

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİKLONLARDAKİ FARKLI GİRİŞ PALETLERİNİN AKIŞ
ÖZELLİKLERİ VE PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Aykut KARADENİZ

DOKTORA TEZİ
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Selami DEMİR

Kasım, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİKLONLARDAKİ FARKLI GİRİŞ PALETLERİNİN AKIŞ ÖZELLİKLERİ
VE PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Aykut KARADENİZ tarafından hazırlanan tez çalışması 29.11.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Selami DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Selami DEMİR, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Burcu ONAT, Üye

İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa

Prof. Dr. Ahmet DEMİR, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan PEKEY, Üye

Kocaeli Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Selami DEMİR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Siklonlardaki Farklı Giriş Paletlerinin Akış Özellikleri Ve Performans Üzerindeki Etkileri başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Aykut KARADENİZ

İmza

Bu alışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu'nun 116Y061 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Saygıdeğer hocama,

sevgili aileme,

biricik eşime

ve

canım kızıma

TEŞEKKÜR

Lisansüstü öğrencilik hayatım ve akademik kariyerim boyunca, başta doktora tezim olmak üzere her alanda bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Selami DEMİR'e,

Mesleğe adım attığım günden itibaren her konuda yardımını hissettiğim değerli büyüğüm Dr. Öğretim Üyesi Neslihan MANAV DEMİR'e,

Sadece meslektaş kelimesinin yetersiz kalacağı, aynı zamanda iyi birer arkadaşım olan, her zaman desteklerini gördüğüm değerli dostlarım Dr. Hülya CİVELEK YÖRÜKLÜ'ye ve Dr. Öğretim Üyesi Emre Oğuz KÖROĞLU'na,

Tez izleme komitesi görevleri kapsamında, tüm gidişatına baştan sona şahit oldukları tez çalışmamda her zaman desteklerini hissettiğim, sorularıma cevaplar bulduğum değerli hocalarım Prof. Dr. Burcu ONAT'a ve Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY'a,

Hayatım boyunca benim için yaptıklarını kelimelerle ifade etmekten aciz kaldığım, anlatmak istedikçe daha derin bir suskunluğa boğulduğum anneciğime ve babacığım,

Her aklıma geldiğinde tebessüm ettiğim nadir insan, güzel arkadaş, biricik kardeşime,

Benim en özel ve en güzel arkadaşım, her koşulda destekçim, en zor anlarımda elimden tutan, en güzel anlarıma şahit olan –*hatta bazen sebep olan*– çok değerli eşime,

En içten saygılarımı, sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Aykut KARADENİZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Partiküler Maddeler	1
1.1.2 Partiküler Madde Kontrolünde Siklonlar	4
1.2 Tezin Amacı	22
1.3 Hipotez	23
2 MATERYAL VE METOT	25
2.1 Siklonlar ve Palet Tasarımları	25
2.2 Deney Düzenegi	31
2.3 Toz Seçimi ve Özellikleri	34
2.4 Deneysel Yöntem ve Analiz	38
2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modellemesi	40
3 BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	46
3.1 Deneysel Sonuçlar	46
3.1.1 A Grubu Siklonlar	47
3.1.2 B Grubu Siklonlar	52
3.1.3 C Grubu Siklonlar	57

3.1.4 D Grubu Siklonlar.....	59
3.1.5 Kesme apları.....	60
3.2 Maliyet Analizi	62
3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simölasyonları.....	72
3.3.1 Kalibrasyon.....	72
3.3.2 Basınç ve Hız Alanları.....	73
3.3.3 Partiköl Tutma Verimleri	119
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	121
KAYNAKÇA	127
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	137

SİMGELER LİSTESİ

Ω	Açısal dönüş hızı (m/s)
ΔP	Basınç kaybı (Pa veya mH ₂ O su sütunu)
P_u	Birim atık gaz başına güç tüketimi (W.s/m ³)
$\dot{m}$	Birim zamanda tutulan partiküler madde kütlesi (kg/s)
R	Doğal vorteks yarıçapı (m)
P	Fan güç tüketimi (Watt)
η_F	Fan verimi (%)
ρ	Gaz özkütlesi (kg/m ³)
Q	Hacimsel gaz debisi (m ³ /s)
d_p	Partikül çapı (μ m)
d_c	Partikül kesme çapı (μ m)
C	Partiküler madde konsantrasyonu (kg/m ³)
R	Radyal mesafe (m)
D_e	Siklonun çıkış borusu çapı (mm)
S	Siklonun çıkış borusu uzunluğu (mm)
b	Siklonun giriş kanalı genişliği (mm)
a	Siklonun giriş kanalı yüksekliği (mm)
D	Siklonun gövde çapı (mm)
h_b	Siklonun gövde yüksekliği (mm)
h_c	Siklonun konik kısım yüksekliği (mm)
η	Siklonun partiküler madde tutma verimi (%)
v_θ	Tanjant hız (m/s)
η_e	Tutulan partiküler madde başına tüketilen enerji (W.h/kg)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
DPM	Discrete Phase Model
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
PM	Partiküler Madde
RSM	Reynold Stress Model
VBA	Visual Basic for Applications

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Tanjant girişli, ters akışlı siklon tasarımı ve boyutları.....	7
Şekil 1.2	Bazı giriş yapısı tasarımları. (a) boru şeklinde, (b) tanjant tip ve (c) sarmal tip giriş yapıları	8
Şekil 1.3	Toz çıkış yapıları (a) Sürgü kapak, (b) Döner vana (Theodore, 2008) .	9
Şekil 1.4	Siklonlarda akış alanları (a) Radyal mesafedeki hız profilleri, (b) Akış esnasında oluşan dış ve iç vorteksler.....	10
Şekil 1.5	Rankine vorteksinde radyal mesafedeki tanjant hız bileşeni.....	11
Şekil 1.6	Basınç kaybı modellerinin deneysel verilerle kıyaslanması (a) Shepherd ve Lapple, (b) Alexander, (c) Stairmand, (d) First, (e) Barth, (f) Casal ve Martinez, (g) Chen ve Shi ve (h) Demir modelleri (Demir, 2014) .	13
Şekil 1.7	Helezonik girişli siklon (Gong vd. 2012)	17
Şekil 1.8	Giriş kanalında yönlendirici plaka (Wakizono vd., 2015).....	17
Şekil 1.9	Giriş yapısında akım düzleştirici kanallar (Huang vd., 2017)	18
Şekil 1.10	Farklı açılarda giriş paletleri (Misiulia vd., 2017b).....	18
Şekil 1.11	Farklı sayıda giriş yapısına sahip siklonlar (Safikhani vd., 2018)	19
Şekil 1.12	Farklı turlarda taban paletlerine sahip siklonlar (Zhou vd., 2018) ...	20
Şekil 1.13	Dikey doğrultuda değişen giriş açılarına sahip siklonlarda statik basınç haritaları (Wang vd., 2019)	21
Şekil 2.1	Siklon yapı elemanları. <i>Soldan sağa; giriş yapısı ve gövde, çıkış borusu, konik kısım</i>	25
Şekil 2.2	Bir giriş ve bir çıkış yapısı ile elde edilen 5 varyasyon	26
Şekil 2.3	Siklonlara yaptırılan giriş paletlerinin görünüşleri; (a) Palet 1, (b) Palet 2, (c) Palet 3, (d) Palet 4	29
Şekil 2.4	Çalışmalarda 8 farklı siklon tasarımı için yaptırılan palet grupları; (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) C1, (e) B1, (f) B2, (g) B3, (h) D1	30
Şekil 2.5	Akım düzleştirici parça.....	30
Şekil 2.6	Toz biriktirme haznesi.....	31
Şekil 2.7	Radyal fan.....	32
Şekil 2.8	Özel tasarım askı aparatı.....	32
Şekil 2.9	Dijital manometre	33
Şekil 2.10	Partikül boyut dağılımının belirlenmesinde kullanılan cihaz	34
Şekil 2.11	Tartım cihazı.....	34
Şekil 2.12	Mastersizer partikül boyut dağılım analiz sonucu	35

Şekil 2.13 Rosin-Rammler kümülatif dağılım grafiği.....	37
Şekil 2.14 Log-normal kümülatif dağılım grafiği.....	38
Şekil 2.15 A tipi siklonlarda nötral (düz) ve helezonik tavanlar	41
Şekil 2.16 B tipi siklonlarda nötral (düz) ve helezonik tavanlar.....	42
Şekil 2.17 C ve D siklonlarda nötral (düz) ve helezonik tavanlar.....	42
Şekil 2.18 Ağ tabakası işlenmiş geometri (a) Düz tavan, (b) Helezonik tavan ..	44
Şekil 2.19 Siklondaki akışkan yüzeylerin isimlendirilmesi	44
Şekil 3.1 A1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	48
Şekil 3.2 A1 grubu siklonlarda basınç kayıpları	49
Şekil 3.3 A2 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	50
Şekil 3.4 A2 grubu siklonlarda basınç kayıpları	50
Şekil 3.5 A3 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	51
Şekil 3.6 A3 grubu siklonlarda basınç kayıpları	52
Şekil 3.7 B1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	53
Şekil 3.8 B1 grubu siklonlarda basınç kayıpları	54
Şekil 3.9 B2 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	55
Şekil 3.10 B2 grubu siklonlarda basınç kayıpları	55
Şekil 3.11 B3 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	56
Şekil 3.12 B3 grubu siklonlarda basınç kayıpları	57
Şekil 3.13 C1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	58
Şekil 3.14 C1 grubu siklonlarda basınç kayıpları	59
Şekil 3.15 D1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri	60
Şekil 3.16 D1 grubu siklonlarda basınç kayıpları	60
Şekil 3.17 A1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	74
Şekil 3.18 A1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	75
Şekil 3.19 A1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	76
Şekil 3.20 A1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	77
Şekil 3.21 A1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	78
Şekil 3.22 A1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	79
Şekil 3.23 A1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	80
Şekil 3.24 A2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	81
Şekil 3.25 A2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	81
Şekil 3.26 A2 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	82
Şekil 3.27 A2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	83

Şekil 3.28	A2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	83
Şekil 3.29	A2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	84
Şekil 3.30	A2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	85
Şekil 3.31	A3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	86
Şekil 3.32	A3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	86
Şekil 3.33	A3 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	87
Şekil 3.34	A3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	88
Şekil 3.35	A3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	89
Şekil 3.36	A3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	89
Şekil 3.37	A3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	90
Şekil 3.38	B1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	92
Şekil 3.39	B1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	92
Şekil 3.40	B1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	93
Şekil 3.41	B1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	94
Şekil 3.42	B1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	95
Şekil 3.43	B1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	96
Şekil 3.44	B1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	97
Şekil 3.45	B2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	98
Şekil 3.46	B2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	98
Şekil 3.47	B2 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	99
Şekil 3.48	B2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	100
Şekil 3.49	B2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	101
Şekil 3.50	B2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm).	102
Şekil 3.51	B2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	102
Şekil 3.52	B3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	103
Şekil 3.53	B3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	104
Şekil 3.54	B3 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	105
Şekil 3.55	B3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	106
Şekil 3.56	B3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	106
Şekil 3.57	B3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	107
Şekil 3.58	B3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	108
Şekil 3.59	C1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	109
Şekil 3.60	C1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	109
Şekil 3.61	C1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm).....	110

Şekil 3.62	C1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	111
Şekil 3.63	C1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	111
Şekil 3.64	C1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	112
Şekil 3.65	C1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	113
Şekil 3.66	D1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)	114
Şekil 3.67	D1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)	114
Şekil 3.68	D1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)	115
Şekil 3.69	D1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)	116
Şekil 3.70	D1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)	116
Şekil 3.71	D1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)	118
Şekil 3.72	D1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)	118

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Deneylerde kullanılan siklonların boyutları.....	26
Tablo 2.2 Deneylerde kullanılan siklonların kodlandırılması	27
Tablo 2.3 HAD modelleri için kullanılan bilgisayarın temel sistem özellikleri ...	41
Tablo 2.4 Ağ tabakası boyutlandırması	43
Tablo 2.5 Sınır tabakası değerleri	43
Tablo 2.6 ANSYS FLUENT analiz parametreleri	45
Tablo 3.1 Siklon kesme çapı değerleri	62
Tablo 3.2 A1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	66
Tablo 3.3 A2 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	66
Tablo 3.4 A3 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	67
Tablo 3.5 B1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	68
Tablo 3.6 B2 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	69
Tablo 3.7 B3 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	70
Tablo 3.8 C1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	71
Tablo 3.9 D1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi.....	71
Tablo 3.10 Basınç kaybına dair deney ve model sonuçları	73
Tablo 3.11 Kesme çapına dair deney ve model sonuçları.....	119
Tablo 4.1 Siklon gruplarına göre ihtiyaç duyulan debiler	123

Siklonlardaki Farklı Giriş Paletlerinin Akış Özellikleri ve Performans Üzerindeki Etkileri

Aykut KARADENİZ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Selami DEMİR

Çalışmada siklonlara monte edilen farklı aç ve uzunluklardaki helezonik tavan yapılarının, klasik tasarımlara kıyasla performansı nasıl etkilediği araştırılmıştır. Klasik tasarıma örnek olarak Stairmand yüksek verimli siklon geometrisi de dahil olmak üzere sekiz farklı siklon tasarımı seçilmiştir. Çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği bünyesinde kurulmuş olan özel laboratuvar düzeneğinde deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Atık gazın içerisindeki partiküler madde olarak uçucu kül kullanılmıştır. Performansı oluşturan temel iki parametre olduğu için, deneyler hem basınç kaybı hem partikül tutma verimi cinsinden yürütülmüştür. Sonrasında ise bilgisayar yardımıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) model çalışmaları yapılmıştır. Model kurulumunda, elde edilen deneysel sonuçlar kalibrasyon amacıyla kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre palet (helezonik tavan) yapısı genel performansı iyileştirici yönde etkiye sahiptir. Partikül tutma verimi açısından incelendiğinde, klasik tasarıma göre helezonik tavanlı tasarımda daha düşük tutma verimleri görmek mümkündür. Ancak basınç kaybı cinsinden değerlendirildiğinde helezonik tavanın olumlu etkisi ortaya çıkmaktadır. Tüm siklonlar için

performansın genel olarak değerdendirildiği maliyet analizleri yapılmış ve helezonik tavanın iyileştirici etkisi açıkça ortaya konmuştur.

Model sonuçları incelendiğinde, deneysel verilerle oldukça yüksek uyumluluğa sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak düşük hata payı ile model sonuçları, deneysel verileri iyi düzeyde temsil etmektedir. Bu durumda modelin iyi kalibre edilmiş olması da etken rol oynamaktadır. Sonuçlara göre siklon performans araştırmalarında HAD modellerinin kullanımı uygundur.

Anahtar Kelimeler: Siklon, palet yapısı, basınç kaybı, tutma verimi, HAD.

Effects of Different Inlet Vanes on Flow and Performance in Cyclones

Aykut KARADENİZ

Department of Environmental Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selami DEMİR

In this study, it was investigated how the helical roof structures of different angles and lengths mounted on cyclones affect their performance compared to classical designs. Eight different cyclone design, including Stairmand high efficiency cyclone, have been selected as classical design. The studies were carried out experimentally at Yıldız Technical University Environmental Engineering laboratories. Fly ash was used as the particulate matter in the waste gas. The experiments were conducted in terms of both parameters that pressure drop and particle collection efficiency. These parameters are the main components of cyclone performance. Afterwards, computational fluid dynamics (CFD) model studies were performed with the computer. In the model setup, the previously obtained experimental results were used for calibration.

According to the results obtained, the helical roof structure has a curative effect on overall performance. When it is examined in terms of particle collection efficiency, it is possible to see lower collection efficiencies in helical roof design compared to classical design. However, in terms of pressure drop, helical part has clearly positive effect. For all cyclones, cost analysis were performed to

evaluate performance. In results of these analysis, the improving effect of the helical roof structure was clearly demonstrated.

When the model results are examined, it is obviously seen that the results have very high compatibility with experimental data. The model results represent experimental data with low margin of error. In this case, the well-calibrated model also plays an important role. According to the results, CFD models are suitable for cyclone performance researches.

Keywords: Cyclone, helical roof, pressure drop, collection efficiency, CFD.

1.1 Literatür Özeti

1.1.1 Partiküler Maddeler

Hava kirliliği terminolojisinde partiküler madde (PM), tekil moleküllerden büyük ve 500 μm 'den küçük, hava ortamında disperse olmuş katı ya da sıvı parçacıklara verilen isimdir (Wark vd., 1998). Bir diğer tanıma göre ise atmosferik PM; amonyum, nitratlar, sülfatlar, karbon, su, mineral toz ve iz elementlerden oluşan kompleks bir karışımdır (Christoph vd., 2005). Atmosferik ortama doğal ya da antropojenik yollarla karışan PM'ler, aralarında karbon monoksit, kükürt oksitler, azot oksitler, ozon ve kurşunun da bulunduğu altı kriter kirleticiden biri olarak sayılmaktadır.

PM'ler genel olarak kaba ve ince partiküller olmak üzere iki alt sınıfta incelenirler. Kaba partiküller aerodinamik çapı 2,5 μm 'den 10 μm 'ye kadar değişen parçacıkları (PM_{10}) kapsarlar ve genellikle kırılma, parçalanma ve yüzeylerdeki zımpara etkisi gibi mekanik bozunma prosesleri ile tozların yüzeyden süspansiyonu şeklinde hava ortamına karışırlar. En temel kaynakları arasında yolların tozuması, endüstriyel prosesler, tarım, yapım ve yıkım çalışmaları ile fosil yakıtların yakılması sayılabilir.

Aerodinamik çapı 2,5 μm 'den daha küçük olan PM'ler ince partiküller ($\text{PM}_{2,5}$) olarak sınıflandırılmakta olup, bu parçacıkların oluşumu genellikle yanma proseslerinden yüksek sıcaklıklarda gaz fazda atılan buharların yoğuşmasıyla gerçekleşir. Kompozisyonları yere, zamana ve kaynağa göre oldukça değişkenlik gösterebilmekte; yapılarında genellikle sülfat ve nitrat bileşikler ile karbonlu bileşikler, organikler ve ağır metaller bulunabilmektedir. En temel kaynakları arasında yanma prosesleri, hasattan sonra tarlaların yakılması ve metal ergitme-işleme prosesleri bulunur. Atmosferdeki ömürleri günler ve haftalar mertebesinde olup, binlerce km uzağa taşınabilmektedirler.

Bir kere atmosferik ortama karıştıklarında PM'ler, saniyeler mertebesinde aylar mertebesine kadar değişen sürelerde havada asılı kalabilmektedirler. Aerodinamik çapı 0,1 μm 'den daha küçük partiküller rastgele Brownien hareketleri sergilerken 0,1 ila 2 μm arasında aerodinamik çapa sahip partiküllerin hava ortamındaki çökme hızları, rüzgar hızlarına nazaran çok küçük olduğundan uzun süreler havada asılı kalabilmektedirler (Özbeyaz vd., 2006). Bu partiküller hava ortamından genellikle yağmur ve yıkama prosesleri ile giderilirken 20 μm 'den daha büyük boyutlu partiküller kuru birikim mekanizmalarıyla yüzeylerde birikmekte ve yüksek rüzgar hızlarında tekrar atmosfere karışıp sonra yeniden kuru birikim mekanizmalarıyla giderilmektedirler.

Atmosferik ortama karışan PM'lerin birçok bilim dalında olduğu gibi çevre mühendisliği açısından da en önemli özellikleri şüphesiz insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahip olmalarıdır. Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki şehir popülasyonları için önemli sağlık sorunlarına yol açtıkları bilinen PM'lerin, epidemik çalışmalar neticesinde sadece uzun süreli maruziyetlerde değil, kısa süreli maruziyetlerde de olumsuz etkilere sahip olduğu bilinmektedir (Wilson ve Suh, 1997; Arkouli vd., 2010). PM'lerin kardiyovasküler problemlerin yanında astım ve ölüm oranlarını arttırdıkları ve özellikle solunum yollarıyla ilgili başka çeşitli olumsuz etkileri olduğu daha önce yapılan çalışmalarda ispatlanmıştır (Dockery vd., 1996; Cheng, 2003; Kreyling vd., 2006). Leiva vd. (2013), $\text{PM}_{2,5}$ seviyesindeki her 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük artışın, serebrovasküler hastalık riskini %1,29 kadar arttırdığını rapor etmişlerdir. PM maruziyeti sonucunda meydana gelen başlıca hastalıklar içinde astım gelir. Geçmişte de spesifik olarak bu konu üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur (Lin vd., 2002; Balmes vd., 2009; Mann vd., 2010).

Dane boyutu 10 μm 'den küçük PM'lerin sağlık üzerine olumsuz etkisi çok büyüktür. Özellikle ikincil antropojenik ince aerosollerin oldukça fazla olumsuz etkileri bulunmaktadır (Dockery ve Pope, 1996). $\text{PM}_{2,5}$ 'lar akciğerin en uç noktalarına kadar ulaşabilirler ve bu ince partiküller akciğer kanseri gibi ölümcül hastalıklara yol açabilirler (Morawska vd., 1999; Pope vd., 2002). Hatta bazıları kana dahi karışabilmektedir. Bütün bu sebeplerden ötürü son yıllarda

araştırmacılar hem çevresel hem de sağlık açısından dikkatlerini özellikle ince ve ultra ince partiküllere çevirmişlerdir (Buonanno vd., 2010; Abramesko ve Tartakovsky, 2017; Bai vd., 2018; Habre vd., 2018; Rizza vd., 2019).

PM'lerin fiziksel yapısı ve kimyasal kompozisyonu da sağlık açısından ayrı bir önem arz etmektedir. Mesela, yapılarında bulunabilen civa, kurşun, kadmiyum gibi ağır metaller oldukça zehirli olabilmektedir (Zencirci ve Işıklı, 2017). Bu nedenle, bazı araştırmacılar atmosferik ortamdaki partiküler maddelerin kimyasal karakterizasyonunu ortaya koyup bunların emisyon kaynaklarında azaltılması için uygun azaltım stratejileri önermiş ya da buna zemin teşkil edecek bilgi birikimini sağlamışlardır (Güney ve Aladağ, 2021). Kanserojen organik kimyasallar (poliaromatik hidrokarbonlar, dioksin, furan gibi) içeren PM'ler de sağlık açısından çok tehlikelidir. Birçok farklı bileşenden oluşmuş olan PM'ler akciğerdeki nemle bileşerek H_2SO_4 , HNO_3 gibi asitlere dönüşebilmektedir. Kurum, uçucu kül, benzin ve dizel egzoz partikülleri de benzo(a)piren gibi kanser yapıcı maddeler içerdiklerinden uzun süreli solunumları sonucunda kanserojen etkiye sahip oldukları bilinmektedir (Ichinose ve Sagai, 1992; Liu vd., 2016).

