

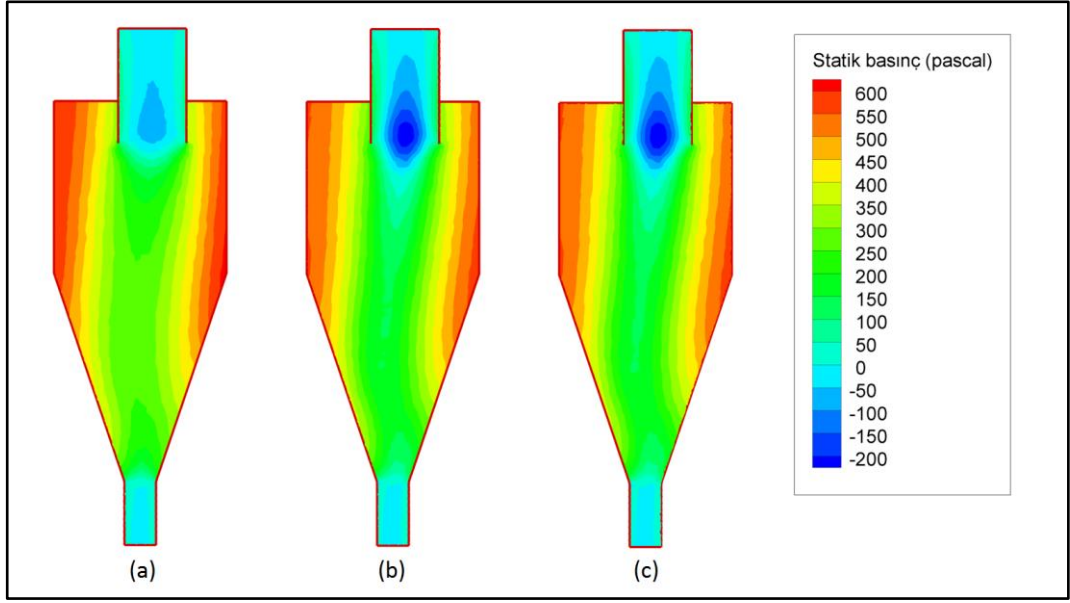
Siklonun z-y düzlemindeki kesitinde dinamik basınç profillerine bakıldığında yine RNG k-epsilon modeli ile RSM modelinin çok benzer sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 3.30). Bu durum yukarıdaki grafiklerdeki iki türbülans

modelindeki hızların çok benzer olması ile açıklanabilir çünkü dinamik basınç bir noktadaki gaz hızı ile doğrudan ilişkilidir.



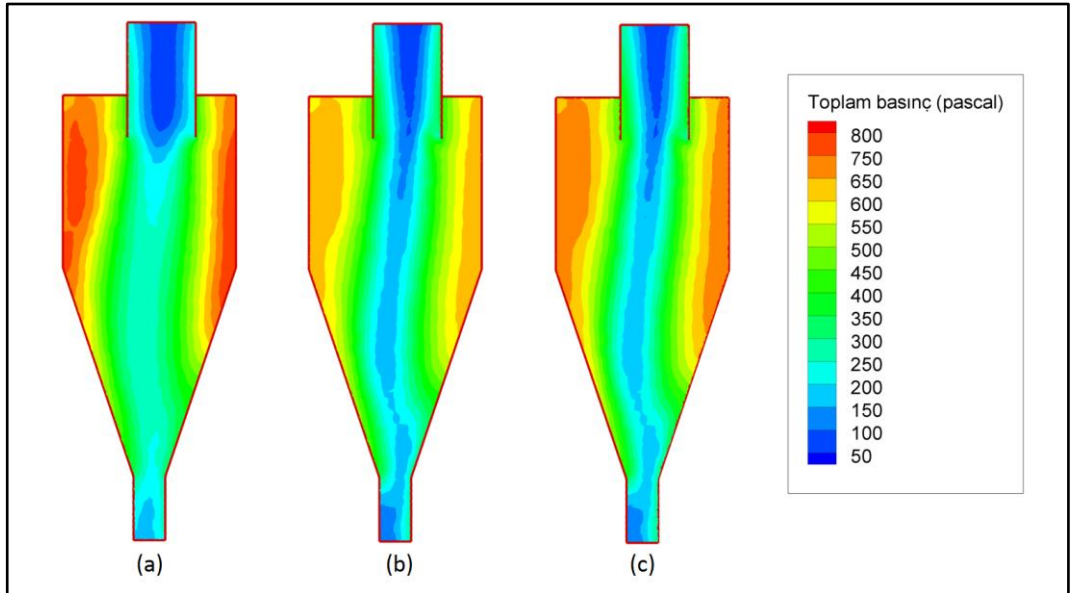
Şekil 3.30: a) K-epsilon modelinde dinamik basınç dağılımı, b) RNG k-epsilon modelinde dinamik basınç dağılımı, c) RSM modelinde dinamik basınç dağılımı.