PM'lerin iç ortam hava kalitesine etkileri de oldukça fazladır. Atmosferik ortama yeniden süspansiyon olmaları, trafik emisyonları ve daha birçok antropojenik kaynakların etkisiyle PM'ler iç ortam hava kalitesini düşüren başlıca parametrelerden biri haline gelmektedir (Canha vd., 2014). Ormstad (2000) tarafından yapılan bir çalışmada, evlerdeki askıda partiküler maddelerin çok büyük kısmının $PM_{2.5}$ olduğu; bu partiküllerin de çoğunun $1 \mu m$ 'den küçük olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada dikkat çeken sonuç ise bu partiküllerin potansiyel alerjik madde taşıyıcı olmaları ve solunum sisteminde rahatlıkla gezinebilir olmalarıdır. Uzun yıllar önce üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanan bu konu, insan sağlığı üzerinde hassas etkilere sahip olduğu için günümüzde dahi yoğun olarak araştırılmaktadır (Baures vd., 2018; Slezakova vd., 2019).

Atmosferik ortama karışan PM'lerin bir diğer önemli etkisi de görüş mesafesinin azalmasına neden olmalarıdır. Küçük boyuttaki partiküller; özellikle de $2,5 \mu m$ 'den daha düşük aerodinamik çapa sahip olanlar, ışığı yansıtımları ya da

emmeleri sonucunda görüş mesafesinin azalmasına sebep olurlar (Brewer ve Belzer, 2001). Antropojenik kaynaklar ile kirlenmiş atmosferde görüş mesafesi kırsal bölgelere oranla tipik olarak on kat daha azdır. Görüş azalması yüksek bağıl nem olması durumunda aerosolün şişmesi ile beraber en kritik durumu almaktadır. Buna pus ismi verilmektedir. Japonya'da görüş mesafesi üzerine yapılan bir araştırmada kırsal bölgede görüş mesafesinin 25-30 km arasında değiştiği görülürken, bu değer kentsel bölgede 8-10 km arasında belirlenmiştir (Nitta vd., 1993).

PM'lerin çevreye ve sağlığa etkileri daima araştırılan ve tartışılan bir konu olacaktır. Bu etkilerin mümkünse tamamen ortadan kaldırılması veya en az zarara yol açması için, PM'ler kaynağında kontrol edilmeli ve atmosfere salınımları minimum düzeylere indirilmelidir. Bu maksatla prosese uygun kontrol sistemleri geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

1.1.2 Partiküler Madde Kontrolünde Siklonlar

PM'lerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden ötürü kontrol edilmeleri ve giderilmeleri oldukça önemlidir. En etkili kontrol yolu da kaynaktan azaltımdır. Örneğin trafik kaynaklı emisyonların en aza indirilmesi yeni motor ve yakıt teknolojilerinin kullanımı ile kolaylıkla mümkündür. Ancak bazı kaynaklar için alınabilecek tüm önlemlere rağmen PM emisyon değerleri, emisyon limitlerini sağlamada yetersiz kalabilmektedir. Bu durumda partikülün fiziksel ve kimyasal yapısına uygun kontrol yöntem veya yöntemlerini kullanma zarureti oluşmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları, tek başına istenilen emisyon limit değerlerinin sağlanmasında yeterli olurken bazı durumlarda iki veya daha fazla partikül kontrol ekipmanının birlikte işletilmesi gerekli olabilmektedir.

PM'lerin giderim yöntemi, kontrol ekipmanının yapısına, içeriğine ve arıtım esnasında gerçekleşen giderim mekanizmasına göre değişebilmektedir. Çökelme mekanizmasının etkin olduğu sistemlere çöktürme odaları ve siklonlar örnek verilebilir. Çöktürme odalarının alan ihtiyacı oldukça fazladır ve küçük partikül çapları için partikül tutma verimi çok düşüktür. Bu sebeple atık gazda partiküler madde kontrolü amacıyla kullanımları yaygın değildir. Küçük çaplardaki partiküllerin giderimi için ıslak arıtıcılar etkili yöntemlerden biridir. Ancak ıslak

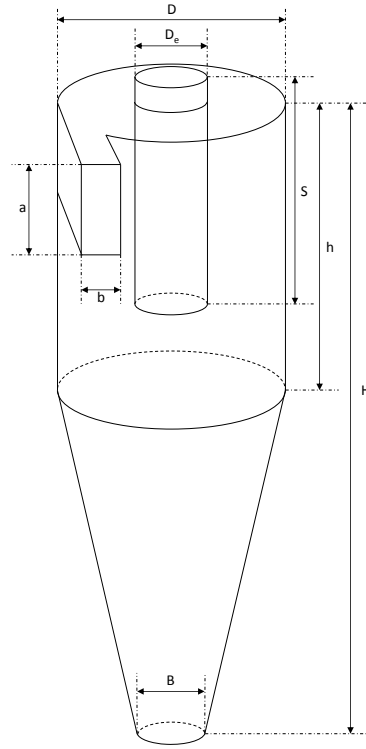
arıtımın, oluşacak atıksuyun yol açabileceği problemler bakımından kuru tutma yöntemlerine nazaran dezavantajlı olduğunu söylemek mümkündür. Elektrostatik filtreler de bir diğer önemli PM kontrol sistemleridir. Çalışma prensipleri gereği çok fazla elektrik enerjisine ihtiyaç duyarlar. İşletme maliyetlerinin yanında kurulum ve bakım maliyeti de yüksek olan elektrostatik filtreler çok küçük partikül çaplarına kadar yüksek tutma verimiyle çalışırlar. Fakat ihtiyaç duyulan verim ile maliyet kıyaslaması yapıldığında her zaman kullanılması uygun değildir. PM kontrolünde filtrasyon metodu da etkin yöntemlerden biridir. Kuru bir sistem olması yönüyle ve ıslak arıtıcılara oranla kullanımının daha rahat olması veya enerji sarfiyatı bakımından elektrostatik çöktürücülerden daha uygun olması, filtrasyonun tercih sebepleri arasında gösterilebilir. Ancak kendine has en önemli dezavantajı sık sık temizleme zorunluluğudur. Filtre malzemesinin yüzeyinde meydana gelen tıkanmaların, basınç kaybında gözle görülür bir artışa yol açtığı bilinmektedir. Bu durum partikül tutma verimini arttırmakta ise de bir süre sonra sistemin tamamen durmasına ve malzeme bütünlüğünün bozulmasına yol açabilmektedir. Bu sebeple periyodik olarak yapılması gereken temizleme işlemi, zaman ve maliyet açısından işletme problemleri oluşturmaktadır. Torbalı filtrelerin bir diğer dezavantajı da yangın riskidir. Bu durumlarda sistemde uzun süreli aksamalar oluşmaktadır. Mikronaltı ve nanopartiküllerin dahi tutulabildiği hibrid elektrostatik filtreler de toz kontrolünde kullanılabilen sistemlerdendir. Bu sistemler >%99 verimle çalışmaktadır ve partiküllerin elektrik yüklenerek filtrasyona tabi tutulması esasına dayanmaktadır (Jaworek vd., 2019). Tüm bu yöntemlerin geçmişten günümüze anlaşılması, geliştirilerek üretilmesi ve kullanılması konusunda temel teşkil eden kaynaklar incelendiğinde bütün yönleriyle kıyaslamalar yapmak mümkün olacaktır (Billings ve Wilder, 1970; Robinson, 1971; Calvert vd., 1972; Davies, 1973; Calvert, 1977; Licht, 1988).

Gün geçtikçe katılaşmakta olan yasal düzenlemeler karşısında alternatif yöntemler gerekmektedir. Islak arıtıcılar, elektrofiltreler veya torba filtreler alternatif olarak görülebilecek sistemlerdir. Ancak partikül emisyonuna neden olan proseslerin birçoğunun her zaman ultra ince partiküller oluşturmadığı bir gerçektir. Ayrıca bu tarz ileri arıtım teknolojileri büyük ve aşındırıcı partiküllere

karşı oldukça hassas olabilmektedir. Bu nedenle bir ön arıtım ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Emisyon standartlarını sağlamak adına kurulum ve işletme maliyetlerinin dikkate alınmayıp sadece sonuca yönelik sistemler kurmak, iyi mühendislik uygulaması açısından yanlış olacaktır. Bu noktada gerek birçok prosesin sebep olduğu emisyonların istenilen düzeylere indirilmesi açısından tek başına yeterli olabilen, gerekse etkin ve işletimi kolay bir ön arıtma metodu olarak kullanılabilen, maliyet ve performans açısından elverişli bir kontrol yöntemi olan siklonlar ön plana çıkmaktadır.

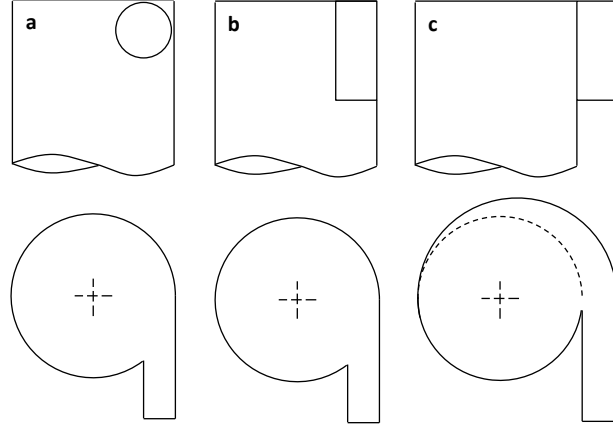
Siklonlar, atık gazlardan partiküler maddelerin verimli ve ucuz bir şekilde arıtımına olanak sağlayan bir kontrol teknolojisi olarak yüz yılı aşkın bir süredir kullanılmakta olup, prosese ve proseste oluşan partiküler madde özelliklerine bağlı olarak farklı tasarımlarda üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında, kullanımı en yaygın olan ters akışlı siklon tasarımları kullanılmıştır.

Bir ters akışlı siklon temel olarak dört bileşenden oluşmaktadır: (1) giriş yapısı, (2) gövde, (3) konik kısım ve (4) çıkış yapısı. Şekil 1.1’de bir tanjant girişli, ters akışlı siklon tasarımı ve boyutları verilmiştir. Burada D gövde çapını, a giriş yüksekliğini, b giriş genişliğini, h silindirik gövde yüksekliğini, H toplam yüksekliği, B konik kısmın çıkış çapını, D_e çıkış borusu çapını ve S çıkış borusu uzunluğunu temsil etmektedir.



Şekil 1.1 Tanjant girişli, ters akışlı siklon tasarımı ve boyutları

Partiküler madde içeren atık gaz, siklona giriş yapısından beslenir. Boru şeklinde, sarmal ve tanjant gibi farklı tasarımlara sahip giriş yapılarına rastlanıyor olsa da tanjant giriş yapısı en sık olarak kullanılan tiptir (Şekil 1.2). Tanjant giriş yapısı, yüksekliği ve genişliği kesin sınırlarla belirli olan dikdörtgen kesitli bir kanaldır ve bu kanalın dış duvarı, siklon gövdesine dik açıyla bağlanır. Giriş yapısının temel görevi atık gazın akış hızını artırmaktır. Bu sebeple, dar kesit alanları (yüksek verimli tip siklonlar) kullanılagelmiş olsa da daha geniş kesit alanlarının kullanımıyla partiküler madde tutma verimi düşürülerek siklonda arıtılan gaz hacmini artırmak mümkün olmaktadır (yüksek debili siklonlar). Genel olarak siklonlardaki gaz giriş hızı 15–25 m/s arasında (Herrick ve Davis, 2000) kabul edilmekle birlikte 6–15 m/s arasında (APTI, 1999) giriş hızları da rapor edilmektedir.

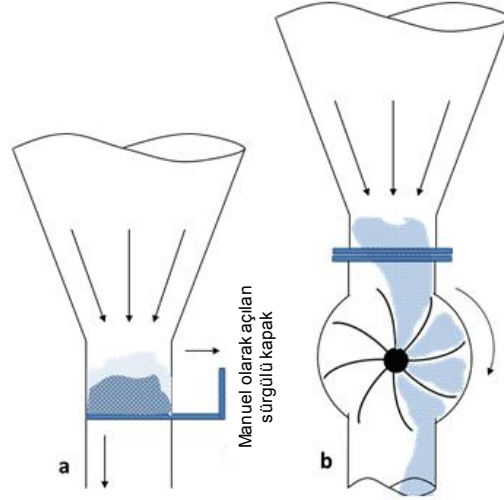


Şekil 1.2 Bazı giriş yapısı tasarımları. (a) boru şeklinde, (b) tanjant tip ve (c) sarmal tip giriş yapıları

Giriş yapısında hızlandırılan atık gaz, gövde ekseninde dik açıya sahip olan bağlantı noktasından itibaren dairesel harekete zorlanır. Gövdenin en önemli işlevi, bu dairesel hareket için dış sınırı tanımlamaktır. Partiküler maddeler gaz moleküllerinden daha ağır olduklarından, dairesel hareket neticesinde oluşan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle merkezden dışarıya, gövde duvarına doğru sürüklenir. Gövdenin bir diğer işlevi de sürüklenen partiküllerin, oluşan girdabın (vorteks) en dış kısmında, gaz akımıyla katı duvar arasında sıkıştırılmasıdır. Zira dış vorteksten iç vortekse doğru partiküllerin sürüklenmesine yol açan kuvvet, partiküllerin çapı ile doğru orantılı iken merkezkaç kuvveti partikül çapının üçüncü kuvveti ile doğru orantılıdır (Peng vd., 2005). Bu sebeple büyük partiküller gaz akımından ayrılırken, küçük partiküller sürüklenerek iç vortekse kaçıp tutulmadan siklonu terkeder. Gaz-duvar arayüzünde sıkışan partiküller, gaz fazın aksel hız bileşeni etkisiyle gövde duvarı boyunca aşağıya doğru sürüklenir. Bu sürüklenme sırasında yerçekimi kuvvetinin de etkisi vardır ancak gazın aksel hız bileşeninden kaynaklı sürtünme, partiküllerin aşağı yönlü taşınımında en önemli faktördür (Yang vd., 2015).

Konik yapının temel görevi, helezonik bir yörüngede aşağı yönde (eksenel ve tanjant hız bileşenleri ile) hareketine devam eden gaz fazın yönünü değiştirmektir. Bu kısımda aksel hız bileşenine dik olan kesit alanı (gövde kesit alanı) tedrici olarak azaltılır ve vorteksin giderek daralan bir kesitte sıkıştırılarak yön değiştirmesi sağlanır. Bu noktada, atık gaz akımı ile helezonik bir yörüngede aşağı doğru hareket eden partiküller, ağırlıklarından ötürü yön değiştiremez ve

konik yapının altında bulunan bir açıklıktan dökülerek siklonun altındaki bir konteynerde toplanır. Bu açıklığın tasarımı ile ilgili olarak da farklı yaklaşımlar mevcut olup, performans üzerindeki etkisine dair araştırmalar yapılmaktadır (Qian vd., 2006; Elsayed ve Lacor, 2012; Xie vd., 2018). Şekil 3'te klasik bir tasarım ve alternatif olarak döner vana tarzı bir tasarım örneği sunulmuştur.



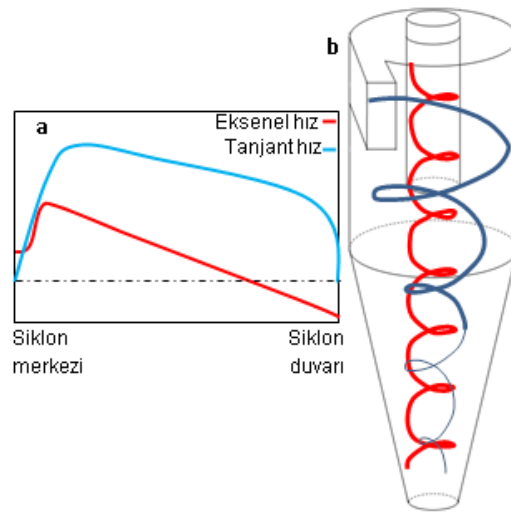
Şekil 1.3 Toz çıkış yapıları (a) Sürgü kapak, (b) Döner vana (Theodore, 2008)

Konik yapının derinliklerine belirli oranda nüfuz ederek yön değiştiren gaz akımı, gövdede oluşan vorteksin (dış vorteks) içinde, daha küçük yarıçapa sahip bir iç vorteks oluşturarak yukarı, çıkış borusuna doğru hareket eder. Klasik çıkış borusu dairesel kesitli bir kanal olup, gövdeyle eş merkezlidir ve gövde boyunca siklonun içinde belirli bir uzunluğa sahiptir. Çıkış yapısının partikül tutma verimi üzerindeki etkisi oldukça yüksektir (Lim vd., 2004). Bu sebeple klasik tasarıma alternatif olarak çıkış yapısı geometrisi üzerine çok sayıda güncel çalışma mevcuttur (Pei vd., 2017; Parvaz vd., 2017; Brar ve Elsayed, 2018; Kumar ve Jha, 2019). Partiküllerden arındırılmış olan temiz gaz çıkış borusundan siklonu terkeder.

Akış Özellikleri

Siklonlarda akış özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hot-wire anemometri, pitot tüpü ve lazer-Doppler anemometri teknikleri kullanılmaktadır (Hoffmann ve Stein, 2008). Şekil 1.4'te, standart bir ters akışlı siklonda dış ve iç vorteksin kavramsal yapısı ve radyal mesafedeki hız profilleri gösterilmiştir. Dış vorteks,

giriş hızı ve siklon geometrisine bağlı olarak gövdede veya konik yapının belirli bir derinliğinde kırılarak yön değiştirmekte ve içeride daha küçük yarıçaplı bir iç vorteks oluşumuna sebep olmaktadır. Oluşan iç vorteks, ters yönde bir eksenel hız bileşeni ile yükselmekte ve çıkış borusundan siklonu terketmektedir. Bu durum, Şekil 1.4'te açık bir şekilde gösterilmiştir. Siklonun merkezinde eksenel hızın pozitif olduğu (pozitif yön yukarı yön olmak üzere) ve belirli bir radyal mesafeye kadar arttığı görülmektedir. Bu noktadan sonra ise eksenel hız yön değiştirmektedir. Bu noktadan duvara kadar olan radyal mesafede ise dış vorteksin aşağı yönlü harekete sahip olduğu aşıkardır.

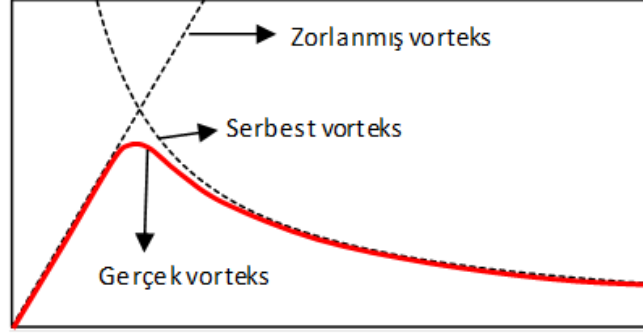


Şekil 1.4 Siklonlarda akış alanları (a) Radyal mesafedeki hız profilleri, (b) Akış esnasında oluşan dış ve iç vorteksler

Tanjant hız ise vorteks merkezinde sıfırdır. Bu noktadan itibaren radyal mesafede lineer olarak artarak belirli bir radyal konumda en yüksek değerine ulaşır. Bu nokta, vorteksin doğal yarıçapıdır. Bu aralıkta vorteks, ideal olarak bir katı madde dönüşü veya sonsuz viskoziteye sahip bir maddenin dönüşü şeklinde ifade edilebilir. Katı maddenin dönüşünden kasıt, bütün radyal mesafelerde açısal hızın aynı olmasıdır. Bu ideal vorteksin dış kısmı ise doğal yarıçapın olduğu nokta ile siklon duvarı arasında, ideal yaklaşıma göre, sürtünmesiz bir ortamda dairesel hareket yapan, sıfır viskoziteye sahip bir akışkanın dönüş hareketidir. Buna göre tanjant hız, radyal mesafeye bağlı olarak azalır. Siklon duvarında ise sürtünmeden ötürü tanjant hız tekrar sıfır olur. Tanjant hızın radyal mesafedeki bu davranışı ideal olarak Rankine vorteksi ile şu şekilde açıklanmaktadır (Asnaghi vd., 2019):

$$v_{\theta} = \begin{cases} \frac{\Omega r}{2\pi R^2} & \Leftrightarrow r \leq R \\ \frac{\Omega}{2\pi r} & \Leftrightarrow r > R \end{cases} \quad (1.1)$$

Burada v_{θ} tanjant hız (m/s), Ω açısai dönüş hızı (m/s), R doğal vorteks yarıçapı (m), r ise radyal mesafedir (m). Rankine vorteksinin davranışı Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5 Rankine vorteksinde radyal mesafedeki tanjant hız bileşeni

Yapılan çalışmalar, siklonun gövde uzunluğu ve giriş yapısının tasarımı gibi geometrik özelliklerin akış alanları üzerinde etkin rol oynadığını göstermiş olup (Hoffmann vd., 2001; Karagöz ve Avcı, 2003; Xiang ve Lee, 2005; Brar vd. 2015; Wei vd., 2020; Gao vd., 2020; Yao vd., 2021; Modabberifar vd., 2021), bu hususta birçok optimizasyon çalışması yapılmıştır. Özellikle son yıllara doğru yapılan çalışmalarda deneysel çalışmaların azlığı ve araştırmaların yalnızca model çalışmalarına yoğunlaştığı görülmektedir (Zhao ve Zhang, 2006; Elsayed ve Lacor, 2011a; 2012; Shukla vd., 2013; Brar vd., 2014; Safikhani, 2016; Misiulia vd., 2017a; Zhao ve Su, 2018; Parvaz vd., 2018; Zhou vd., 2019).

Siklon Performansı

Bir siklonun performansı temel olarak iki işletme parametresi ile tayin edilmektedir: Partikül tutma verimi ve basınç kaybı. Bu iki parametrenin birbirleriyle yakından ilişkili olduğu bilinmekte olup, genellikle basınç kaybı arttıkça partikül tutma verimi artmaktadır. Sistemin uygun maliyetlerle işletilmesindeki başlıca ekonomik kriter de basınç kaybı parametresidir. Bu sebeple araştırmacılar geçmiş yıllarda siklonlardaki basınç kaybı üzerinde yoğunlaşmış ve siklonlardaki basınç kayıplarını tahmin etmek için çok sayıda

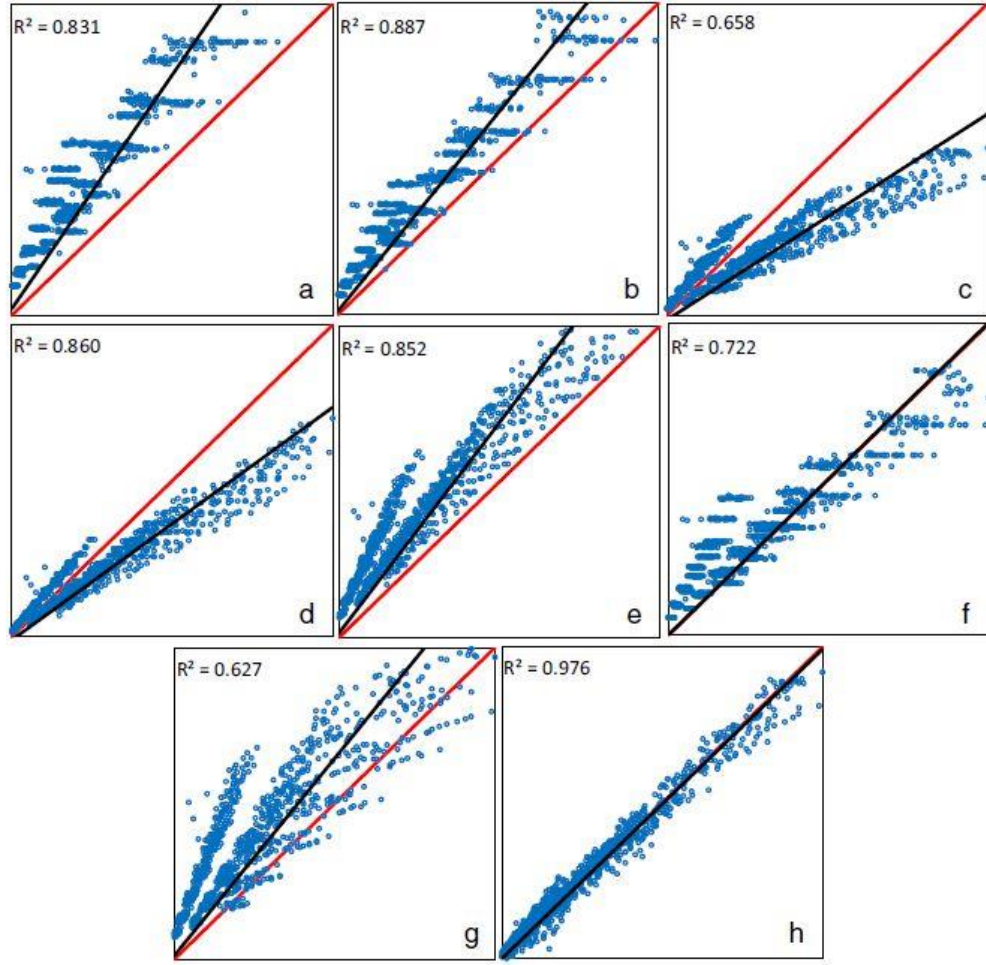
model geliştirmiştir. Bunlardan bazıları Shepherd ve Lapple (1939), Alexander (1949), Stairmand (1949), First (1950), Barth (1956), Casal ve Martinez-Benet (1983), ve Chen ve Shi (2007) modelleri olarak sayılabilmektedir. Siklonlarda gücün harcanmasına dayalı basınç kaybı hesapları, siklondaki karmaşık akış olaylarının etkisiyle neredeyse imkansız olmakta; bu sebeple geliştirilen modellerin hemen hepsi ampirik temellere dayanmaktadır. Ayrıca bu modeller, siklondaki toplam basınç kaybını hesaplamak için kullanılmakta ve basınç kaybı bileşenleri ile ilgili bilgi vermemektedir. Ne var ki verilen modeller siklondaki basınç kaybını tam olarak temsil etmemektedir. Demir (2014) tarafından yapılan çalışmada geliştirilen ampirik model ile literatürdeki farklı modeller kıyaslanmış ve siklondaki basınç kayıplarının önceki modellere göre daha iyi tahmin edildiği ortaya konmuştur (şekil 1.6). Bununla birlikte geliştirilen ampirik model, kolay kullanımı sayesinde saha mühendisleri için faydalı bir yaklaşım sunmaktadır.

Demir modeli, siklondaki toplam basınç kaybını giriş hız yükü sayıları cinsinden tanımlayan ampirik bir model olup, şu şekilde yazılmaktadır:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v_{in}^2 N_H \quad (1.2a)$$

$$N_H = c_1 \frac{ab}{D_e^2} + c_2 \frac{h_b}{D} + c_3 \frac{h_c}{D} + c_4 \frac{S}{D} \quad (1.2b)$$

Burada ΔP toplam basınç kaybı (Pa), ρ gazın özkütlesi (kg/m^3), v_{in} gaz giriş hızı (m/s), N_H siklondaki hız yükü sayısı, a giriş yüksekliği (mm), b giriş genişliği (mm), h_b gövde yüksekliği (mm), h_c konik yükseklik (mm), S ıkış borusu uzunluğu (mm), D_e çıkış borusu çapı (mm), D siklon gövde çapı (mm) ve c_1 , c_2 , c_3 , c_4 regresyon sabitleridir. Regresyon sabitlerinin değerleri sırasıyla $c_1=14.8587 \pm 0.1663$, $c_2=-0.6984 \pm 0.0515$, $c_3=-0.4841 \pm 0.0448$, $c_4=0.5738 \pm 0.1989$ olarak verilmiştir. Verilen belirsizlikler %95 güven aralığındadır. Bu modelle hesaplanan basınç kayıpları ve ölçülen değerler arasındaki determinasyon katsayısı 0.976 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1.6 Basınç kaybı modellerinin deneysel verilerle kıyaslanması (a) Shepherd ve Lapple, (b) Alexander, (c) Stairmand, (d) First, (e) Barth, (f) Casal ve Martinez, (g) Chen ve Shi ve (h) Demir modelleri (Demir, 2014)

Tüm bu modeller için geçerli olan bir husus ise hesaplanan basınç kaybı değerlerinin temiz basınç kaybı olmasıdır. Siklondaki basınç kaybının, artan partiküler madde konsantrasyonuna bağlı olarak azaldığı rapor edilmekte olup (Cortes ve Gil, 2007; Huang vd., 2018), partiküler madde yüküne göre basınç kaybının değişimi Muschelknautz (1972) ve Hoffmann vd. (1992)'de ayrıntılarıyla ele alınmıştır.

Chen ve Shi (2007), siklondaki basınç kaybı bileşenlerini (1) girişteki genişmeden kaynaklanan basınç kaybı (giriş kaybı), (2) gövdedeki sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybı (gövde kaybı) ve (3) çıkıştaki daralma ile çıkış borusundaki sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybı (çıkış kaybı) olarak sınıflandırmış olup, genel kabul girişteki kaybın ihmal edilebilir olduğu ve çıkış kaybının en önemli bileşen olduğu yönündedir (Cortes ve Gil, 2007). Buna

karşın, Karadeniz (2015) tarafından yapılan çalışmada basınç kaybı bileşenlerinin toplam basınç kaybına katkı değerlerinin değişen siklon geometrisi ve işletme şartlarına bağlı olarak değişebileceği görülmektedir. Ayrıca Demir vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada da gövde ve konik kısım yüksekliklerinin siklondaki basınç kaybı üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Siklon performansının bir diğer önemli parametresi partikül tutma verimidir. Basınç kaybı arttıkça tutma veriminin arttığı genel kabuldür. Ancak siklon boyutları ve bazı işletme parametrelerinin değiştirilmesiyle daha düşük basınç kayıplarında daha yüksek verimler elde etmek mümkündür. Örneğin Zhang vd. (2018) yaptıkları çalışmada, siklon boyutları ve biçimleri ile ilgili bazı geometrik modifikasyonlar yapmışlar ve siklonda hem basınç kaybını azaltıp hem de partikül tutma verimini arttırmayı başarmışlardır. Gaz viskozitesi ve siklona beslenen partiküler madde yükü de basınç kaybını düşürücü etkiye sahip olabilmektedir. Çalışmalar, siklonlardaki basınç kaybının partiküler madde yükü ile azaldığını göstermektedir (Muschelknautz, 1972; Hoffmann vd., 1992; Cortes ve Gil, 2007; Chen ve Shi, 2007).

Siklonun geometrik tasarımı, siklonlardaki basınç kaybını olduğu gibi partikül tutma verimini de etkileyen en önemli faktördür. Siklonların geometrik tasarımı içinde giriş genişliği, giriş yüksekliği, silindir boyu, koni boyu, çıkış borusu uzunluğu, çıkış borusu çapı ve koni ucu çapı olmak üzere 7 adet parametre sayılmaktadır. Son yıllarda bu parametrelerin siklon performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur (Elsayed ve Lacor, 2010; 2011a; 2012; Brar vd., 2014; 2015; Demir, 2014; Demir vd., 2016).

Partikül tutma verimi, basınç kaybı parametresiyle doğrudan ilişkili olduğu için gerek deneysel gerek modelleme çalışmalarında, genellikle her iki parametre birden araştırmaya konu olmaktadır. Ancak basınç kaybı parametresini etkilemeden yalnızca partikül tutma verimini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmak da mümkündür. Örneğin Siadaty vd. (2017), siklon çevresinde manyetik alan oluşturmak suretiyle partikül tutma verimini arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada herhangi bir geometrik modifikasyon, boyut değişimi veya gaz akımı

özellikleri değişimi yapılmamıştır. Yani basınç kaybında bir değişim söz konusu olmamıştır. Yayınladıkları sonuçlarda genel tutma veriminin % 1,1 arttığını belirtmişlerdir. PM çapı bazında bakıldığında ise 2 μm çapındaki partiküller için tutulma verimini % 83'ten % 91'e; 4 μm çapındaki partiküller içinse % 98'den % 100'e kadar verim artışı sağlandığını rapor etmişlerdir.

Yeni yüzyılda bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesi sayesinde akışkanların dinamik davranışlarını tahmin etmek için kullanılan yaklaşımlar da büyük ivme yakalamıştır. Yetilmezsoy (2005), optimum siklon çapını tahmin eden yeni bir ampirik model sunduğu çalışmada, çeşitli işletme şartlarında basınç kaybını kontrol eden MATLAB algoritmasının sonuçlarını da paylaşmıştır. Ardından yine Yetilmezsoy (2006) tarafından siklon çapının belirlenmesi amacıyla yapay sinir ağı yaklaşımıyla başka bir çalışma da literatüre kazandırılmıştır. Bir başka bilgisayar tabanlı modelleme çalışmada ise Abdul-Wahab vd. (2014) tarafından seri ve paralel siklon yerleşimleri, genel cebirsel modelleme sistemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Bu şekilde farklı model teknikleri ile siklon araştırmaları artmaya başlamıştır. Siklonlarda gaz akımının dinamiğini simule etmek, oluşan basınç alanlarını, akış alanlarını ve siklon performansını tahmin etmek için Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) modelleri son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir. Deneysel yollarla yapılan siklon çalışmalarına nazaran artık birçok araştırmacı, HAD modelleriyle siklondaki akış özelliklerini ve basınç kaybını tahmin edebilmekte, partikül tutma verimlerini hesaplayabilmektedir. (Avcı ve Karagöz, 2003; Gimbun vd., 2005a; 2005b; Chuah vd., 2006; Azadi vd., 2010; Kepa, 2010; Elsayed and Lacor, 2010; 2011b; 2011c; 2013a; 2013b; Pisarev vd., 2011; Pisarev ve Hoffmann, 2012; Ci ve Sun, 2015; Haig vd., 2016; Hamdy vd., 2017; Chu vd., 2017; Huang vd., 2018; Brar 2018). Ne var ki günümüzdeki çalışmaların hemen hepsi bu modeller üzerine kurulu olup, bu modeller kullanılarak yapılan simülasyonlara atfen değerlendirmeler yapılmaktadır. Ancak kalibrasyon-validasyon olmaksızın modellerden elde edilen veriler her zaman deneysel verilerle örtüşmemektedir. Ayrıca modellerin kullanımı çok fazla zaman ve bilgisayar gücü gerektirdiğinden, sahada çalışan mühendisler için pratik tahminlerin yapılması amacına hizmet etmemekte; model sonuçları bilimsel düzeyde kalmakta ve uygulamaya dönük pratik bilgiler

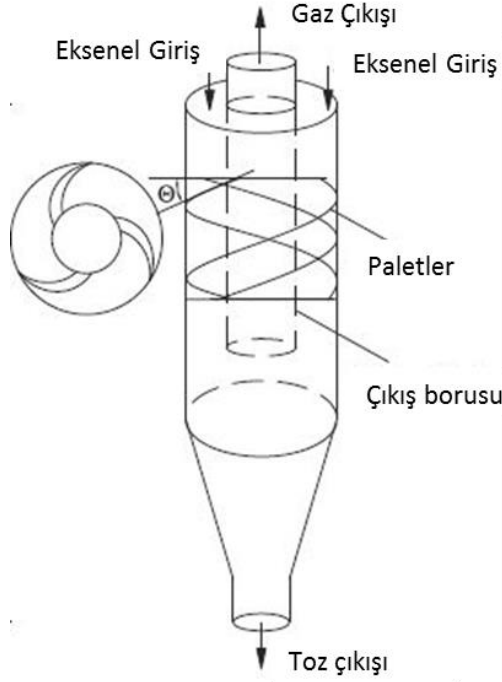
retmesi açısından bu modeller nispeten kısıtlı kalmaktadır. Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri de bu modellerin deneysel veriler kullanılarak kalibrasyon-validasyonu olup, deneysel kalibrasyonun yapıldığı çalışmaların kısıtlı olması, bu yolla elde edilen verilerin değeri artırılmaktadır. Ayrıca deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler pratik anlamda kullanışlı olmakla birlikte, modellerin kalibrasyonu yoluyla bilimsel anlamda da kullanışlı hale getirilmiştir.

Siklon geometrisine ek olarak, giriş yapılarına monte edilen giriş paletleri veya yapılan modifikasyonlar da siklon performansını etkilemektedir. Mevcut çalışmanın temel hedefi de farklı tasarımlara sahip giriş yapısı paletlerinin akış özellikleri ve performansa etkilerinin araştırılmasıdır.

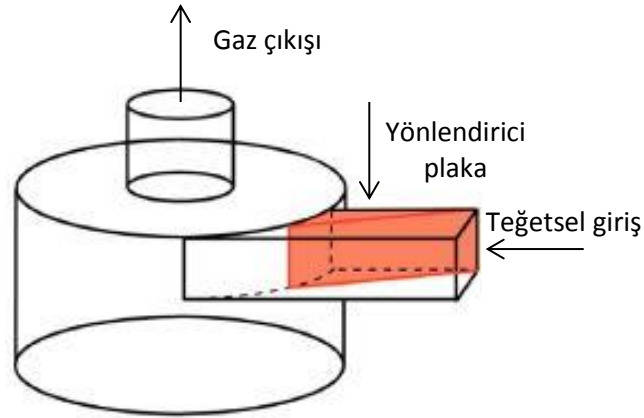
Giriş paletleri ile ilgili olarak mevcut literatür oldukça kısıtlı olup, özellikle son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Uzun yıllar evvel yapılan bir çalışmada (Comas vd., 1991) giriş paleti olan ve olmayan siklonlarda tozlu denemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre giriş paleti basınç kaybını azaltırken, büyük partiküller için tutma verimi değışmemiş; küçük partiküller için ise tutma verimi azalmıştır.

Gong vd. (2012) Şekil 1.7’de gösterilen helezonik girişli bir siklonda dönme açılarının performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ağırlıklı olarak HAD modellerine dayanan çalışmada, basınç ve akış alanlarının düzenli bir görüntü sergilediğı vurgulanmıştır. Çalışmaya göre helezonik dönme açısının toplam basınç kaybı üzerinde güçlü bir etkisi bulunmaktadır. Dönme açısının azalması ile basınç kaybı artmaktadır. PM giderim verimi için elde edilen sonuçlara göre ise partikül çapının azalması ile verimin azaldığı belirtilmiştir. Çalışmaya göre 1 ila 5 µm arasındaki partiküller için siklon, belli bir tutma verimine sahiptir ancak daha küçük partiküller için giderimin mümkün olmadığı rapor edilmiştir.

Wakizono vd. (2015), giriş kanalı içerisine yerleştirdikleri yönlendirici bir plaka (Şekil 1.8) ve çıkış borusu üzerine koydukları halka yapıları ile verimi arttırmaya çalışmışlardır. Bu halka yapıları farklı kalınlık ve yükseklikte tasarlanmıştır. Araştırmacılar, bu yapıları çıkış borusu çevresinde oluşan resirkülasyonu engellemek için tasarladıklarını vurgulamışlar ve bazı durumlar için de kesme çapını azaltıp verimi artırdıklarını rapor etmişlerdir.

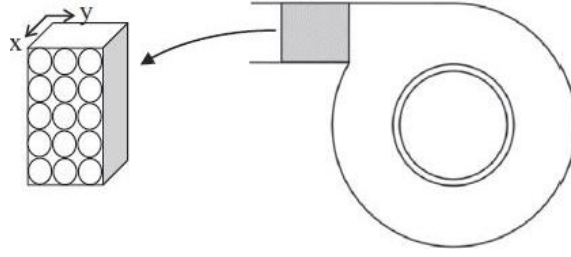


Şekil 1.7 Helezonik girişli siklon (Gong vd. 2012)



Şekil 1.8 Giriş kanalında yönlendirici plaka (Wakizono vd., 2015)

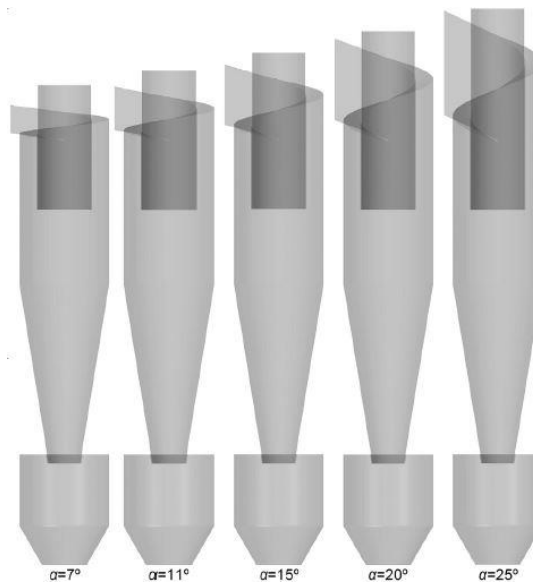
Yapılan başka bir araştırmada Huang vd. (2017), giriş yapısına akım düzleştirici kanallar koymuşlardır (Şekil 1.9). Bu kanalların siklondaki basınç kaybını ortalama %6 civarı artırdığını, tanjant hız bileşenini ise klasik tasarıma göre %2,5 civarı azalttığını rapor etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca kanallar sayesinde girişteki partikül dağılımının daha homojen olduğunu göstermişlerdir. Giriş kanalının iç kısmındaki PM fraksiyonu, akım düzleştirici kanallar ile %20 civarında azalmış ve dış kısmındaki fraksiyon artmıştır. Siklon kesme çapı parametresinin ise $2,04 \mu\text{m}$ değerinden $1,89 \mu\text{m}$ 'ye düştüğünü bildirmişlerdir.



Şekil 1.9 Giriş yapısında akım düzleştirici kanallar (Huang vd., 2017)

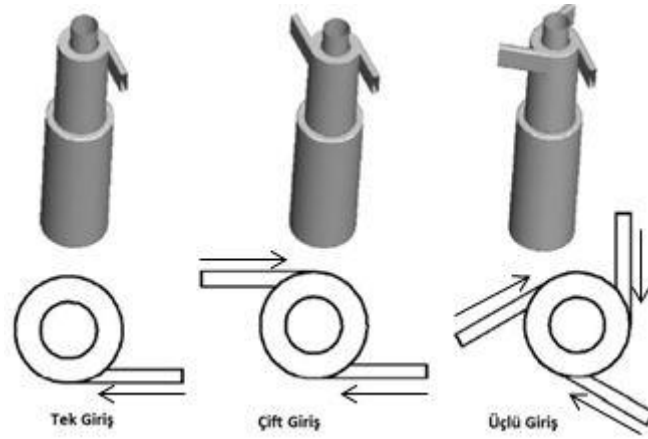
Misiulia vd (2017b), giriş yapısıyla birlikte alçalmaya başlayan ve beş farklı açıdan oluşan helezonik giriş paletlerinin (Şekil 1.10) bir siklonun tutma verimini nasıl etkilediğini numerik olarak araştırmışlardır. Geometride dikkat çeken nokta, giriş yüksekliğinin paletin açısına bağlı olarak değişmesidir. Bu sebeple palet açısının yanı sıra giriş yüksekliği de sonuçlar üzerinde etkin rol oynamaktadır. Çalışmalarında giriş açısının artması ile siklon kesme çapının arttığını, dolayısıyla partikül tutma veriminin azaldığını belirtmişlerdir. Ancak giriş açısındaki artışın, basınç kaybı parametresinde de düşüşe neden olduğu aynı çalışmada rapor edilmiştir.

Juengcharoensukying vd. (2017) de benzer bir çalışma yapmış ve basınç kaybı ve partikül tutma verimi sonuçları açısından benzer eğilimde sonuçlara ulaşmışlardır. Farklı açısal pozisyonlara sahip giriş yapıları ile birlikte, deneysel verilere kıyasla % 3-3,5 civarı partikül tutma verimi düşüşü gözlenmiştir. Basınç kaybında giriş modifikasyonu ile birlikte 100 Pa kadar avantaj elde edilmiştir.