Aynı kesitte statik basınç konturlarına bakıldığında şekilsel olarak her üç türbülans modelinin de benzer sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 3.31). Ancak k-epsilon modelinde diğer iki modele göre statik basınç değerleri 50-100 pascal daha yüksektir.



Şekil 3.31: a) K-epsilon modelinde statik basınç dağılımı, b) RNG k-epsilon modelinde statik basınç dağılımı, c) RSM modelinde statik basınç dağılımı.

Toplam basınçlara bakıldığında yine RNG k-epsilon ve RSM modeli ile bulunan sonuçların benzer olduğu ve k-epsilon modeline göre düşük oldukları görülmektedir (Şekil 3.32). Noktasal değerlerde ise RNG k-epsilon modeli ile RSM modeli arasında 3-5 Pa arasında farklar oluşmuştur, ancak bu fark küçük olduğu için basınç dağılımında renk farkı olarak görülmemektedir.



Şekil 3.32: a) K-epsilon modelinde toplam basınç dağılımı, b) RNG k-epsilon modelinde toplam basınç dağılımı, c) RSM modelinde toplam basınç dağılımı.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez kapsamında yapılan çalışmalarla bir DAY kazan siklonunun verimi ve basınç kaybı klasik yaklaşım, VDI yaklaşımı ve HAD analizleri ile değerlendirilmiştir. Siklon verimi analizlerinde literatürden farklı olarak hibrit bir yaklaşım kullanılmıştır. Hibrit yaklaşımda düşük yük siklon veriminin bulunmasına kadar olan adımlar HAD kullanılarak yapılmış, sonrasında yüksek yük siklon verimi bulunurken klasik yaklaşımda kullanılan grafikten faydalanılmıştır. Yine basınç kaybının HAD ile hesaplanmasında siklon girişindeki basınç kaybı ve parçacıkların hızlanmasından kaynaklı basınç kaybı klasik yaklaşımdan yararlanılarak bulunmuştur.