Şekil 1.10 Farklı açılarda giriş paletleri (Misiulia vd., 2017b)

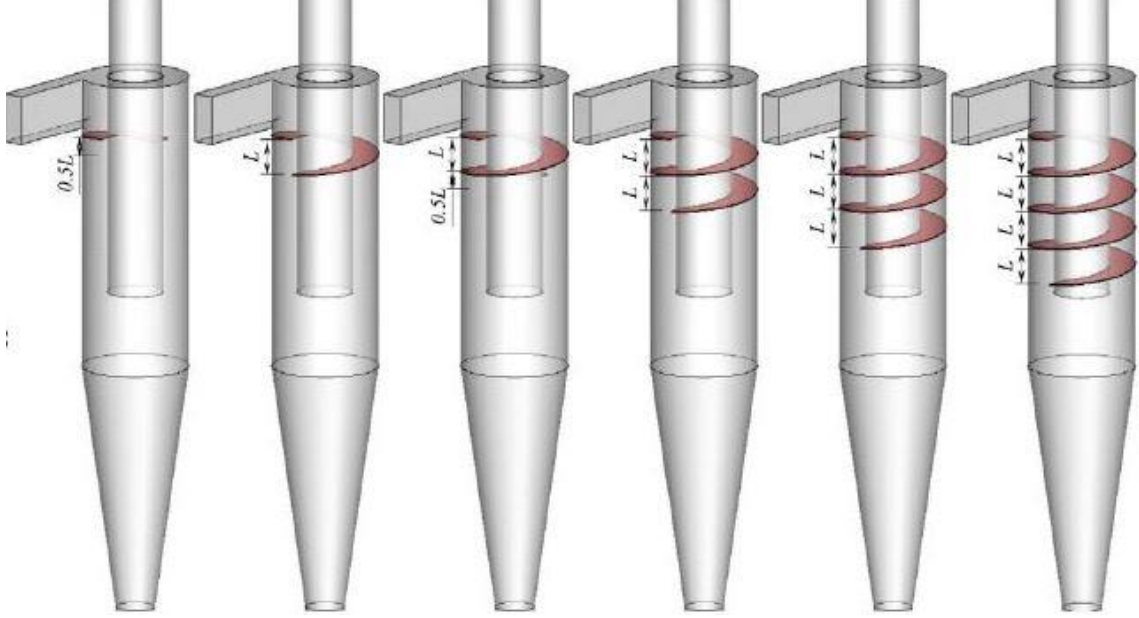
Yakın zamanda Safikhani vd. (2018), yeni bir siklon tasarımı ve bu tasarıma ilave 3 farklı giriş versiyonu üzerinde çalışmıştır (Şekil 1.11). Siklona önce paralel ve aynı dairesel yönlü iki giriş yapısı, sonra ise aynı dairesel yönlü ancak 60° aralıklarla üç giriş yapısı ilave etmişlerdir. Ardından da bu yeni tasarımlarda performans incelemesi yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre üç girişli siklonda, tek ve çift girişliye göre daha fazla partikül tutma verimi gözlenmiştir. Aynı zamanda üç girişli siklonun bir diğer avantajı da basınç kaybı parametresi açısından daha düşük değerlere sahip oluşudur.



Şekil 1.11 Farklı sayıda giriş yapısına sahip siklonlar (Safikhani vd., 2018)

Zhou vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, teğetsel girişli bir siklona farklı tur sayısına sahip taban paletleri yerleştirilmiş ve bu paletlerin performansa etkileri araştırılmıştır (Şekil 1.12). Elde ettikleri sonuçlara göre düşük hızlarda (10-15 m/s) spiral paletlerin basınç kaybına etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Yüksek hızlarda ise basınç kaybında gözle görünür değişimlerin olduğunu belirtmişlerdir. Bir tam tur ve altındaki dönüş sayısına sahip paletlerin olduğu siklonlarda, palet yapısının basınç kaybını azaltıcı etkiye sahip olduğunu vurgulayan araştırmacılar, artan palet turu sayısı ile basınç kaybının tekrar arttığını belirtmişlerdir. Sonuçlar PM tutma verimi açısından incelendiğinde de benzer eğilimler ortaya çıkmaktadır. Bir tam tura kadar taban paletlerinin etkisi, tüm gaz giriş hızları için negatif etkiye sahiptir. Ancak dönüş sayısı arttıkça verimin artmaya başladığını rapor etmişlerdir. Sonuçlar içerisinde dikkat çeken önemli bir husus vardır. Gaz giriş hızı arttıkça aynı tasarım siklonlar için basınç kaybı da artmaktadır. Ancak tutma verimi için durum farklıdır. 10 m/s gaz giriş

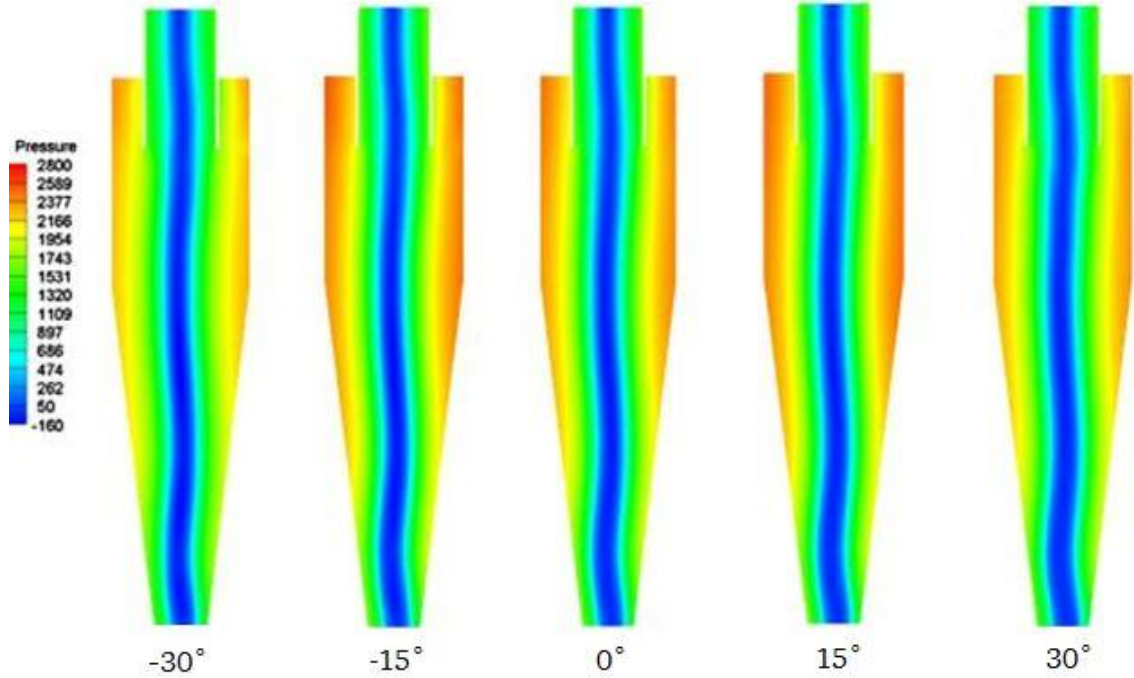
hızından 25 m/s mertebelerine kadar tutma verimleri artmaktadır. Giriş hızını daha arttırdıklarında verimlerin tüm siklonlar için düşüş gösterdiği çalışma sonucunda kaydedilmiştir. Bu durum, tutma verimi parametresi için bir optimum giriş hızı düşüncesini doğrular niteliktedir.



Şekil 1.12 Farklı turlarda taban paletlerine sahip siklonlar (Zhou vd., 2018)

Wasilewski ve Brar (2019) yaptıkları model çalışmasında giriş kanalını yatay ve dikey doğrultuda farklı açılarda bükerek, performans analizi yapmışlardır. Hem basınç kaybı hem de PM tutma verimi sonuçlarında, seçtikleri baz tasarıma göre ($\pm$ % 3-4) dalgalı sonuçlar elde etmişlerdir. Araştırmaları model tekniklerine yoğunlaşsa da temel olarak giriş yapısının performansı etkileyen bir parametre olduğunu bir kez daha göstermişlerdir. Aynı çalışmanın bir benzeri de Wang vd. (2019) tarafından yapılmıştır. Yalnızca dikey doğrultuda değişen giriş açlarına sahip siklonlarda performansın incelendiği bu çalışmada, pozitif ve negatif açılarda basınç kaybının önce arttığı sonrasında ise azaldığı görülmektedir (Şekil 1.13). Giriş açısındaki değişimler, PM tutma verimi sonuçlarına da aynı eğilimle etki etmişlerdir. Yani giriş açısının pozitif veya negatif yönde artmasıyla önce artış gösteren tutma verimi, açının daha da genişlemesiyle azalma göstermektedir. Çalışmada en iyi tutma veriminin ise, giriş kanalının $+15^\circ$ bükülmesi (yukarı yönlü) ile elde edildiği rapor edilmiştir. Bu açıdaki bir giriş yapısı, partiküler maddeyi doğrudan aşağı yönlü bir hareketle siklona sokacaktır.

Ancak çalışmada +30° açılı giriş yapısı için verimin düştüğü rapor edilmiştir. Buradan hareketle giriş açısındaki artışla verim arasında doğrusal bir ilişki kurmak yanlış olacaktır.



Şekil 1.13 Dikey doğrultuda değişen giriş açılarına sahip siklonlarda statik basınç haritaları (Wang vd., 2019)

Anlaşıldığı üzere giriş yapısı üzerinde yapılan modifikasyonlar siklon performansı üzerinde bariz bir etkiye sahiptir. Konunun bilimsel anlamda araştırmaya açık olması sayesinde, yapılabilecek onlarca değişiklik ile giriş yapısının performansa etkisine dair çok sayıda daha araştırma çalışması yapılması olasıdır. Özellikle son yıllarda konu hakkındaki çalışmaların artış göstermesi, literatürde halihazırdaki boşluğun bir göstergesidir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada giriş yapısından başlayan ve gövdeyi de içine alan bir takım modifikasyonlar ile siklon performansının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla giriş yapısını siklon merkez çizgisine kadar kapalı bir koridor halinde devam ettiren, sonrasında ise kademeli olarak farklı tur sayılarında alçalan ve akımı aşağı yönlü harekete zorlayan palet (helezonik tavan) yapıları tasarlanmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, özellikle son zamanlarda yapılan araştırmaların büyük bir kısmının yalnızca modelleme çalışmalarından oluştuğu

görülmektedir. Yapılan bu çalışmanın önemli bir avantajı da deneysel verilere dayanmasıdır. Laboratuvar ortamında detaylı bir çalışmanın ürünü olan siklon deney düzeneğinde, çalışmaya konu tüm tasarımlar, istenilen çalışma şartlarında denenmiştir. Ardından elde edilen deneysel veri ile HAD modelleri kalibre edilmiş ve güvenilir model sonuçları ortaya çıkmıştır. Bu sebeple, kullanılan model metodolojisi benzer fiziksel şartlara sahip çalışmalar için rahatlıkla uygulanabilir durumdadır.

1.2 Tezin Amacı

Hava kirliliği kontrolü alanında siklonlar, atık gazlardan Partiküler Maddeleri (PM) ayırmak amacıyla 100 yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Düşük yatırım maliyetleri, hareketli parça barındırmaması ve düşük bakım-onarım maliyetleri, görece düşük işletme maliyetleri, iyi eğitilmiş personel ihtiyacının düşük olması ve hatta sıcaklık, basınç, partiküler madde yükü ve atık gazın korozyif özellikleri gibi işletme parametreleri açısından çok uç noktalarda çalışabilmesi, siklonların endüstriyel uygulamalarda çok tercih edilen bir kontrol cihazı olmasına katkı sağlamaktadır. Bugün giderek katılan PM emisyon limitleri göz önünde bulundurulduğunda, elektrofiltreler, ıslak arıtıcılar ve torbalı filtreler gibi daha yüksek verimli sistemlere ihtiyaç duyuluyor olsa da, bu sistemlerin PM yüküne karşı hassas olmaları ve yatırım-işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, en azından bir ön arıtım sistemi olarak siklonlar halen popülerliğini korumaktadır. Bu bağlamda, önümüzdeki yıllarda da siklonların geniş kullanım alanı bulacağı aşikardır. Bir ön arıtma sistemi olarak kullanılmalarının yanı sıra, PM özellik ve boyutu ile arıtma hedeflerine bağlı olarak siklonların ana kontrol cihazı olarak kullanıldığı durumlar da mevcuttur.

Kullanılmaya başlandığı 19. yüzyıl sonlarından beri siklonlar, birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve önemli bir araştırma konusu olmuştur. Buna rağmen, aradan geçen yıllardan sonra bile siklonlarda gerçekleşen basınç alanlarının nasıl şekillendiğine dair etkin faktörler halen tam olarak anlaşılamamıştır. Siklonlarda gaz akışı ve akış çizgilerinin siklon içindeki dağılımı, oluşan basınç alanlarının bir fonksiyonu olup, hem siklondaki toplam basınç kaybını ve hem de PM tutma verimini etkileyen en önemli faktördür. Bu

anlamda tezde, siklonlardaki akış alanlarının ve bunun siklon performansı üzerindeki etkilerinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ana konusu, farklı tasarıma sahip giriş paletlerinin siklon performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar iki temel başlık altında toplanabilir: Deneysel çalışmalar ve model çalışmaları. Yapılan deneysel çalışmalarda öncelikle, seçilen siklonların gövdeleri ve giriş yapıları üzerinde yeni tavan yapısı (palet) ve giriş kanalları ilavesi ile modifikasyonlar yapılmıştır. Sonrasında ise gaz giriş hızı ve debisi, giriş ve çıkış toz miktarı, PM tutma verimi, basınç kaybı gibi parametrelerin ölçümü ve hesapları gerçekleştirilmiştir. Dozlanan ve tutulan tozlar üzerinde boyut dağılımı analizleri de deneysel çalışmalar kapsamında yapılmıştır. Elde edilen veriler, giriş yapılarında kullanılan paletlerin basınç kaybı ve partikül madde tutma verimi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli kalibre edilmiş ve siklonlardaki basınç ve hız alanları modellenmiştir.

1.3 Hipotez

Siklonlarda işletme performansı çeşitli kriterlere bağlıdır. Bu kriterlerin başında ise geometri (siklon yapı elemanlarının ayrı ayrı boyutları ve şekilleri) gelmektedir. Örneğin çıkış borusu çapı veya giriş yapısı kesit alanı arttıkça basınç kaybının azalacağı öngörülebilir. Yine geometrik olarak gövde uzunluğunun artmasının, tutulma mesafesini artırması ve sonuç olarak partikül tutma verimini artırması beklenebilir. Yapılan tez çalışmasında da standart siklon geometrisi üzerinde palet yapısı modifikasyonu ile performansın olumlu yönde etkilenmesi öngörülmüştür. Palet yapısının, partiküllere dikey yönde etki eden yerçekimi kuvvetine paralel bir etki ile verime olumlu etki edebileceği, ancak tanjant hız bileşenini olumsuz etkileyerek de verimi azaltabileceği düşünülmüştür. Yine aynı palet yapılarının etkin tur sayısını azaltması ve sürtünme kaynaklı basınç kayıplarını azaltması öngörülmüştür. İşte bunlar ve benzeri fikirlerden yola çıkılarak çalışmanın hedefleri ve yol haritası oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında klasik siklon tasarımlarının yanında farklı açılarda üretilen tavan yapıları (palet) ile siklon performansı, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Elde edilen basınç kaybı ve partikül tutma verimi verilerine göre işletme maliyet analizleri yapılmıştır. Sonuçlar neticesinde, siklonun kullanım alanına (ön arıtma ve nihai arıtma) göre seçilen tasarımların farklılık gösterebileceği anlaşılmıştır. Çalışma ile kullanıcının, partikül tutma veriminin yanında basınç kaybı parametresini de işletme aşamasında dikkate alması gerektiği ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışmanın literatüre en önemli katkısı, palet yapısı kullanımının fayda/maliyet oranını dikkat çekici ölçülerde artırması olarak özetlenebilir.

2.1 Siklonlar ve Palet Tasarımları

Çalışma kapsamında kullanılan siklonlar ve palet tasarımları belli kurallar çerçevesinde seçilmiştir. Bilindiği üzere siklonlar giriş yapısı, gövde, konik kısım ve çıkış borusu olmak üzere dört temel parçadan oluşmaktadır. Siklonlar 290 mm gövde çapına (iç çap) sahip olup, 1,5 mm siyah sacdan imal ettirilmiştir. Deneysel amaçlı çalışmalarda daha ucuz malzeme ile benzer yapıları inşaa etmek mümkündür. Ancak Sedrez vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada da görüldüğü üzere artan gaz giriş hızı ve partikül yükü, yüzey erozyonu oluşumunda başlıca etkenlerdir. Mevcut çalışmada da farklı giriş hızları ve toz dozajı ile siklon iç yüzeyinin zamanla aşınacağı bilindiğinden, deneylerin eşit şartlarda yapılması adına dayanımı yüksek malzeme seçilmiştir. Paslanma risklerine karşı bütün malzemeler statik boya ile boyanarak fırınlanmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Siklon yapı elemanları. *Soldan sağa; giriş yapısı ve gövde, çıkış borusu, konik kısım*

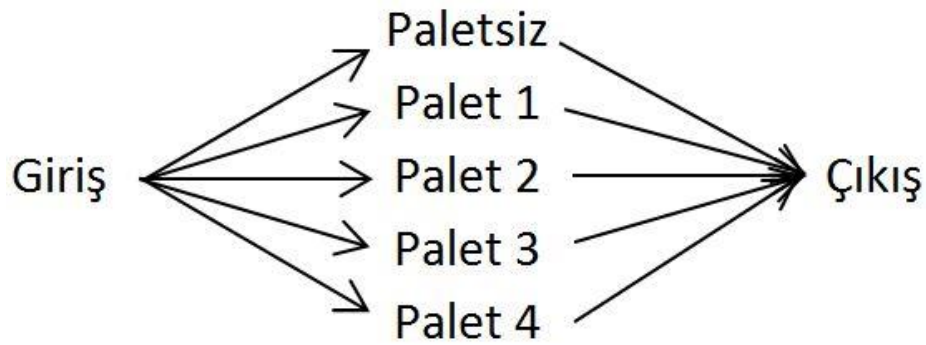
Çalışmalarda kullanılan siklonlarda gövde ve konik kısım geometrisi Stairmand yüksek verimli siklon tasarımı baz alınarak belirlenmiştir. Giriş ve çıkış yapıları

ise belli kriterler ($a \leq S$ ve $b \leq \frac{1}{2}(D-D_e)$) dikkate alınarak seçilmiştir. Bu kriterlere göre oluşturulan deney setinde sekiz farklı siklon bulunmaktadır. Tablo 2.1’de ilgili siklonların ölçüleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Deneylerde kullanılan siklonların boyutları

D= 290 mm gövde çapına göre oranlar						Gerçek Uzunluklar (mm)					
Giriş		Gövde	Koni	Çıkış		Giriş		Gövde	Koni	Çıkış	
a	b	h_b	h_c	D_e	S	a	b	h_b	h_c	D_e	S
0,4	0,2	1,5	2,5	0,4	0,5	116	58	435	725	116	145
0,5	0,3			0,5						145	
				0,6						174	

Boyutları üstteki tabloda verilen sekiz siklonun her birine dört ayrı palet monte edilebilmektedir. Siklonun gövde, koni ve çıkış borusu uzunluğu boyutları sabit olmak üzere seçilen bir giriş ve çıkış yapısı ile palet seçimine bağlı olarak beş farklı siklon inşa edilebilmektedir (Şekil 2.2). Uygulama ve değerlendirmede kolaylık sağlaması açısından siklonlara, boyutlarına ve üstündeki paletlere göre harf ve rakamlarla kısa kodlar verilmiştir (Tablo 2.2).



Şekil 2.2 Bir giriş ve bir çıkış yapısı ile elde edilen 5 varyasyon

Tablo 2.2 Deneylerde kullanılan siklonların kodlandırılması

Grup	Giriş ($b-a$)	Çıkış (D_e)	Palet	Siklon
A1	$0,2D-0,4D$	$0,4D$	0	A1-0
			1	A1-1
			2	A1-2
			3	A1-3
			4	A1-4
A2	$0,2D-0,4D$	$0,5D$	0	A2-0
			1	A2-1
			2	A2-2
			3	A2-3
			4	A2-4
A3	$0,2D-0,4D$	$0,6D$	0	A3-0
			1	A3-1
			2	A3-2
			3	A3-3
			4	A3-4
B1	$0,2D-0,5D$	$0,4D$	0	B1-0
			1	B1-1
			2	B1-2
			3	B1-3
			4	B1-4
B2	$0,2D-0,5D$	$0,5D$	0	B2-0
			1	B2-1
			2	B2-2
			3	B2-3
			4	B2-4
B3	$0,2D-0,5D$	$0,6D$	0	B3-0
			1	B3-1
			2	B3-2
			3	B3-3
			4	B3-4
C1	$0,3D-0,4D$	$0,4D$	0	C1-0
			1	C1-1
			2	C1-2
			3	C1-3
			4	C1-4
D1	$0,3D-0,5D$	$0,4D$	0	D1-0
			1	D1-1
			2	D1-2
			3	D1-3
			4	D1-4

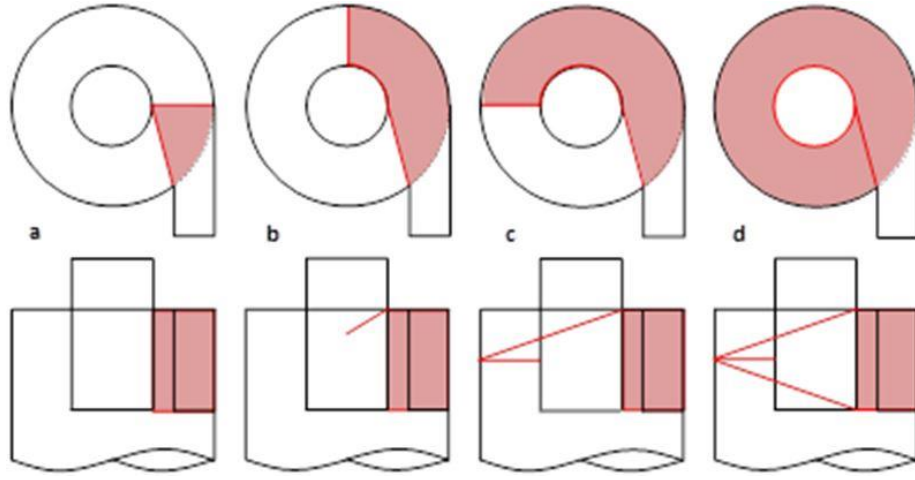
Öncelikle siklonlar sekiz gruba ayrılmıştır. Her grubun ilk siklonu, palet olmayan siklon (Palet 0) olarak belirlenmiştir. Ardından birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü paletler sırasıyla Palet 1, Palet 2, Palet 3 ve Palet 4 olarak numaralandırılmıştır. Boyutları $0,2D-0,4D$ olan giriş yapısı ile çapı $0,4D$ olan çıkış borusu kombinasyonu ile birinci grup (A1) oluşturulmuştur. Gruplarda harf ifadesi, grubun giriş yapısını temsil etmektedir. Ardından gelen rakam çıkış yapısını temsil etmekte, sonrasında ise siklondaki paletin numarası gelmektedir. Örneğin siklonda palet yoksa A1-0, dördüncü palet kuruluysa A1-4 olarak isimlendirilmektedir. Diğer gruplar da aynı yöntemle belirlenmiş ve isimlendirilmiştir.

Tabloda C1 ve D1 gruplarının ikinci ve üçüncü formlarının olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi $b \leq \frac{1}{2}(D-D_0)$ kuralından kaynaklanmaktadır. Bu siklonlarda giriş genişliğinin 87 mm olması, 145 mm ve 174 mm çapa sahip çıkış boruları ile kombinasyonuna izin vermemektedir.