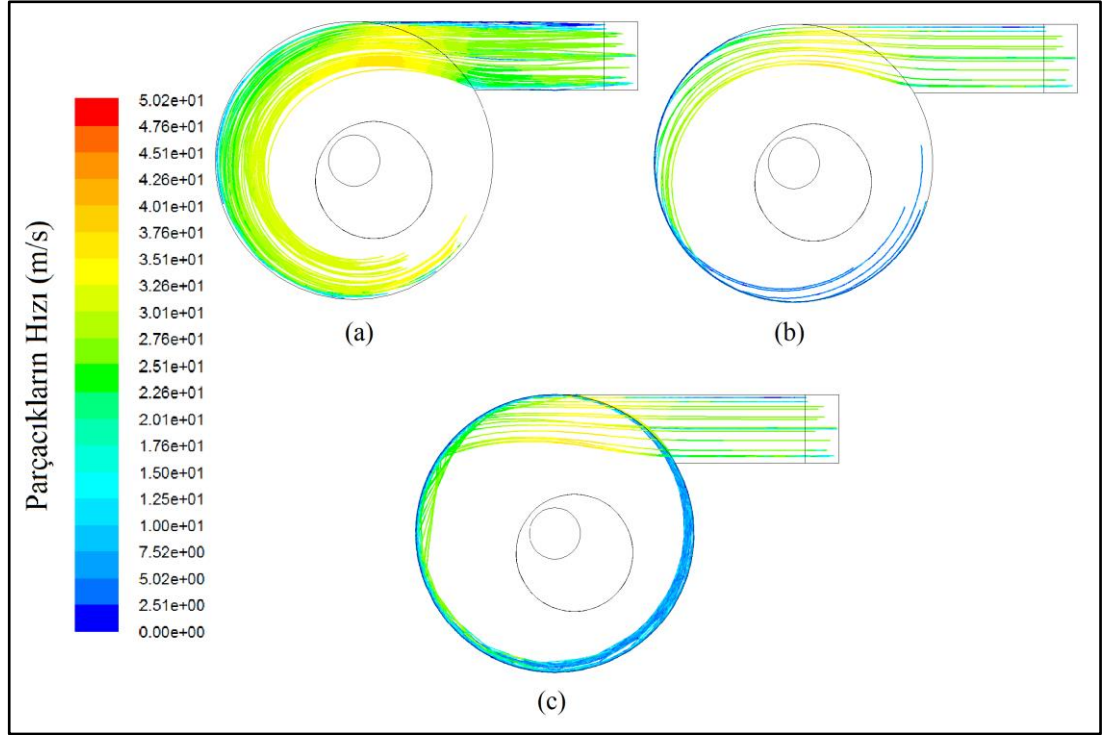
Bu çalışmaların başlıca sonucu siklon ayırma veriminin hesaplanmasında kullanılan modellerin hata oranlarının görülmesi olmuştur. Klasik yaklaşım siklon verimini yaklaşık %1 oranında düşük tahmin ederken, VDI yaklaşımı %1 oranında fazla tahmin etmiştir. Yeni önerilen hibrit yaklaşım ile siklon verimi gerçek değerinden %0,3 aşağıda tahmin edilmiştir. Bu durum hibrit yaklaşımı daha iyi bir yaklaşım yapmakla beraber grafik okumadaki hassasiyetin düşük olması net bir sonuç bulmayı engellemektedir.

Ayrıca yapılan çalışmaların sonucunda hibrit yaklaşımın başka kullanım şekillerinin de olabileceği görülmüştür. Bu duruma bir örnek HAD ile bulunan kesme çapının klasik yaklaşımda kullanımıdır. Kesme çapı HAD analizlerinde (20,02 mikrometre) klasik yaklaşımdan (25,18 mikrometre) daha düşük bulunmuştur. Klasik yaklaşımda bu değer kullanıldığında Tablo 3.4'te verilen parçacık çaplarının kesme çapına oranı ve klasik metot ile bulunan parçacıkların düşük yük ayrılma verimleri ve debileri Tablo 4.1'deki gibi bulunmuştur. Toplam ayrılma debisi (175,661 kg/s) siklon giriş debisine bölündüğünde siklon düşük yük verimi %67,17 olarak bulunur. Bu durumda Şekil 3.5'ten klasik yaklaşımda %98'in biraz altında okunan yüksek yük siklon verimi %98'in biraz üzerinde okunmuştur.

Tablo 4.1: HAD analizi kesme çapı kullanıldığında klasik metot siklon verimi ve ayrılma debisi

Parçacık Çapı (d_p) (mikrometre)	d_p/d_{50}	E_o (%)	Ayrılma Debisi ($\dot{m}_a$) (kg/s)
5	0,25	7	4,088
20	0,97	49	21,685
46	2,28	74	15,479
78	3,89	84	15,867
131	6,52	95	9,710
241	12,04	100	12,052
378	18,90	100	48,429
514	25,68	100	14,155
590	29,48	100	12,508
678	33,85	100	9,897
778	38,87	100	6,848
893	44,62	100	3,833
1026	51,24	100	1,110
Toplam			175,661

HAD analizleri ile VDI yaklaşımı beraber değerlendirildiğinde de yapılan çalışmalardan sonuç çıkarılabilir. Literatür bölümünde açıklandığı gibi VDI yaklaşımı ile siklon verimi bulunurken siklon girişinin karşısında kalan alanda katıların yoğunlaşıp çökeldiği kabul edilmektedir. HAD analizleri ile parçacıkların hareketi incelendiğinde 5 mikrometre çaplı parçacıkların siklon girişinin karşısındaki alanda yoğunlaşmadığı, parçacık çapı arttıkça yoğunlaşmanın gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.1). Bu durum siklon veriminin gerçek değerinden yüksek bulunmasının sebebi olabilir.



Şekil 4.1: a) 5 mikrometre çapındaki parçacıkların siklon girişindeki hareketi, b) 78 mikrometre çapındaki parçacıkların siklon girişindeki hareketi, c) 241 mikrometre çapındaki parçacıkların siklon girişindeki hareketi.

Hesaplanan basınç kaybı değerleri siklonun ölçülen basınç kaybı değeri olan 2500 Pa ile karşılaştırıldığında en yakın sonucu yine hibrit yöntemin verdiği görülmektedir. Fakat bu sonuçta bile hata oranı yüksektir. Literatürde bu duruma değinilmiştir ve basınç kaybı formüllerinin DAY kazan siklonlarında düşük sonuçlar verdiği kaydedilmiştir [26].

Yukarıdaki örnekler HAD ile klasik yaklaşım ve VDI yaklaşımının beraber kullanımının tez kapsamında önerilen metodun dışında kullanılabileceğini göstermektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan bu konuda yapılabilecek çalışmalar ve öneriler:

- Farklı bir siklon geometrisi seçip yapılan çalışmaları farklı bir geometride de doğrulamak,
- Farklı yük koşullarında ölçülen siklon verimlerini kullanarak HAD analizi ile bulunan düşük yük veriminden yüksek yük verimine geçmek için kullanılan grafikleri yeniden oluşturmak,
- Farklı parçacık çap dağılımlarının etkisini tez kapsamında geliştirilen model ile karşılaştırmak,

- Efektif spiral gaz yolu sayısını HAD analizleri ile belirleyip yukarıda yapılan örnek çalışmada olduğu gibi klasik yaklaşımda kullanmak,
- DAY kazan siklonu basınç kaybı için yeni bir model oluşturmak,
- DAY kazanlar için fan seçimi yaparken fan basıncını marjlı seçmek.

KAYNAKLAR

- [1] TKİ, (2012), “Kömür Sektör Raporu (Linyit)”, Türkiye Kömür İşletmeleri.
- [2] IEA, (2011), “Key World Energy Statistics 2011”, International Energy Agency.
- [3] B&W, (2005), “Steam its generation and use”, Babcock & Wilcox.
- [4] B&V, (1996), “Power Plant Engineering”, Black & Veatch.
- [5] Basu P., (2006), “Combustion and Gasification in Fluidized Beds”, 1st Edition, Taylor & Francis.
- [6] Kavidass S., Anderson G. L., Norton G. S., (2000), “Why Build a Circulating Fluidized Bed Boiler to Generate Steam and Electric Power”, POWER-GEN Asia 2000, 59-65, Bangkok, Thailand, 20-22 September.
- [7] Peltola J., Kallio S., Yang H., Qiu X., Li J., (2013), “Time-Averaged Simulation of the Furnace of a Commercial CFB Boiler”, The 14th International Conference on Fluidization – From Fundamentals to Products, 516-523, Noordwijkerhout, Netherlands, 26-31 May.
- [8] Miller B., Tillman D., (2008), “Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems”, 1st Edition, Academic Press.
- [9] DOE, (2005), “JEA Large-Scale CFB Combustion Demonstration Project”, U.S. Department of Energy.
- [10] Passos M. L., Barrozo M. A. S., Mujumdar A. S., (2013), “Fluidization Engineering Practice”, 1st Edition, McGill University Press.
- [11] Jacobs J. P., (1999), “The future of fluidized-bed combustion”, Chemical Engineering Science, 54 (22), 5559-5563.
- [12] Spliethoff H., (2010), “Power Generation from Solid Fuels”, 1st Edition, Springer.
- [13] Hotta A., (2009), “Foster Wheeler's Solution for Large Scale CFB Boiler Technology: Features and Operational Performance of Lagisza 460 MWe CFB Boiler”, 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 59-70, Beijing, China, 18-20 May.
- [14] Oka, S. N., (2004), “Fluidized Bed Combustion”, 1st Edition, Marcel Dekker.
- [15] Cen K., Li X., Li Y., Yan J., Shen Y., Liang S., Ni M., (1997), “Experimental study of a finned tubes impact gas-solid separator for CFB boilers”, Chemical Engineering Journal, 66 (3), 159–169.