Kullanılan tüm siklonlar için farklı açılardaki giriş paletleri, ilgili siklona özel olarak 1,5 mm kalınlığında paslanmaz çelikten imal ettirilmiştir. Paletlerin siklon içerisindeki duruş pozisyonları Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Tüm paletlerin taban yapısı, giriş kanalı tabanından siklon merkez çizgisine kadar uzanmaktadır. Girişten hemen sonra kısa devre ihtimalinin ve iç kesimlere kaçışın önüne geçmek için paletlerin yan duvarları, giriş yüksekliği ile aynı yüksekliğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yan duvarlar, giriş kanalının iç duvarının devamı olacak şekilde çıkış borusunun dış yüzeyine kadar uzanmaktadır. Bu şekilde giriş yapısı, merkez çizgisine kadar tam bir kapalı koridor halinde devam etmektedir. Aslında anlatılan bu yapı, her bir siklona yaptırılan 1 nolu paleti temsil etmektedir. Nötral palet olarak isimlendirilen bu palet yapısı, rampasız olarak imal ettirilmiştir (Şekil 2.3.a). Tüm palet tasarımlarında siklon merkez çizgisine kadar aynı yapı mevcuttur. İkinci, üçüncü ve dördüncü paletlerdeki farklılık, bulundurdıkları rampalardan ileri gelmektedir.

İkinci palet tasarımı, siklon merkez çizgisinden itibaren 90°'lik bir yayı dolaşan ve bu dönüş sırasında giriş yüksekliğinin $\frac{1}{4}$ 'ü kadar alçalan bir rampadan oluşmaktadır (Şekil 2.3.b). Bu paletin tabanı ilk paletle aynı olup tavan duvarı,

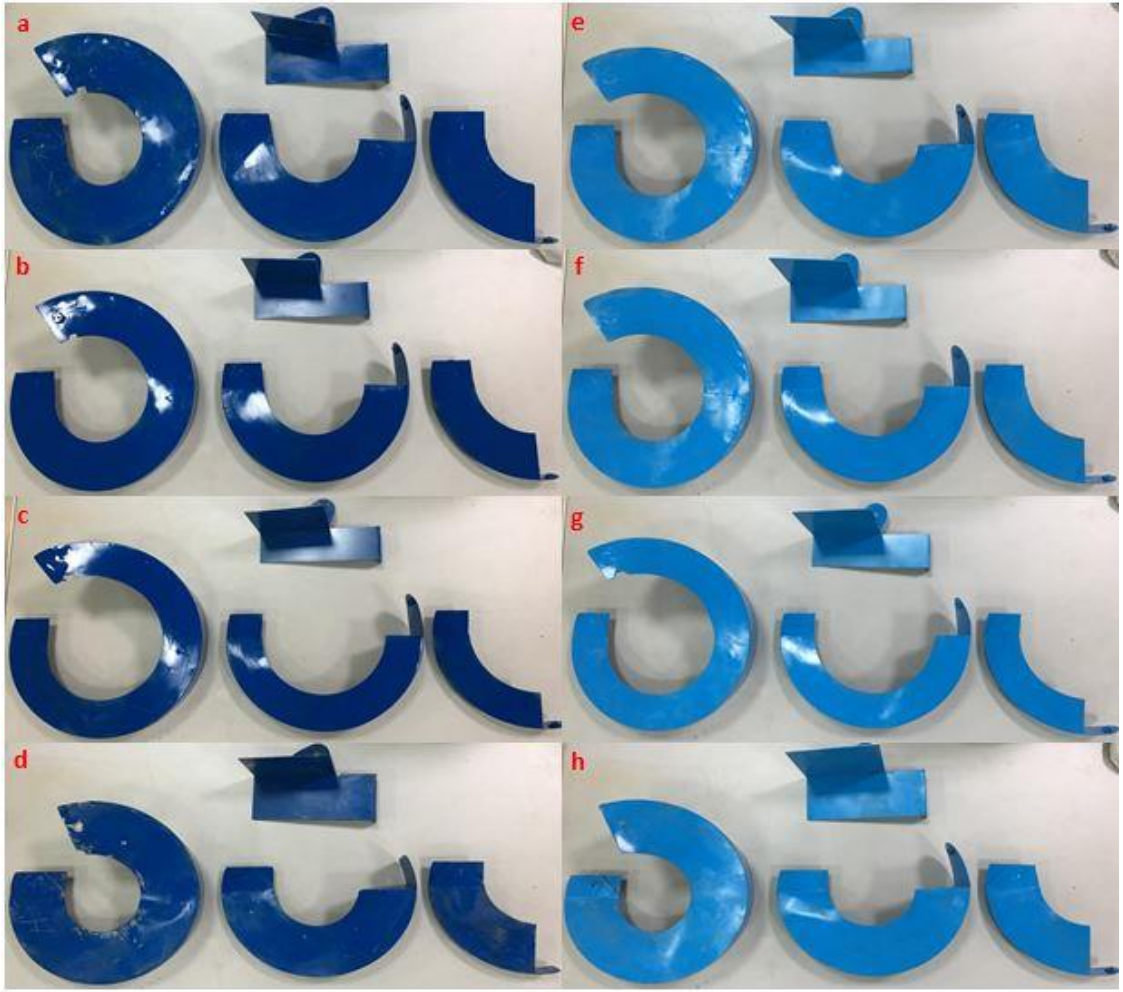
giriş tabanının bittiği yerden sonra üniform olarak alçalmakta ve gaz akımını aşağı yönlü harekete zorlamaktadır. Üçüncü palette bu rampa yapısı, ikinci paletle aynı yerden başlamaktadır. Ancak 180°'lik bir yay çizmekte ve giriş yüksekliğinin yarısı yüksekliğinde alçalmaktadır (Şekil 2.3.c). Son olarak dördüncü palet yapısının rampası ise diğer paletlerde olduğu gibi aynı noktadan başlayıp, giriş yüksekliğinin tamamı kadar üniform olarak alçalmakta ve dönüşünü, giriş yapısının tabanı ile birleştiği yerde tamamlamaktadır (Şekil 2.3.d).



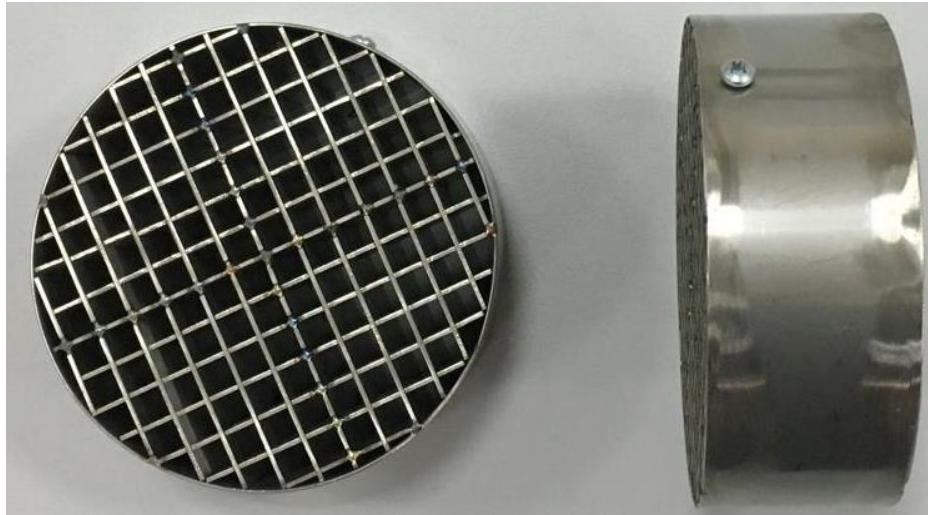
Şekil 2.3 Siklonlara yaptırılan giriş paletlerinin görünüşleri; (a) Palet 1, (b) Palet 2, (c) Palet 3, (d) Palet 4

Yaptırılan bu paletlerin tasarımları geometrik olarak aynı hesaba dayansa da boyutlarında farklılıklar mevcuttur. Bunun sebebi, her palet grubunun sadece bir siklona uygun olacak şekilde yaptırılmasıdır. Çıkış borusu çapındaki değişimler palet genişliğini belirleyen faktör olmaktadır. Yaptırılan paletler Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Çıkış borusu çapının, palet genişliğine etkisi de bu şekilde açıkça görülmektedir.

Siklon çıkış borusu içerisinde oluşan kuvvetli vorteksi düzgün hale getirmek için akım düzleştirici aparatlar yaptırılmıştır (Şekil 2.5). Parçalar, çıkış borusu içerisine tam oturacak şekilde 110 mm çapında, 40 mm derinliğinde ve 8 mm ızgara açıklığında imal ettirilmiştir. Bu aparatların kullanım amacı, dairesel yapıdaki siklon çıkışında var olan kuvvetli girdabı kırarak, yapılan basınç ölçümlerinin daha sağlıklı olarak gerçekleştirilmesidir.



Şekil 2.4 Çalışmalarda 8 farklı siklon tasarımı için yaptırılan palet grupları; (a) A1, (b) A2, (c) A3, (d) C1, (e) B1, (f) B2, (g) B3, (h) D1



Şekil 2.5 Akım düzleştirici parça

Klasik siklon tasarımına ek olarak, kullanılan siklonların konik kısımlarının alt ucuna bağlanmak üzere toz biriktirme hazneleri yaptırılmıştır (Şekil 2.6). Hazne derinliği, gaz akımında herhangi bir düzensizliğe neden olmayacak kadar derin tasarlanmıştır. Rahatlıkla sökülüp takılabilen yapıya sahip bu haznelerin kullanımı ile siklonda tutulan toz miktarı ölçülmüştür.



Şekil 2.6 Toz biriktirme haznesi

2.2 Deney Düzeneği

Deneyisel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği laboratuvarı bünyesinde kurulan siklon deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Düzenek, siklonların yanı sıra bir adet radyal fan, askı aparatı, toz besleme hunisi ve dijital manometreden oluşmaktadır. Deneyisel çalışma için gerekli bu malzemelerin bir araya getirilmesi, 2016 yılında tamamlanan 2012-05-02-KAP04 nolu proje sayesinde olmuştur.

Deney düzeneğinde kullanılan radyal fan 7,2 kW gücünde olup, özel bir sürücüye sahiptir (Şekil 2.7). Bu sürücü sayesinde fan motorunun hızı değiştirilebilmektedir. Sürücü dijital olup, 20–50 Hz arasında çıkış üretmektedir ve kolayca ayarlanabilmektedir. Sürücü kontrolü ile birlikte fanın maksimum debisi $1.500 \text{ m}^3/\text{sa}$ (ortam şartlarında), basıncı ise 1.000 mm su sütunu (yaklaşık 10.000 Pa) olmaktadır.

Siklon askı aparatı çelik profilden imal edilmiştir. Askı aparatında siklon gövdesindeki sarsılmaları engellemek için iki adet kemer yapılmış olup, siklonlar

bu kemerlere lastikle bağlanmaktadır. Ayrıca, siklonun yukarıdan asılabilmesi için iki kollu dairesel bir askı da mevcuttur. Askı aparatı, mevcut silonlar için özel olarak tasarlanmış olup, farklı giriş yüksekliği ile farklı gövde ve koni uzunluklarına sahip siklonlar asıldığında siklonların giriş ağzının yerden yüksekliği sabit kalmakta ve bağlantı kolaylığı sağlamaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.7 Radyal fan



Şekil 2.8 Özel tasarım askı aparatı

Basınç kaybı ölçümleri için fark basınç, pozitif basınç ve vakum ölçümleri yapabilen Honeywell DPTM1000D dijital manometre kullanılmıştır (Şekil 2.9).

Bu ölçümler yalnızca siklonlarda meydana gelen basınç kaybını görmek için yapılmamıştır. Detayları Demir vd. (2018)'de paylaşıldığı şekilde fark basıncı ölçümüne dayalı olarak gaz akımının debisini belirlemek ve ayarlamak üzere de dijital manometreden yararlanılmıştır.



Şekil 2.9 Dijital manometre

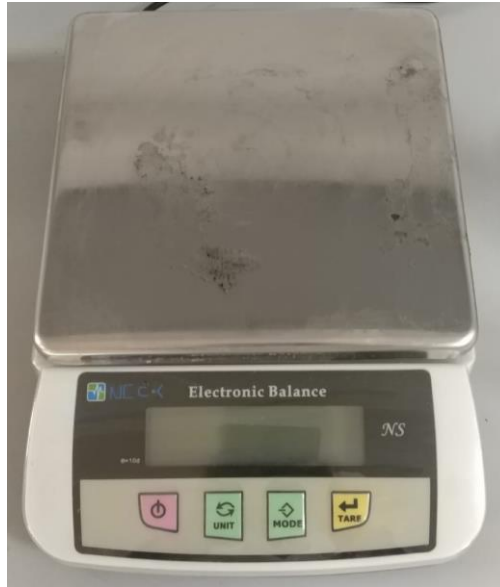
Laboratuvar deney düzeneği ile siklonlarda basınç kaybı ve genel tutma verimleri araştırılmıştır. Kullanılan tozun boyut dağılımını belirlemek üzere YTÜ Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan Malvern-Hydro 2000 MU marka Mastersizer cihazından faydalanılmıştır (Şekil 2.10). Cihaz, $0,02 \mu\text{m}$ ila $2000 \mu\text{m}$ aralığında kalan partiküllerin boyut analizini yapabilmektedir.

Cihaz, ölçümleri MIA ve Fraunhofer adı verilen iki farklı teoriye göre gerçekleştirebilmektedir. MIA teorisinde ölçüm yapılan malzemenin refraktif indeks değerleri cihaz programına girilmelidir ve her malzeme için bu değer farklılık göstermektedir. Uçucu kül için yapılan literatür taraması sonucunda refraktif indeks değerinin 1,6 olduğu belirlenmiştir (Jewell ve Rathbone, 2009). Fraunhofer teorisine göre malzeme için refraktif indeks bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır.



Şekil 2.10 Partikül boyut dağılımının belirlenmesinde kullanılan cihaz

Dozlanan ve tutulan tozlar başta olmak üzere muhtelif tartım işlemleri için bir adet Lucky Star marka NS-3200B model tartı cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.11). Cihaz 0,1 gr hassasiyetle 3000 gr ağırlığa kadar tartım yapabilmektedir.



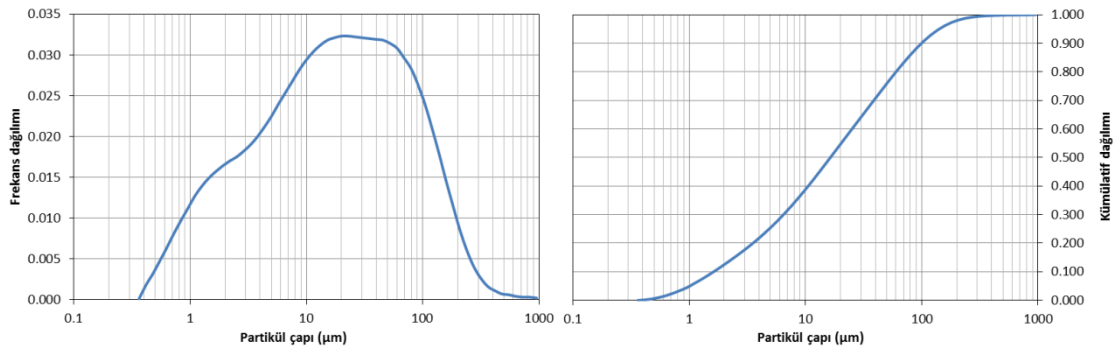
Şekil 2.11 Tartım cihazı

2.3 Toz Seçimi ve Özellikleri

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde ortamdan çekilen havanın partikül yüklü bir atık gaza dönüşmesi gerekmektedir. Bu amaçla siklona girmeden önce temiz iç ortam havasına dozlanacak partiküler madde cinsine karar vermek için ön çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda en kullanışlı tozun uçucu kül olduğu görülmüştür. Akıcı bir şekilde dozlanması, yüksek hızlı gaz akımına karıştığı anda dağılması ve iç yüzeylerde birikim yapmaması gibi avantajları

sebebiyle uçucu külün kullanılmasına karar verilmiştir. Bilindiği üzere termik santraller veya yüksek sıcaklıkta yakma prosesi içeren tesislerde de en belirgin PM kaynaklı hava kirliliği problemi uçucu küldür. Bu yaklaşımla bakıldığında da, bir hava kirliliği kontrol cihazı araştırması olan bu çalışmada uçucu kül kullanımının uygun olacağı düşünülmüştür. Termik santrallerin nihai atığı kabul edilen ve sadece BS EN 450-1:2012 standartlarına uygun olan uçucu küller, hazır beton üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda AKÇANSA Çimento San. ve Tic. A.Ş. firması ile iletişime geçilmiş ve ihtiyaç duyulan uçucu külün temini sağlanmıştır.

Temin edilen uçucu külün genel özellikleri hakkında fikir sahibi olmak için YTÜ Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Malvern marka Mastersizer Hydro 2000MU model analiz cihazında boyut dağılım analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen boyut dağılım grafiği Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Mastersizer partikül boyut dağılım analiz sonucu

Boyut analizinde partikül dağılımı yaklaşık 60 kanalla elde edilmekte, yani boyut dağılımını ifade etmek için yaklaşık 60 adet partikül çapı kullanılması gerekmektedir. Bu kadar fazla partikül çapının HAD simülasyonlarında tozlu denemeler yaparken problem oluşturabileceği öngörülmüştür. Simülasyonlarda her bir partikül boyut aralığı için ayrı birer toz enjeksiyonu (DPM enjeksiyonu) yapılması gerektiğinden sadece bir siklon için işlemleri tamamlamak, masaüstü bilgisayarda aylar mertebesinde zaman alabilecektir. Bu sebeple, partikül boyut dağılımını daha basite indirgemek ve simülasyonlarda işlem yükünü azaltmak adına partikül boyutlarının bir dağılım fonksiyonuyla verilmesi daha avantajlı olmaktadır. Bu çalışmada, elde edilen boyut dağılımı verilerinin bir dizi dağılım

fonksiyonuna uygunluğu test edilmiş ve analiz sonuçları bu dağılım fonksiyonlarıyla ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu dağılım fonksiyonları arasında en uygun sonuçları veren ikili Rosin-Rammler ve log-normal dağılım fonksiyonlarıdır.

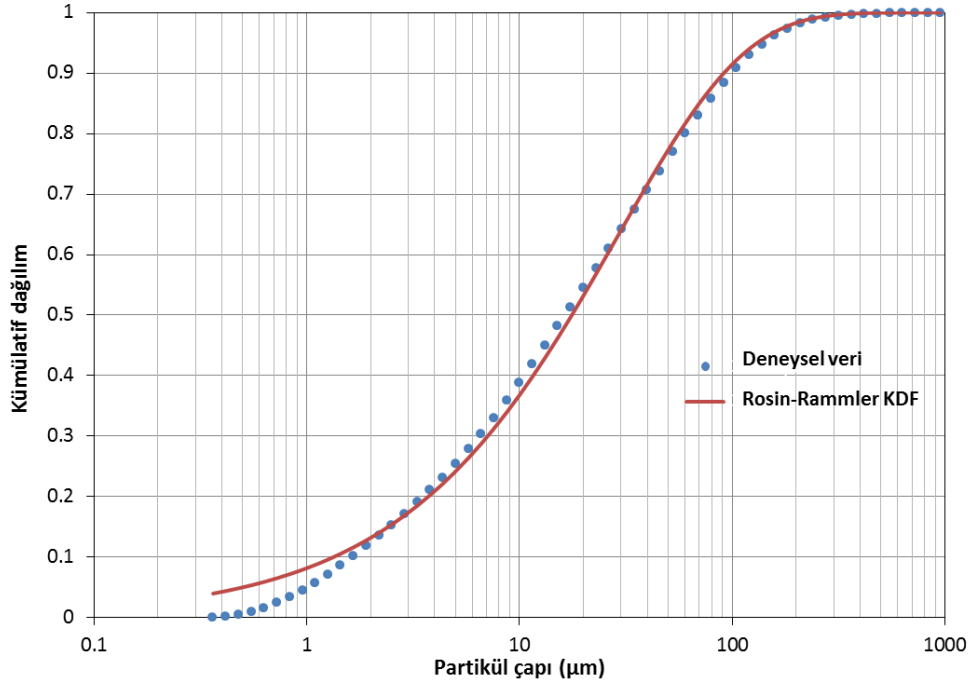
Rosin-Rammler dağılım fonksiyonu bazı mineral ürünlerin boyut dağılımını açıklamak amacıyla sık olarak kullanılan bir fonksiyondur ve kümülatif dağılım fonksiyonu (KDF) aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$G(d_p, d_{80}, m) = 1 - \exp \left[\left(\frac{d_p}{d_{80}} \right)^m \ln 0.2 \right] \quad (2.1)$$

Burada d_p partikül boyutu, d_{80} partiküllerin %80'inin en büyük çapı, m dağılımı açıklayan parametre ve G kümülatif dağılım değeridir ('den küçük dağılım). Bu fonksiyonun tersi ise

$$d_p(G, d_{80}, m) = d_{80} \sqrt[m]{\frac{\ln(1 - G)}{\ln 0.2}} \quad (2.2)$$

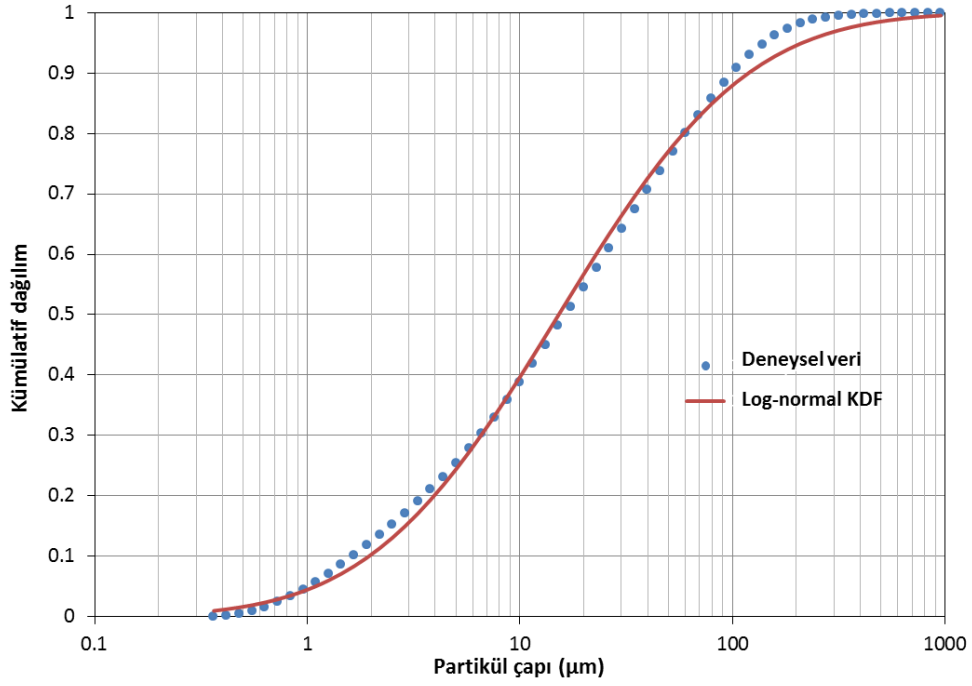
olarak verilmektedir. Boyut dağılımı analiz sonuçlarının Rosin-Rammler dağılımına sahip olup olmadığını test etmek amacıyla daha önce geliştirilmiş olan MNLR 2.0 isimli bir yazılım kullanılmıştır (Demir vd., 2017). Bu yazılım, MS Excel Visual Basic for Applications (VBA) tabanlı çalışan bir regresyon yazılımıdır ve Gauss-Newton yöntemini kullanarak çoklu, doğrusal olmayan regresyon yapmaktadır. MNLR 2.0 yazılımında bağımsız değişken d_p ve bağımlı değişken G değerleri olmak üzere regresyon denklemi olarak Denklem 2.1'de verilen Rosin-Rammler kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılmış ve d_{80} ile m parametreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Rosin-Rammler dağılımı ile partikül boyut dağılımını en iyi şekilde ifade etmek için $d_{80}=55,88 \mu\text{m}$, $m=0,73$ kullanılması uygundur. Bu değerlerle elde edilen kümülatif dağılım grafiği Şekil 2.13'da gösterilmiştir. Regresyonda elde edilen determinasyon katsayısı $R^2=0,9978$ 'dir. Elde edilen parametrelerle birlikte $d_{10}=1,334 \mu\text{m}$, $d_{50}=17,63 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=91,30 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmaktadır. Rosin-Rammler fonksiyonu, boyut dağılımını yeterli seviyede temsil edebilmekle birlikte, dağılımın en küçük % 5'lik kısmında oldukça zayıftır.



Şekil 2.13 Rosin-Rammler kümülatif dağılım grafiği

Rosin-Rammler KDF parametrelerini belirlemek için uygulanan regresyon prosedürünün bir benzeri log-normal dağılım parametrelerini belirlemek amacıyla da kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre medyan çap ve standart sapma sırasıyla $d_{50}=15,22 \mu\text{m}$ ve $\sigma_g=4,98 \mu\text{m}$ 'dir. Bu değerlerle elde edilen kümülatif dağılım grafiği Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Elde edilen parametrelerle birlikte $d_{10}=1,947 \mu\text{m}$, $d_{50}=15,22 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=119,2 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmaktadır. Log-normal dağılım fonksiyonu da boyut dağılımını güçlü bir şekilde temsil etmektedir ($R^2=0,9981$). Rosin-Rammler fonksiyonundan farklı olarak, en küçük %5'lik dilimde değil %90 ile %98 dilimleri arasında temsil yeteneği zayıflamaktadır.

Boyut dağılımı incelenen toz numunesinin siklonlarda kullanılacağı düşünüldüğünde, log-normal dağılım fonksiyonunun zayıf kaldığı %90-%98 dilimleri arasındaki partiküllerin siklonda %100 verimle tutulmaları öngörülebilir (yaklaşık 120 μm ile 400 μm arasındaki partiküller). Bu yaklaşımla, simülasyonlarda log-normal partikül dağılımını kullanmak daha akıllıca olmaktadır.



Şekil 2.14 Log-normal kümülatif dağılım grafiği

Çalışmada kullanılan tozun rutubetsiz ortamda saklanmasına özellikle dikkat edilmiştir. Li vd. (2019) yaptıkları çalışmada, 10 μm üstü partiküllerin nem içeriğinin artmasıyla partikül tutma veriminin de arttığını, daha düşük çaplı partiküllerin ise artan nem içeriğiyle birlikte azalan bir tutulma verimi eğiliminde olduklarını gözlemlemişlerdir. Uçucu külün boyut dağılımına bakıldığında içeriğindeki taneciklerin neredeyse yarıya yakını 10 μm civarı ve altında çapa sahiptir. Bu sebeple partiküllerin sahip olabileceği nem içeriğinin yanıltıcı sonuçlar doğurabileceği düşünülmüş ve saklama koşulları bu doğrultuda ayarlanmıştır. Nem içeriğinin yüksek olmasının bir diğer olumsuz etkisi de toz dozajındaki homojenliği bozmasıdır. Deneylerin tekrar edilebilirliği ve gerçeğe uygun atık gaz akımı elde etmek için girişte homojen bir toz dağılımı olması önemlidir.

2.4 Deneysel Yöntem ve Analiz

Bilindiği üzere siklona giren partiküller iki farklı yolla siklondan ayrılırlar. İlki siklonda tutulduktan sonra taban kısmındaki çıkıştan toplanan, ikincisi ise tutulamayan ve çıkış borusundan gaz akımıyla birlikte siklonu terk eden kısımdır. Siklonda tutulan toplam toz miktarının siklona giren toplam toz

miktarına oranı genel tutma verimini vermektedir. Aynı yaklaşım kısmi tutma verimleri için de uygulanabilir. Bu durumda kısmi tutma verimlerinin hesaplanması için hem dozlanan hem de tutulan partiküller üzerinde boyut dağılım analizi yapılmalıdır.

Deneyler üç farklı giriş hızı için beşer tekrar olacak şekilde organize edilmiştir. Hız seçimi, literatüre göre siklonlarda uygun giriş hızı aralık değerleri dikkate alınarak yapılmıştır (Wang vd., 2003; Faulkner ve Shaw, 2006; Wasilewski vd., 2018). Böylelikle üç farklı toz konsantrasyonu elde edilmektedir.

Deneylerde dozlanacak toz miktarına karar verilirken, temin edilen uçucu kül miktarı ve öngörülen toplam deney sayısı göz önüne alınmıştır. Yapılan hesaplar neticesinde her deneyde 500 g civarında toz dozajı yapılması uygun görülmüştür.

Deneyisel çalışmalar üç farklı aşamada açıklanacak olursa ilk aşama, deneyin hazırlık aşaması olarak düşünülebilir. Deneylerde verim hesabı yapmak için dozlanan ve tutulan partikül miktarını bilmek gerekmektedir. Bu amaçla ilk önce dozlanacak tozun tartımı yapılmıştır. Ardından tutulan tozun miktarının hesaplanması için, siklonların konik kısmına bağlanan ek dolum haznesinin darası alınmıştır. Sonrasında ise fan çalıştırılarak her bir çalışma için istenen debi değeri ayarlanmıştır. Atık gazın debisi ve siklon giriş boyutları bilindikten sonra giriş hızı hesaplanmıştır. Deneyler sırasında siklon giriş yapısında ve çıkışı borusu üzerinde yer alan basınç ölçüm noktalarından alınan ölçümler ile siklondaki toplam basınç kaybı da belirlenmiştir. Son olarak ölçülen ve hesaplanan her değer belli bir düzen dahilinde hazırlanan deney föyünde kayıt altına alınmıştır.

Deneyin ikinci aşamasında siklon giriş kanalının hemen üstünde bulunan bir açıklıktan belirli bir süreyle huni vasıtasıyla toz beslemesi yapılmıştır. Uçucu kül içerisine karışmış olabilecek kaba taneciklerin toz konsantrasyonunu etkilememeleri ve siklona zarar vermemeleri için huninin üstüne bir elek yerleştirilmiştir. Bu elek sayesinde toz dozajı daha homojen ve dengeli hale gelmiştir.

Deneyin üçüncü aşamasında ise son tartımlar yapılarak dozlanan ve tutulan partiküler madde miktarı bulunmuştur. Bu sayede ilgili siklon için genel tutma verimi ve kesme çapı değerleri hesaplanmıştır.

Siklonlarda genel tutma verimlerinin yanında performans değerlendirmesinin bir diğer önemli kriteri de kesme çapıdır. Kesme çapı, bir siklonda % 50 verimle tutulabilen partiküllerin aerodinamik çapı olarak ifade edilmektedir. Bir siklonun tasarım aşamasında genel verimini tahmin etmek üzere kesme çapı hesaplanır. Siklonun genel tutma verimi arttıkça kesme çapı azalmaktadır. Bu sebeple kesme çapı parametresinin düşük olması arzu edilir. Çalışmalara konu siklonlarda Denklem 2.3 ile kesme çapları hesaplanmıştır. Burada η , ilgili siklondaki verim; d_c , kesme çapı; d_p ise dozlanan partiküllerin medyan çap değeridir. Her siklon için dozlanan partiküllerde boyut dağılım analizleri yapılmış ve d_{50} değerleri 15-16 μm civarında tespit edilmiştir.

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_c}{d_p}\right)^2} \quad (2.3)$$

Son olarak, laboratuvar çalışmaları sırasında gerekli görülen iş sağlığı ve güvenliği hususlarına dikkat edilmiştir. Sert ve ağır malzemeler olan siklon parçalarının sökölüp takılması sırasında çelik burunlu ve yalıtkan tabanlı özel iş ayakkabısı giyilmiştir. Boyutları mikronlar mertebelerinde olan uçucu kül ile çalışmalar yapılırken BS EN 149:2001 standartlarına uygun FFP3 koruyucu maske kullanılmıştır. Diğer rutin işlerde de muhtelif iş güvenliği ekipmanları düzenli olarak kullanılmıştır.

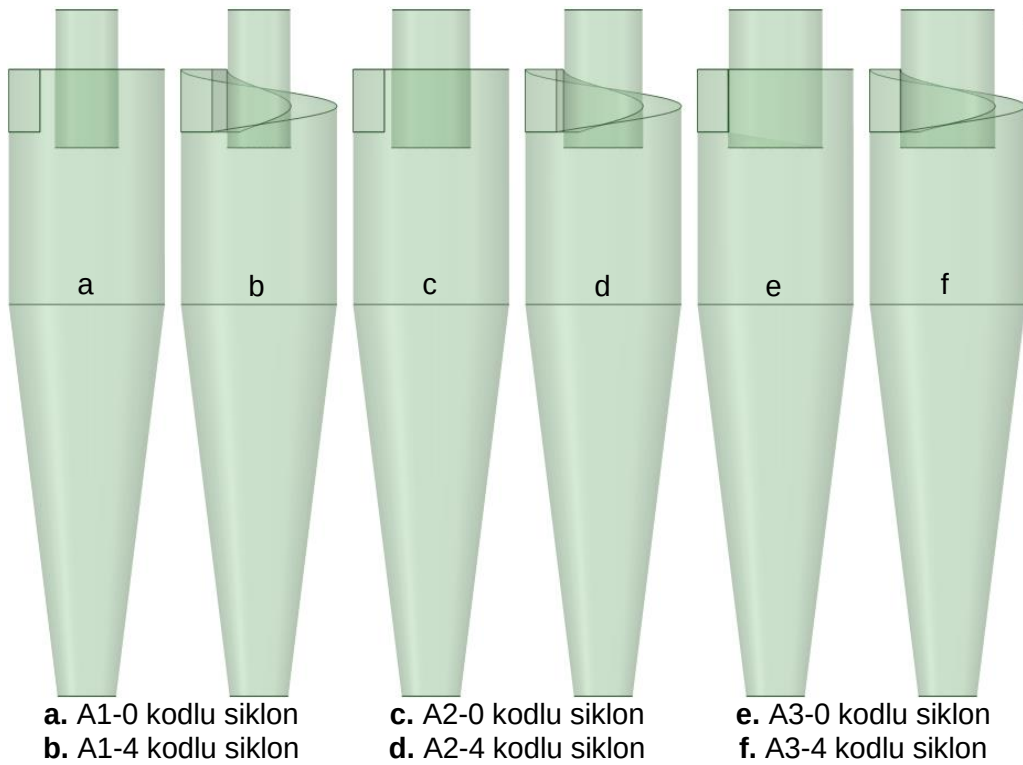
2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modellemesi

Tez çalışması kapsamında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelleri yapılmıştır. Modelleme aşaması için sistem özellikleri Tablo 2.3'te verilen bilgisayar temin edilmiştir. Gerekli kurulum ve kalibrasyon sürecinin tamamlanmasıyla, deneysel çalışmaları sona eren siklonlarda performans, bilgisayar destekli modellerle incelenmiştir. Çalışmalarda HAD yazılımı olarak 'ANSYS Fluent' programı kullanılmıştır.

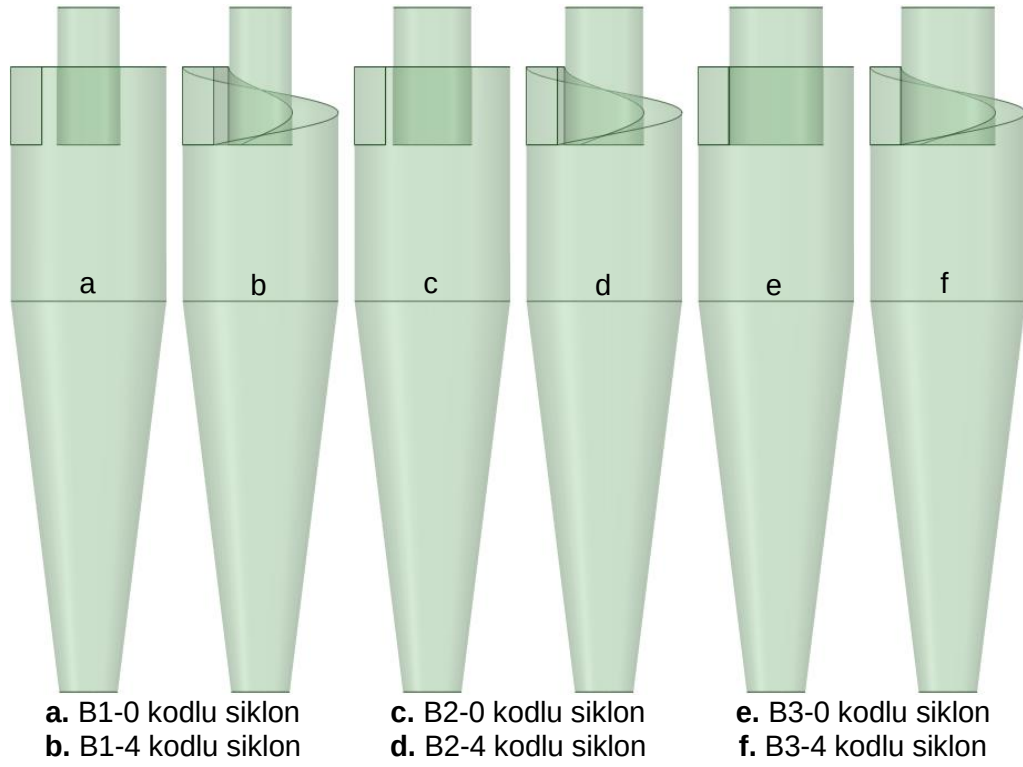
Tablo 2.3 HAD modelleri için kullanılan bilgisayarın temel sistem özellikleri

İşlemci	Intel® Core™ i7-7700K CPU @ 4.20GHz
Yüklü Bellek (RAM)	16.0 GB @ 2133 MHz
Sistem Tipi	64-Bit
Anakart	MSI Bazooka H270M
Ekran kartı	nVidia Geforce GT730

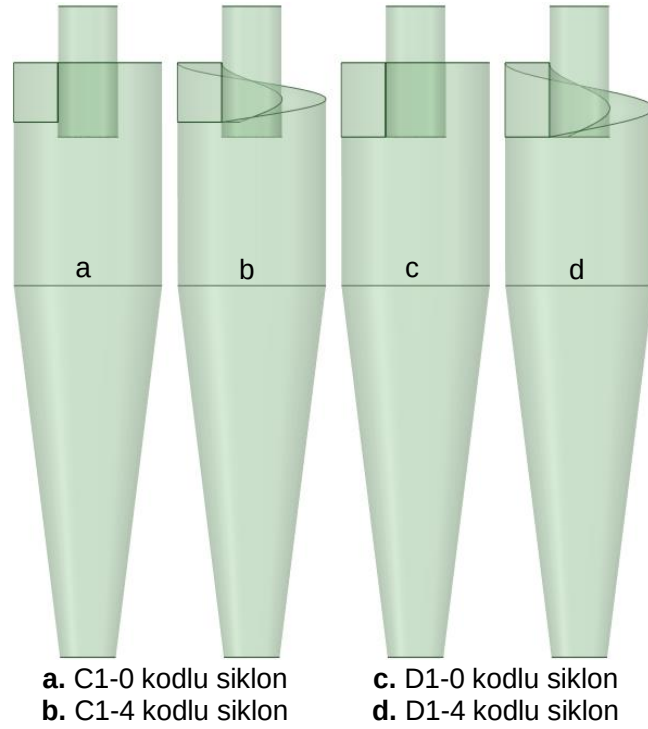
HAD simülasyonları yapmak için gerekli ilk adım, modelin gerçekleşeceği ortamın tüm boyutlarıyla bilgisayar ortamına aktarılmasıdır. Mevcut çalışmada bu ortam siklondur. Çalışmanın bu aşamasında ilk olarak, deneysel çalışmalarda kullanılan siklonların üç boyutlu çizimleri yapılmış ve programa aktarılmıştır. ANSYS programı ile uyumlu SpaceClaim yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen çizimler, siklon grup kodlarına göre Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Çizimlerden de anlaşılacağı üzere her bir siklon grubunda yalnızca paletsiz ve tam tur paletli siklonlar için HAD modellemesi yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre diğer siklonların performans düzeyleri, paletsiz ve tam tur paletli siklonlar ile kıyaslandığında oldukça zayıf kalmaktadır. Bu sebeple iş yükü ve zaman tasarrufu açısından, arada kalan siklonlarda model çalışması yapılmamıştır.



Şekil 2.15 A tipi siklonlarda nötral (düz) ve helezonik tavanlar



Şekil 2.16 B tipi siklonlarda nötral (düz) ve helezonik tavanlar



Şekil 2.17 C ve D siklonlarda nötral (düz) ve helezonik tavanlar

HAD modellerinde ikinci adım, akışın gerçekleştiği ortamda ağ tabakası oluşturulması ve geometrideki tüm yüzeylerin isimlendirilmesidir. Bu amaçla

ANSYS Meshing Module paketi kullanılmıştır. Ağ tabakası boyutlandırması için uygulanan program özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir. Akış alanında duvar olarak tanımlanan yüzeylerin etkilerini minimize etmek için de sınır tabakaları oluşturulmuştur. Tanımlanan sınır tabakası değerleri de Tablo 2.5'te verilmiştir.

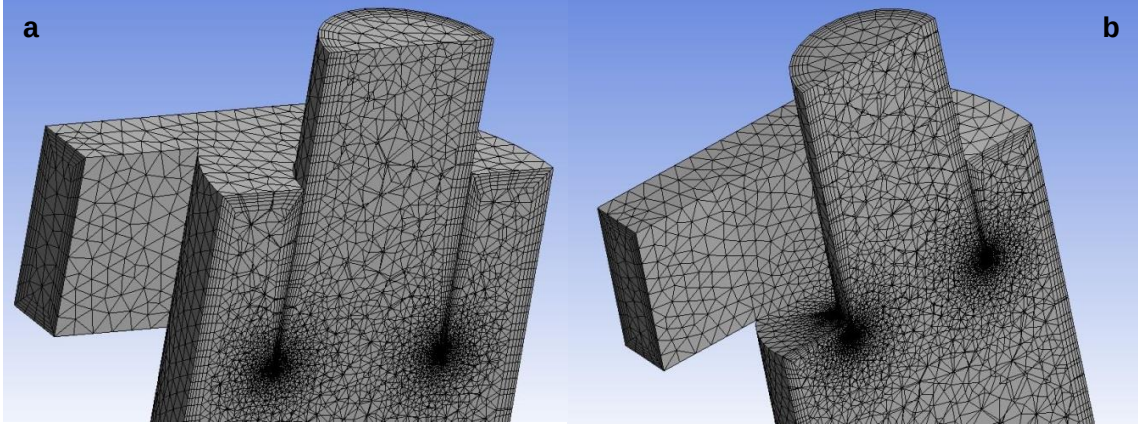
Tablo 2.4 Ağ tabakası boyutlandırması

Sizing	
Use Adaptive sizing	No
☐ Growth Rate	Default (1,20)
☐ Max Size	Default (3,2084e-002 m)
Mesh Defeaturing	Yes
☐ Defeature Size	Default (8,0209e-005 m)
Capture Curvature	Yes
☐ Curvature Min Size	Default (1,6042e-004 m)
☐ Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Capture Proximity	Yes
☐ Proximity Min Size	Default (1,6042e-004 m)
☐ Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
Minimum Edge Length	5,8e-002 m

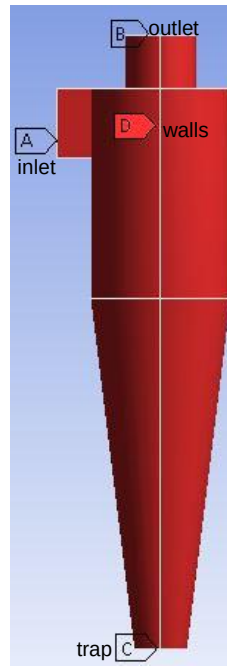
Tablo 2.5 Sınır tabakası değerleri

Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection
Inflation Option	Smooth Transition
☐ Transition Ratio	0,272
☐ Maximum Layers	5
☐ Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Tüm siklon geometrilerinde oluşturulan ağ tabakalarına örnek olması açısından Şekil 2.18'deki gösterim incelenebilir. Siklonlarda giriş genişliği, çıkış çapı, palet bulunup bulunmaması gibi faktörlere bağlı olarak 1.000.000 ila 2.000.000 ağ sayısına kadar 'meshing' yapılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı üzere akımın geniş alanlarda aktığı bölgelerde ağ yapıları daha büyükken, sürtünmenin fazla olduğu yüzeye yakın bölgelerde daha sıkı ağ yapıları (Inflation) görülmektedir.