- [16] Cortes C., Gil A., (2007), "Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators", *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 (5), 409-452.
- [17] Muschelknautz U., Muschelknautz E., (1999), "Separation Efficiency of Recirculating Cyclones in Circulating Fluidized Bed Combustions", *VGB Power Tech*, 4 (99), 48-53.
- [18] Zhang R., Basu P., (2004), "A simple model for prediction of solid collection efficiency of a gas-solid separator", *Powder Technology*, 147 (1), 86–93.
- [19] Wang L., (2004), "Theoretical Study of Cyclone Design", Doctoral Thesis, Texas A&M University.
- [20] Chu K. W., Wang B., Yu A. B., Vince A., (2009), "CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones", *Powder Technology*, 193 (3), 235-247.
- [21] Griffiths W. D., Boysan F., (1996), "Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modeling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers", *Journal of Aerosol Science*, 27 (2), 281-304.
- [22] Narasimha M., Brennan M. S., Holtham P. N., (2007), "A comprehensive CFD model of dense medium cyclone performance", *Minerals Engineering*, 20 (4), 414–426.
- [23] Winaya N. S., Basu P., Reddy B. V., (2003), "Experimental investigations on heat transfer from suspension to impact separators in the riser column of a circulating fluidized bed combustor", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (1), 71–75.
- [24] Maryamchik M., Wietzke D. L., (2005), "B&W IR-CFB Operating Experience and New Development", 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 783-790, Toronto, ON, Canada, 22-25 May.
- [25] Chen W., Jiang P., (2011), "Design and Operation of CFB with Compact Separator", *POWER-GEN Asia 2011*, 27 – 29, Kuala Lumpur, Malaysia, 20-22 September.
- [26] Dewil R., Baeyens J., Caerts B., (2008), "CFB cyclones at high temperature: Operational results and design assesment", *Particuology*, 6 (3), 149-156.
- [27] Lee J. M., Kim J. S., Kim J. J., (2003), "Evaluation of the 200 MWe Tonghae CFB boiler performance with cyclone modification", *Energy*, 28 (6), 575-589.
- [28] Chen H. P., Shen Y. Q., Wang X. H., Dai X. M., Xue H.Y., Liu D. C., (2009), "Advanced Refractory and Anti-Wearing Technology of Cyclone Separator in CFB Boiler", 247-249, 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 59-70, Beijing, China, 18-20 May.