Şekil 2.18 Ağ tabakası işlenmiş geometri (a) Düz tavan, (b) Helezonik tavan



Şekil 2.19 Siklondaki akışkan yüzeylerin isimlendirilmesi

Şekil 2.19'daki gibi isimlendirilmiş ve bu yüzeylerde sınır şartlar tanımlanmıştır. B yüzeyindeki sınırlayıcı tabaka, A yüzeyindeki sınırlayıcı tabakadan başlayan akış alanındaki havanın sistemden çıktığı yer olarak belirlenmiştir ve buradaki statik basınç değeri 101325 N/m^2 olarak tanımlanmıştır. Siklonun giriş kısmı olarak isimlendirilen 'inlet' bölgesine modelin çalıştırıldığı hız değerleri (10 m/s, 13,5 m/s, 17 m/s ve 20,5 m/s) ve partiküllerin bu bölgeden giriş yapabilmesi için Discrete Phase Model (DPM) kısmına 'reflect' seçeneği girilmiştir. Ardından çıkış bölgesi olarak isimlendirilen 'outlet' bölgesine istenilen çıkış basıncı değeri tanımlanmış ve partiküllerin bu bölgeden kaçabilmesi için DPM kısmı 'escape'

olarak seçilmiştir. Tutulma bölgesi olarak adlandırılan ‘trap’ bölgesinde partiküllerin tutulabilmesi için DPM seçeneği ‘trap’ olarak, duvar bölgesi olarak adlandırılan ‘walls’ bölgesinden partiküllerin yansıyabilmesi için ise DPM seçeneği reflect olarak seçilmiştir.

HAD modellerinde üçüncü adım programın çözüm aşamasıdır. Çalışmaya konu olan siklonlarda uygulanan ‘ANSYS Fluent’ analiz parametreleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6 ANSYS FLUENT analiz parametreleri

Analiz Seçenekleri	Özellikler
Solver Type	Pressure Based
Time	Steady
Turbulence Model	Viscous
	RSM
	Linear pressure-strain
	Standard wall function
Solution Method	SIMPLEC
Spatial Discretization	Gradient : Least Squares Cell Based
	Pressure : Presto!
	Momentum: QUICK
	Turbulent Kinetic Energy: Second Order Upwind
	Reynolds Stresses: Second Order Upwind

Basınç ve hız parametrelerinin analizi yapıldıktan sonra siklonlarda bu parametrelere dair renkli haritalar oluşturulmuştur. Bu sayede geometrinin tüm yüzeylerinde veya alınan herhangi bir kesitinde tanjant hız veya basınç gibi parametrelerin değerleri rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Çalışma kapsamında analiz edilen siklonlarla ilgili sonuçlar, ilgili başlıkta detaylarıyla sunulmuştur.

Partikül dozlamasının yapıldığı kısım Discrete Phase Model (DPM)’dir. Partikül izleme parametreleri ve DPM özellikleri girildikten sonra partikül dozlaması yapılmıştır. Her bir modele 0,5 μm ile 9 μm aralığındaki partiküller dozlanmıştır. 0,5 μm ’den 5 μm ’ye kadar 0.5 μm aralıklarla, 5 μm ’den 9 μm ’ye 1.0 μm aralıklarla olmak üzere toplam 14 farklı boyutta partikül dozlanmıştır. DPM sonuçlarına göre her siklon için kesme çapı değerleri ele edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve deneysel verilerle birlikte kıyaslaması da ilgili başlıkta verilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar, çalışmanın türüne göre ayrı başlıklar altında sunulmuştur. Öncelikle laboratuvar ölçekli analizleri içeren deneysel sonuçlar, ardından bu sonuçlardan elde edilen verilerle yapılan maliyet analizleri ilgili başlıklarda paylaşılmıştır. Son olarak da yine deneysel sonuçlar kullanılarak kalibre edilen HAD modelleme çalışmalarının sonuçları okuyucuya sunulmuştur.

3.1 Deneysel Sonuçlar

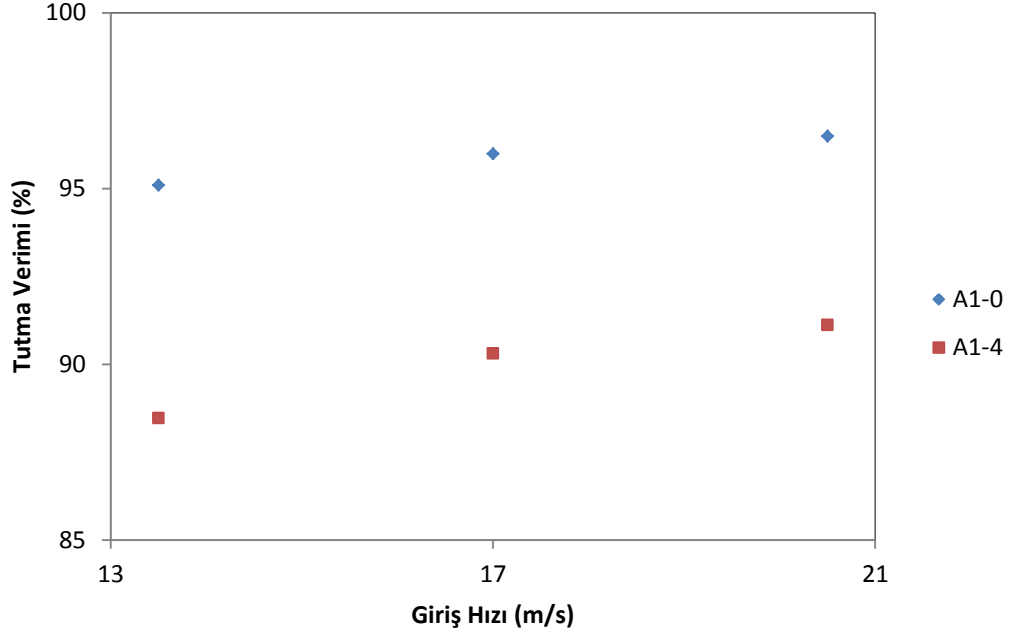
Palet tasarımlarının standart tavanlı bir siklona göre performansa etkileri ilk olarak deneysel yolla araştırılmıştır. Siklonların 1, 2 ve 3 nolu paletli versiyonlarında partikül tutma verimi değerlerinin, helezonik tavanlı (4 nolu palet) ve standart siklonlara oranla oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında basınç kaybı parametresi de aynı siklonlar için helezonik ve standart tavanlı siklonlara oranla düşük ölçülmüştür. Ancak 4 nolu paletlere sahip siklonlarda basınç kaybı açısından elde edilen avantajın yanında tutma verimlerinde görülen azalma, diğer paletlere oranla daha düşüktür. Bu durumu bir örnekle açıklamak gerekirse; A1 kodlu siklonda 17 m/s giriş hızı için standart tavanlı siklonda (A1-0) ölçülen basınç kaybı 1350 Pa seviyesindedir. A1-3 ve helezonik tavanlı A1-4 siklonlarında ise basınç kayıpları sırasıyla 530 Pa ve 710 Pa dolaylarındadır. A1-3 siklonu % 60 kadar basınç kaybı azalmasına neden olurken A1-4 siklonunda % 50 civarı bir avantaj sağlanmıştır. Aynı siklonlarda partikül tutma verimleri cinsinden bir kıyaslama yapıldığında, A1-0 siklonunda % 96 civarında olan verim değerinin A1-3 siklonunda % 23 kadar azalarak % 74 mertebelerinde olduğu görülmüştür. A1-4 siklonunda ise yaklaşık %91 verimle yalnızca % 5'lik bir azalma söz konusudur. Benzer sonuçlar tüm siklon gruplarının 1, 2 ve 3 nolu paletleri için geçerlidir. Bu sebeple palet yapısının genel siklon performansına etkisi incelenirken, helezonik ve standart tavanlı siklonların kıyaslanabilirliğinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Sonuçlara dair

karşılaştırmalı grafiksel inceleme ve maliyet analizleri de yalnızca helezonik ve standart tavanlı siklonlar üzerinden yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar için belirlenen üç farklı gaz giriş hızı değeri, 10 m/s, 13,5 m/s ve 17 m/s'dir. Nitekim B, C ve D grubu siklonlarda bu giriş hızları ile çalışmalar yapılmıştır. A grubu siklonlar ise çalışmalar kapsamında yer alan siklonlar içerisinde en küçük giriş kesit alanına sahip olanlardır. Böylece düşük debilerde diğer siklonlara oranla daha yüksek giriş hızlarına çıkabilme imkanı sağlamaktadır. Dolayısıyla çok daha az enerji sarfiyatı olmaktadır. Ancak bu durum, düşük giriş hızlarında çalışmak için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Çalışmalarda ihtiyaç duyulan hava debisini sağlayan radyal fan, bu siklonlarda ihtiyaç duyulan 10 m/s'lik en düşük giriş hızını sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Başka bir ifadeyle bu hız değerine ulaşmak için gereken debi, fanın çalışma aralığının altında kalmaktadır. Bu nedenle tüm A gruplarında üç farklı giriş hızı değerini kıyaslamak adına en düşük hız 13,5 m/s, ortanca hız 17 m/s ve en yüksek hız 20,5 m/s olarak belirlenmiştir.

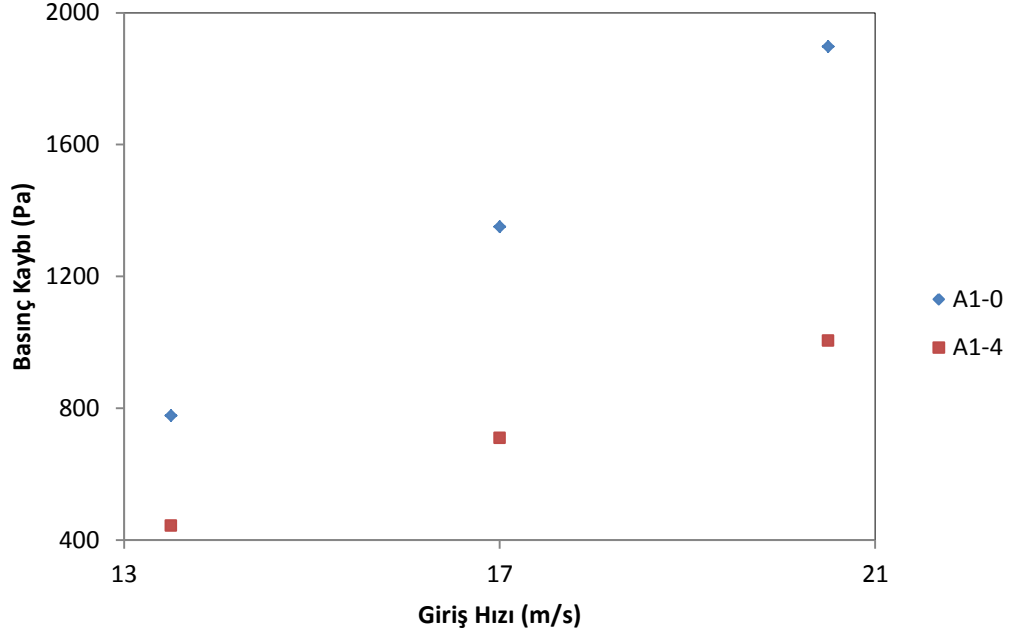
3.1.1 A Grubu Siklonlar

Deneylerden elde edilen basınç kaybı ve partikül tutma verimi sonuçları grafiksel gösterimler halinde sunulmuştur. Şekil 3.1'de verilen grafik, A1-0 ve A1-4 siklonlarının genel partikül tutma verimlerini göstermektedir. Artan gaz giriş hızı ile birlikte her iki siklonda da tutma verimlerinin arttığı görülmektedir. Standart ve helezonik tavan arasında bir kıyas yapıldığında ise tüm hızlar için verimin standart tavanlı siklonlarda %5 ila %7 mertebelerinde daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Buradan hareketle palet yapısının verimi olumsuz yönde etkilediği sonucu çıkartılabilir.



Şekil 3.1 A1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri

Bir siklonun performansını yalnızca toz tutma verimi ile değerlendirmek eksik bir yaklaşımdır. Yalnızca verim değerleri üzerinden yapılan çıkarımlar, palet kullanımının gerekli olmayacağı anlamına gelecektir. Ancak genel performans değerlendirmesinde partikül tutma verimi kadar önemli bir diğer parametre de basınç kaybıdır. Bu sebeple tüm siklonlarda performans analizi yapmak için basınç kaybı parametresi de ayrıca ölçülmüştür. A1 kodlu siklonlar için sonuçlar incelendiğinde A1-0 siklonunda, tıpkı partikül tutma verimi sonuçlarında olduğu gibi basınç kaybı değerlerinin de daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3.2). Bu siklonda basınç kaybı, gaz giriş hızının artmasıyla birlikte 800 Pa mertebelerinden 2000 Pa civarına kadar yükselmektedir. Helezonik tavanlı A1-4 siklonunda ise en yüksek gaz giriş hızında 1000 Pa dolaylarında basınç kaybı gerçekleşirken, bu siklon grubunun en düşük giriş hızı olan 13,5 m/s'de 400 Pa dolaylarına kadar düşmektedir. Gaz giriş hızının artmasıyla her iki siklon arasında basınç kaybı farkının daha da arttığı, grafikten rahatlıkla anlaşılmaktadır. Bu sonuç, palet tasarımının basınç kaybına etkisinin olumlu olduğu şeklinde yorumlanabilir.

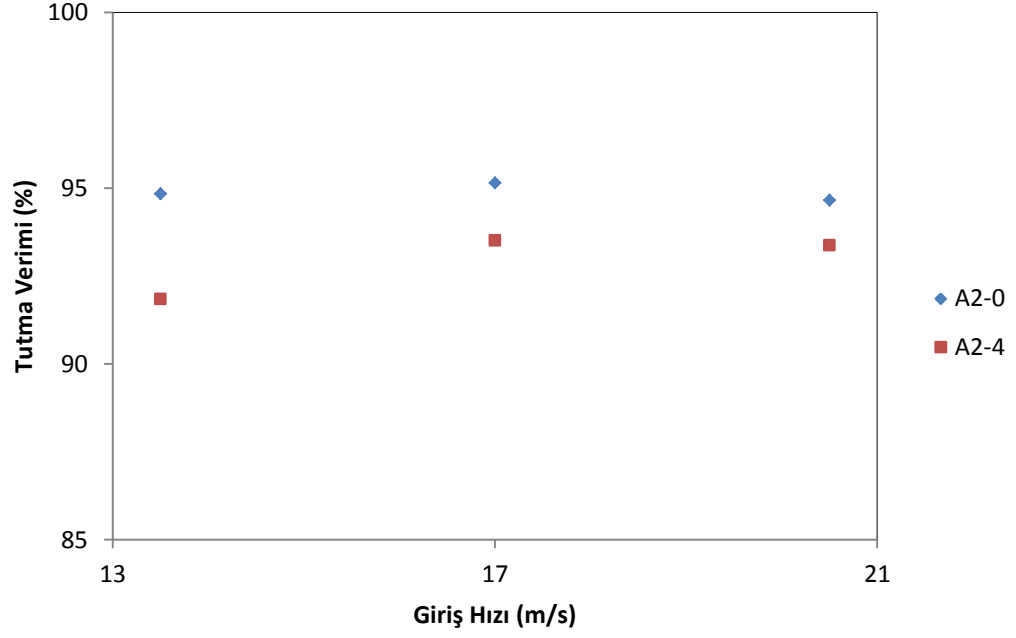


Şekil 3.2 A1 grubu siklonlarda basınç kayıpları

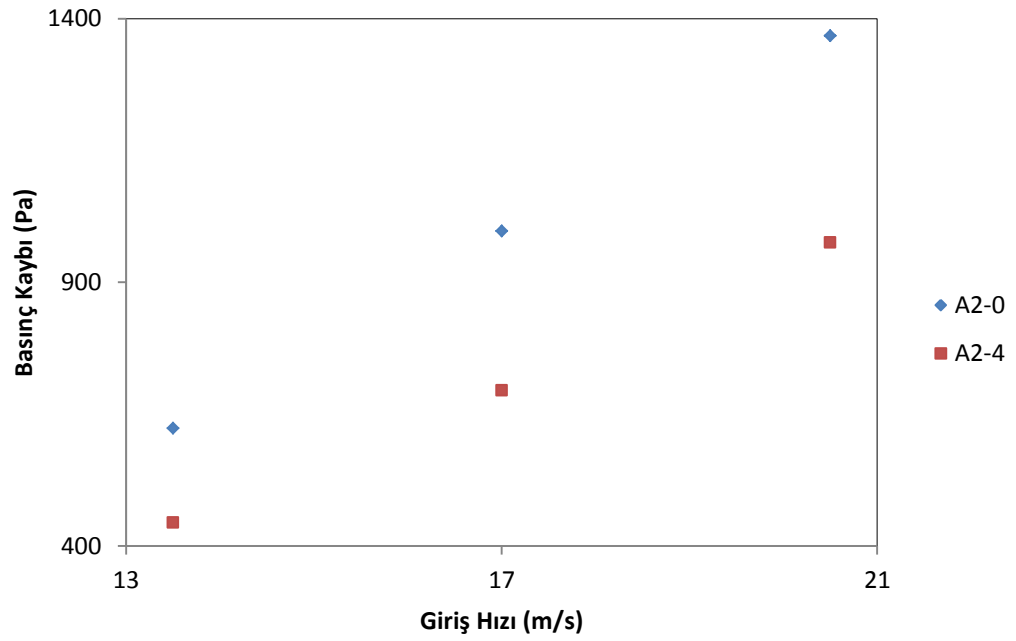
A2 grubu siklonlarda partikül tutma verimi sonuçları incelendiğinde standart tavanlı siklonun helezonik tavanlı siklona göre yüksek verim değerlerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.3). İki siklon arasında büyük farklar (%2–3 civarı) yoktur. Ancak artan gaz giriş hızıyla birlikte verim değerlerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Gaz giriş hızının artmasıyla her iki siklonda da önce artan verim değerleri, hızın daha da artmasıyla (20,5 m/s) düşüş göstermektedir. Bu da ilgili geometri için bir optimum giriş hızı değeri olabileceğine işaret etmektedir.

Basınç kaybı parametresi açısından incelendiğinde A2 grubunda, artan gaz giriş hızının da etkisiyle standart ve helezonik tavanlı siklonlar arasında 200 ila 400 Pa civarlarında basınç kaybı farkı gözlenmektedir (Şekil 3.4). A1 grubunda bu fark, en yüksek gaz giriş hızında 900 Pa mertebelerine kadar çıkmaktadır. Tüm A grupları için seçilen en düşük hız değerinde (13,5 m/s) A2-4 siklonunda 450 Pa civarında görülen basınç kaybı, artan hızlarla 1000 Pa seviyelerine kadar çıkmaktadır. Standart tavanlı A2-0 siklonunda ise en yüksek hızda 1400 Pa civarında görülen basınç kaybı, aynı hız değerinde A1-0 siklonu için 1900 Pa mertebelerindedir. Çıkış borusundaki genişleme, bu siklonlarda yaklaşık 500 Pa kadar basınç kaybı düşüşüne sebep olmuştur. Ancak azalan giriş hızıyla birlikte

bu fark da azalmaktadır. Standart tavanlı siklonlarda çıkış borusu çapının artmasıyla oluşan bu fark, helezonik tavanlı A1-4 ve A2-4 siklonları arasında gözlenmemiştir.

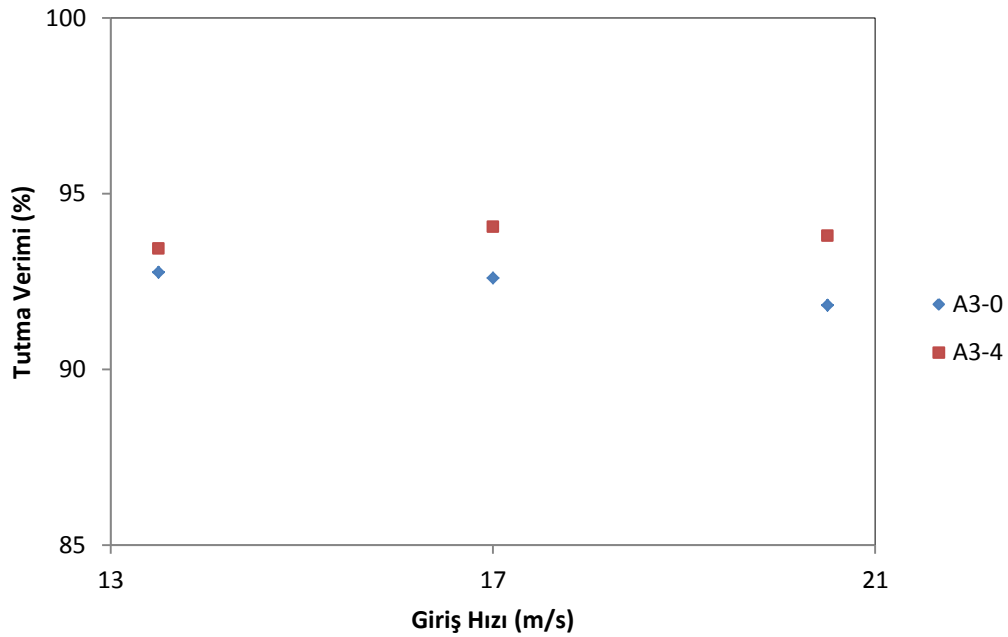


Şekil 3.3 A2 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri



Şekil 3.4 A2 grubu siklonlarda basınç kayıpları

Helezonik tavan yapısının A3 grubu siklonlarda performansı doğrudan arttırdığı söylenebilir. Partikül tutma verimi açısından incelendiğinde 4 nolu paletin kullanıldığı helezonik tavanlı A3-4 siklonunda, standart tavanlı A3-0 siklonuna göre tutma verimleri daha yüksektir (Şekil 3.5). Yani A1 grubu siklonlardan sonra A2 grubunda gözlemlenen, verimler arasındaki farkın azalması durumu bu siklon grubunda da devam etmiş, hatta helezonik tavanlı siklon, verim grafiğinde daha yukarıya çıkmıştır. A2 grubunda artan gaz giriş hızında verim eğrileri birbirine yaklaşmaktadır. Yani tutma verimleri arasındaki fark azalmaktadır. Aynı trendin A3 grubunda da devam ettiği ve yüksek hızlarda helezonik tavanlı A3-4 siklonunda elde edilen verim ile standart tavanlı A3-0 siklonunda elde edilen verim arasındaki farkın açıldığı görülmektedir. Verimler arasındaki fark 3 farklı giriş hızı için %1-2 mertebelerinde olsa da helezonik tavan yapısının verimi azaltmamış, hatta az da olsa arttırmış olması önemlidir.