- [29] Bernardo S., Mori M., Peres A. P., Dionisio R. P., (2006), "3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles", *Powder Technology*, 162 (3), 190-200.
- [30] Yang W. C., (1998), "Fluidization, Solids Handling, And Processing", 1st Edition, Noyes Publications.
- [31] Elsayed K., (2011), "Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies", Doctoral Thesis, Brussels : Uitgeverij University.
- [32] Lapple C. E., (1950), "Gravity and centrifugal separation", *Industrial Hygiene Quarterly*, 11 (1), 40-47.
- [33] Barth W., (1956), "Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations", *Brennstoff-Waerme Kraft*, 8 (1), 1-9.
- [34] Leith D., Licht, W., (1972), "The collection efficiency of cyclone type particle collectors-a new theoretical approach", *AIChE* , 68 (126), 196-206.
- [35] Clift R., Ghadiri M., Hoffmann A. C., (1991), "A critique of two models for cyclone performance" , *AIChE*, 37 (2), 285-289.
- [36] Bi R., Wang Z., Li Y., Tan X., Zheng S., Liu Z., Chen W., (2012), "Study on a New Type of Gas-Liquid Cyclone Used in Coil", 11th International Symposium on Process Systems Engineering - PSE2012", 565-569, Singapore, 15-19 July.
- [37] Boysan F., Swithenbank J. A., Ewan B. C. R., (1983), "Experimental and theoretical studies of cyclone separator aerodynamics", *ICHEME Symp Series*, 69, 305-320.
- [38] Kuang S., Qi Z., Yu A. B., Vince A., Barnett G.D., Barnett P.J., (2014), "CFD modeling and analysis of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones", *Minerals Engineering*, 62 (6), 43-54.
- [39] Chu K. W., Wang B., Yu A. B., Vince A., Barnett G.D., Barnett P.J., (2009), "CFD-DEM study of the effect of particle density distribution on the multiphase flow and performance of dense medium cyclone", *Minerals Engineering*, 22 (11), 893-909.
- [40] Boysan F., Ayers W. H., Swithenbank J., (1982), "A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design", *Trans IChemE*, 60, 222-230.
- [41] Davidson M. R., (1988), "Numerical calculations of flow in a hydrocyclone operating without an air core", *Applied Mathematical Modelling*, 12 (2), 119-128.
- [42] Slack M. D., Wraith A. E., (1997), "Modelling the velocity distribution in a

hydrocyclone”, 4th Int Colloquium on Process Simulation, 65-83, Otaniemi, Finland, 11-13 June.

- [43] Elsayed K., Layor C., (2010), “Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations”, *Chemical Engineering Science*, 65 (22), 6048-6058.
- [44] Slack M. D., Prasad R. O., Bakker A., Boysan F., (2000), “Advances in Cyclone Modeling Using Unstructured Grids”, *Trans IChemE*, 78, 1098-1104.
- [45] Zhang N., Lu B., Wang W., Li J., (2010), “3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150MWe circulating fluidized bed boiler”, *Chemical Engineering Journal*, 162 (2), 821-828
- [46] Swain S., Mohanty S., (2013), “A 3-dimensional Eulerian–Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone”, *Applied Mathematical Modelling*, 37 (5), 2921-2932.
- [47] Su Y., Zheng A., Zhao B., (2011), “Numerical simulation of effect of inlet configuration on square cyclone separator performance”, *Powder Technology*, 210 (3), 293-303.
- [48] Yang W. C., (2003), “Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems”, 1st Edition, Marcel Dekker.
- [49] VDI, (2010), “VDI-Heat Atlas”, Springer, Verein Deutscher Ingenieure.
- [50] Azadi M., Azadi M., Mohebbi A., (2010), “A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters”, *Journal of Hazardous Materials*, 182 (1), 835-841.
- [51] ANSYS, (2006), “FLUENT 6.3 Theory Guide”, ANSYS Fluent Inc.
- [52] Ferrin J. L., Saavedra L., (2013), “Distribution of the coal flow in the mill-duct system of the As Pontes Power Plant using CFD modeling”, *Fuel Processing Technology*, 106 (11), 84-94.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmed Akif Paksoy 1990 yılında Batman’da doğdu. İlköğretimini Balıkesir’de tamamladıktan sonra 2004 yılında Ziraat Bankası Balıkesir Fen Lisesi’ne başladı. 2008 yılında aynı lisede eğitimini tamamladıktan sonra Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümüne başladı. 2012 yılında lisans eğitimini başarıyla tamamladıktan sonra aynı yıl TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM), Enerji Enstitüsü’nde termik santraller konusunda çalışan ekibe araştırmacı olarak işe başladı. Yine aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE), Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Mehmed Akif Paksoy halen TÜBİTAK MAM, Enerji Enstitüsü’ndeki görevine devam etmekte ve ağırlıklı olarak DAY kazan tasarımı üzerinde çalışmaktadır.