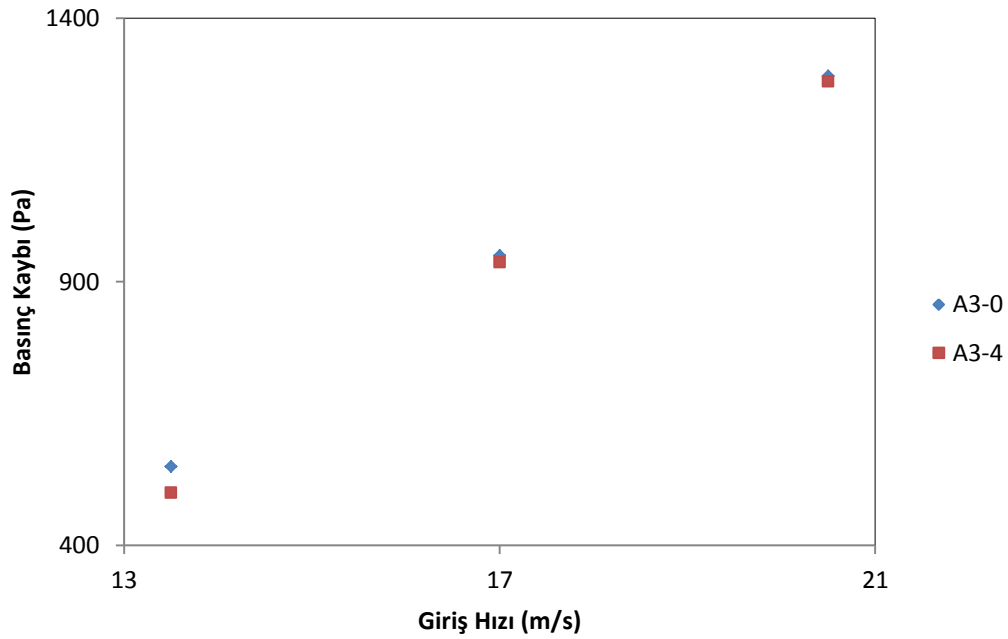


Şekil 3.5 A3 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri

Özellikle basınç kaybı bakımından yapılan kıyaslamaları da dikkate alınca kesin bir performans artışı olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 3.6). Diğer siklon gruplarında helezonik tavanın, tutma verimini bir miktar azaltsa da basınç kaybında önemli düşüslere neden olarak siklon performansına olumlu etki ettiği; A3 grubunda ise basınç kaybını A3-0 siklonuna göre aynı seviyelerde tutarak

(hatta 10 ila 50 Pa civarı azalma var) partikül tutma verimini de arttırdığı gözlemlenmiştir.

Helezonik tavan yapısının A3 grubunda herhangi bir olumsuz etkiye sahip olmadığı kesin olarak söylenebilir. Basınç kaybı ve partikül tutma verimi değerlerinin birbirine yakın olması ise olumlu olarak kabul edilebileceği gibi nötr etki şeklinde de yorumlanabilir. Burada genel performans anlamında beklentilere göre değerlendirme yapılabilir. İlgili bölümde, çalışmaya konu olan siklonlara dair yapılan maliyet analizlerini incelemek faydalı olacaktır.



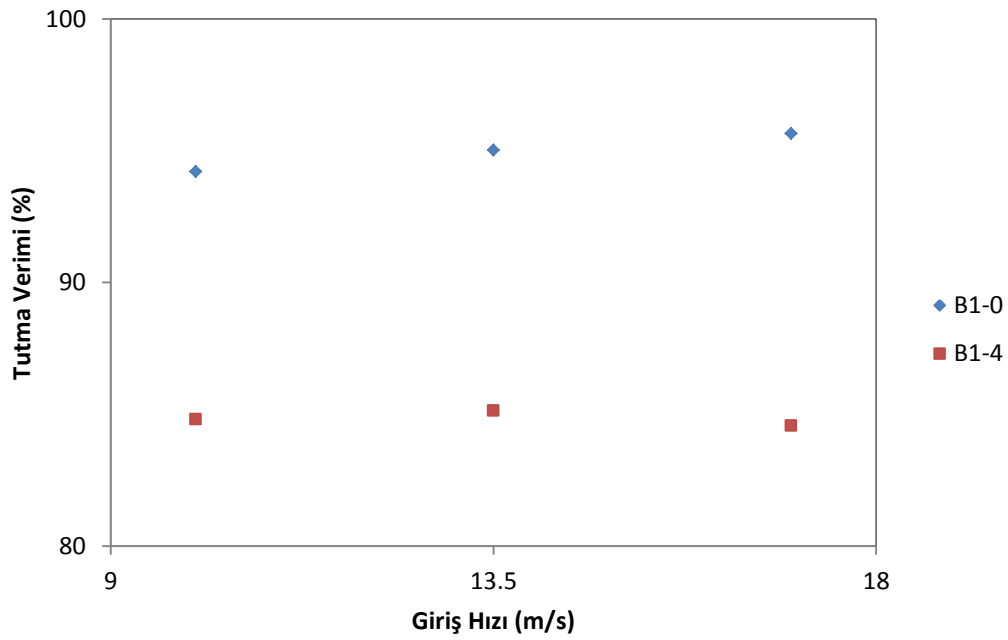
Şekil 3.6 A3 grubu siklonlarda basınç kayıpları

3.1.2 B Grubu Siklonlar

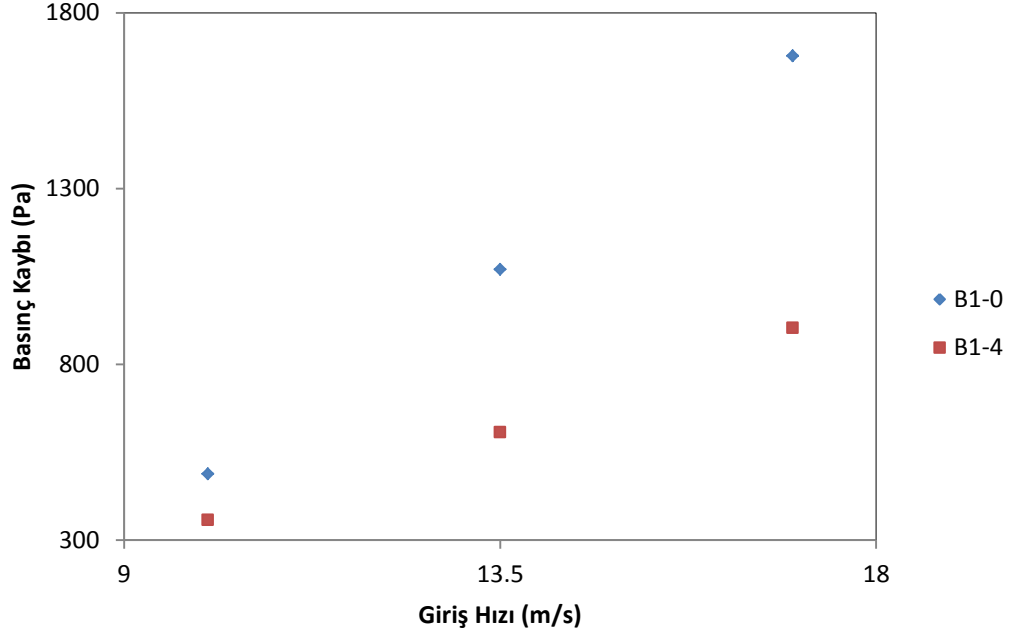
B grubu siklonlarda da A grubundakilere benzer bir eğilim görmek mümkündür. Helezonik tavanın partikül tutma verimine etkisi, artan çıkış borusu çapıyla birlikte daha olumlu görünmektedir. Basınç kaybı açısından ise çıkış borusu çapının genişlemesiyle önce azalan, sonrasında ise artan bir eğilim gözlenmektedir. Elde edilen bu izlenimler, sonuçlar hakkında genel bir değerlendirme imkanı sunsa da palet yapısının siklonlar üzerinde etkilerini daha sağlıklı yorumlamak için her bir siklon grubunun müstakil olarak kendi içinde değerlendirilmesi doğru olacaktır. Şekil 3.7’de partikül tutma verimi sonuçları

görsel olarak sunulan B1 grubu siklonlarında helezonik tavan yapısının negatif etkisi açıkça görülmektedir. B1-4 siklonunda, her bir giriş hızı için tutma verimlerinin standart tavanlı siklonlara göre %10–12 mertebelerinde azaldığı görülmektedir. Hem B1-0 hem de B1-4 siklonları tek başına değerlendirildiğinde, giriş hızının artışıyla birlikte partikül tutma verimlerinde büyük değişimler gözlenmemiştir.

B1 grubu siklonlar için oluşturulan basınç kaybı grafiğinde giriş hızının etkisi ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.8). Standart tavanlı B1-0 siklonunda 10 m/s giriş hızı için 500 Pa civarı olan basınç kaybı değeri, 17 m/s gaz giriş hızında 1700 Pa mertebelerine ulaşmaktadır. Helezonik tavan yapısının basınç kaybını azaltıcı etkisi bu grupta da rahatlıkla görülmektedir. Özellikle yüksek hızlarda bu etki grafikte de rahatlıkla okunabilmektedir. Düşük hızlarda 100–200 Pa civarlarında görülen azalma, giriş hızının artmasıyla 800 Pa seviyelerinde gerçekleşmektedir.



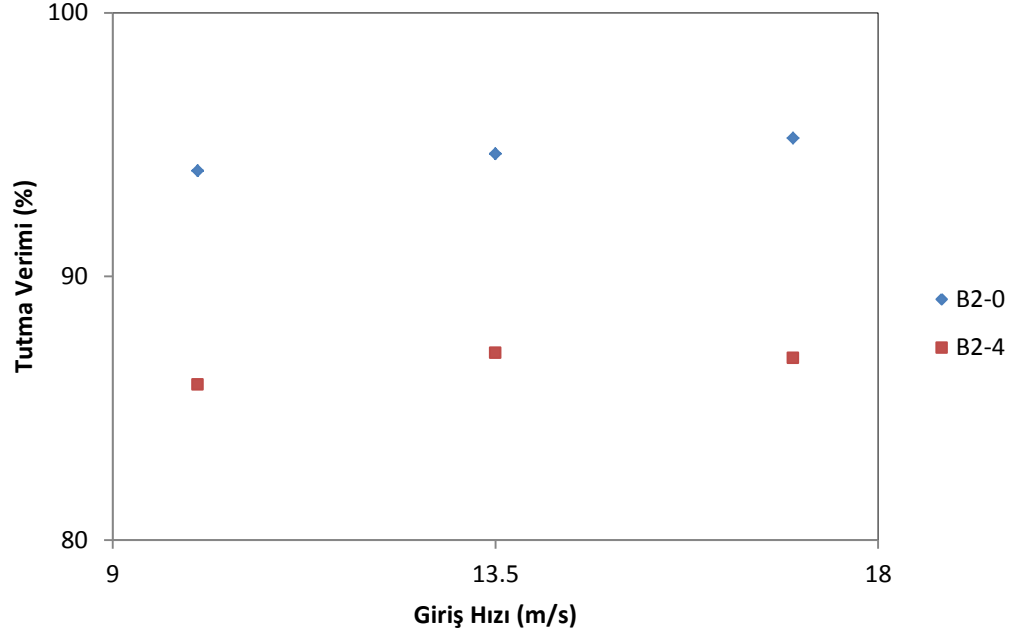
Şekil 3.7 B1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri



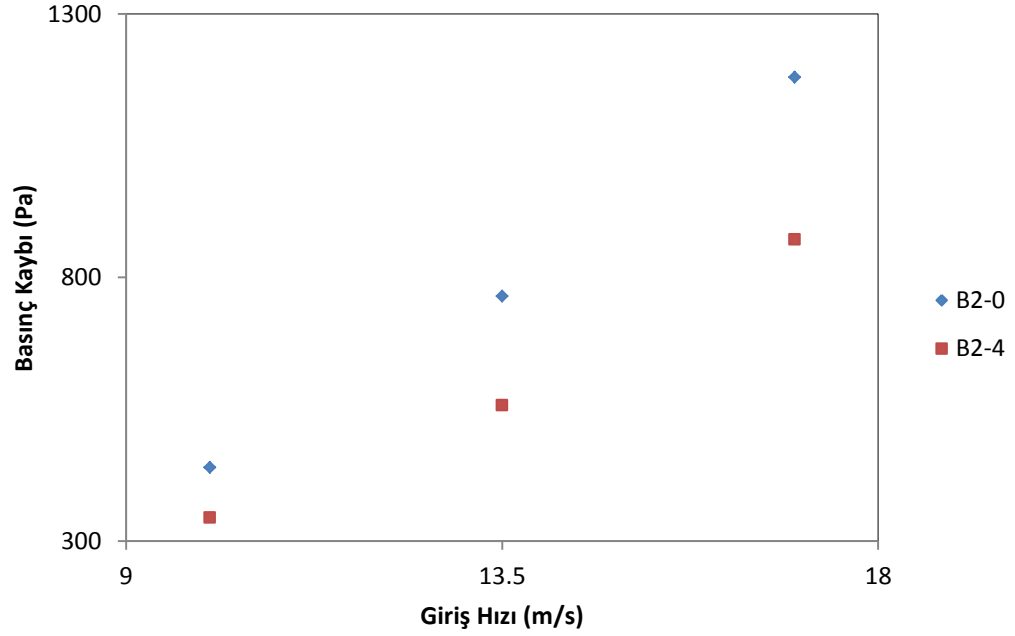
Şekil 3.8 B1 grubu siklonlarda basınç kayıpları

Standart tasarımlı Stairmand tipi yüksek verimli siklon geometrisi olan B2 grubu siklonlarda da partikül tutma verimleri açısından helezonik tavanın etkisi negatif yöndedir (Şekil 3.9). Tüm gaz giriş hızları için B2-4 siklonunda standart siklona göre % 8-9 civarı azalma görülmektedir. Artan gaz giriş hızının, siklonların tutma verimlerinde aşağı veya yukarı yönlü çok büyük bir etkiye sebep olduğu söylenemez. Hem standart tavanlı B2-0 siklonunda hem de 4 nolu paletle sahip helezonik tavanlı B2-4 siklonunda %1–1,5 civarı değişim gerçekleşmiştir. B2 grubu siklonlarda da helezonik tavan basınç kaybını düşürücü etki göstermiştir.

B1 grubuna benzer şekilde artan gaz giriş hızıyla birlikte basınç kaybının daha da fazla düştüğü görülmektedir (Şekil 3.10). Gaz giriş hızı arttıkça standart ve helezonik tavanlı siklonlar arasındaki basınç kaybı farkı 100 Pa mertebelerinden 300 Pa civarına çıkmaktadır.



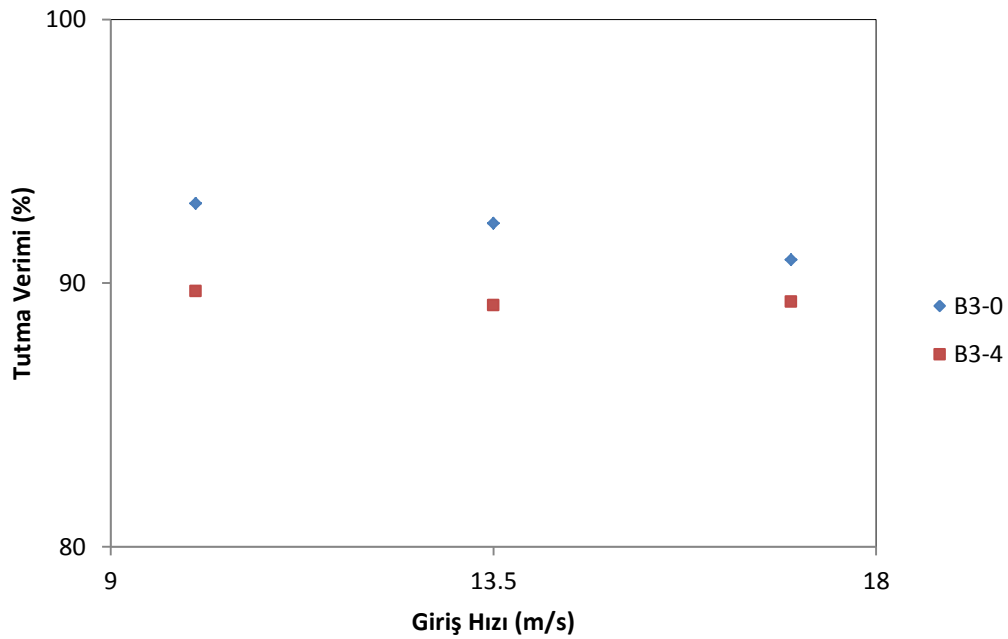
Şekil 3.9 B2 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri



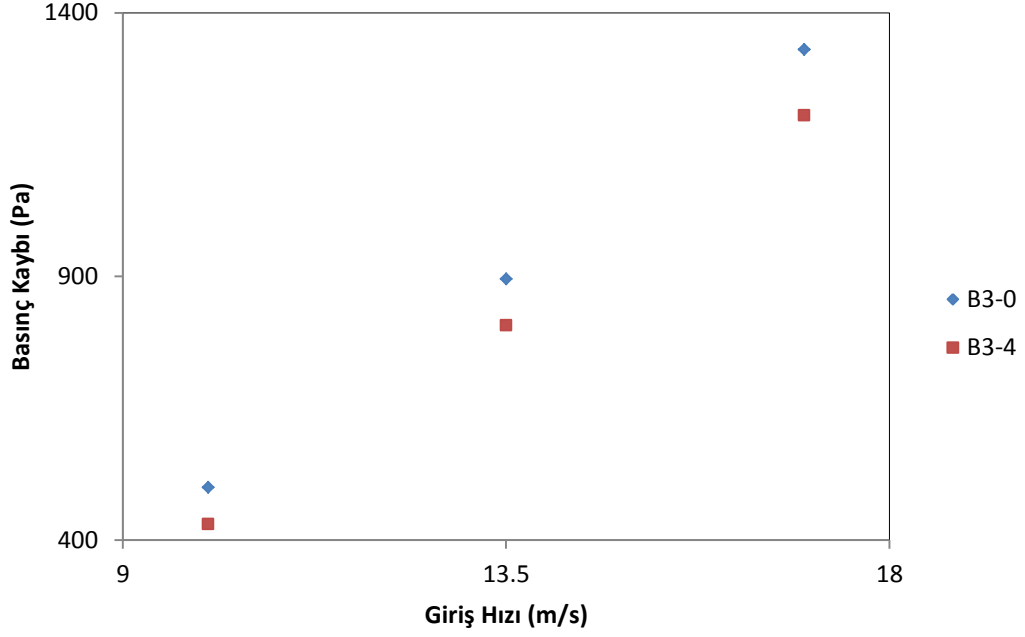
Şekil 3.10 B2 grubu siklonlarda basınç kayıpları

A3 siklonu ile aynı çıkış geometrisine sahip B3 siklonunda partikül tutma verimi ve basınç kaybı sonuçları sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilen grafiklerde sunulmuştur. Partikül tutma verimi sonuçları açısından standart siklon tasarımına göre helezonik tavanlı siklonlarda düşük değerler görülmesine

rağmen bu düşüş, B1 ve B2 siklonlarında gerçekleşen verim azalmasına kıyasla daha az seviyelerdedir. Tüm hız denemeleri için helezonik tavanlı siklonlarda %1 ila %3 civarı azalan tutma verimleri %90'a yakın düzeydedir. Özellikle giriş hızının artmasıyla standart tavanlı B3-0 siklonunda partikül tutma verimleri azalmakta ve B3-4 siklonunda elde edilen sonuçlara yaklaşmaktadır. A grubu siklonlarda da benzer bir eğilim oluşmuş ve A3 kodlu siklonlarda, helezonik tavana sahip olanı (A3-4), hem basınç kaybı hem de partikül tutma verimi sonuçları açısından standart tavanlı siklona oranla daha iyi sonuç vermiştir. Bu benzerliğin, her iki grupta da çıkış borusu çapının aynı şekilde değişmesi ile oluşmuş olması muhtemel görünmektedir. Ancak yine de tüm siklonlar ayrı birer geometridir ve performans değerlendirmesi her biri için müstakil olarak yapılmalıdır. Bu noktada çalışmanın amacının, siklonların birbirleri ile kıyaslanmasından ziyade giriş paletlerinin siklonlar üzerindeki etkilerinin araştırılması olduğunu hatırlamakta fayda vardır.



Şekil 3.11 B3 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri



Şekil 3.12 B3 grubu siklonlarda basınç kayıpları

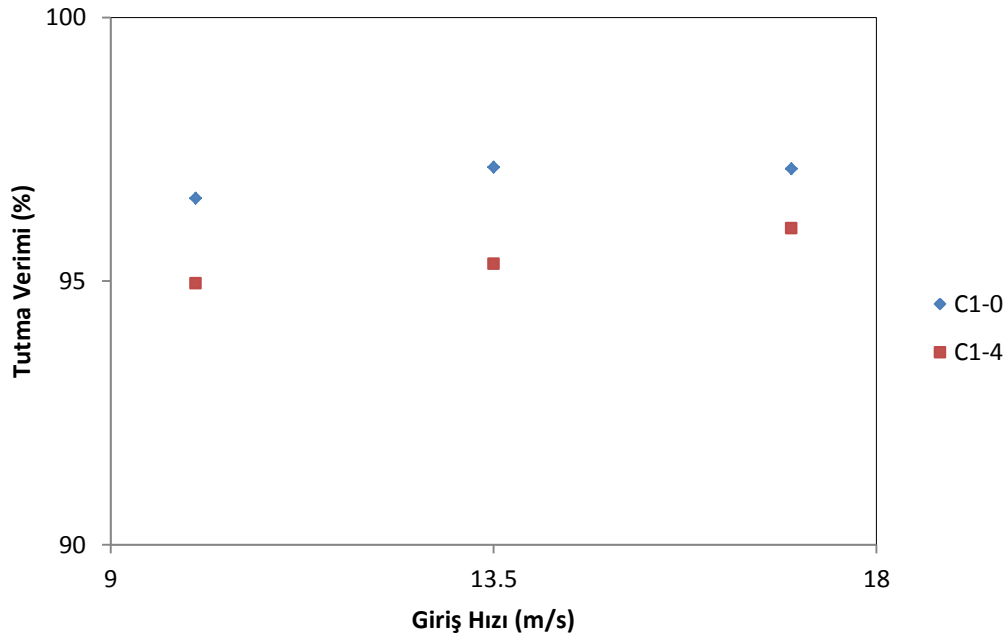
Basınç kaybı parametresi açısından bakıldığında B3 grubu siklonlarında helezonik tavanın pozitif etkisi görülmektedir. Tüm gaz giriş hızlarında B3-4 siklonunda gerçekleşen basınç kaybı B3-0 siklonuna oranla daha düşüktür. Ancak B1 ve B2 gruplarında görülen, hızın artmasıyla birlikte basınç kaybı düşüş miktarının artması durumunu B3-0 ve B3-4 siklonlarında açıkça görmek zordur. B3-0 siklonunda 1300 Pa kadar görünen basınç kaybı değeri, helezonik tavanlı B3-4 siklonunda 1200 Pa civarlarına düşmüştür. Aradaki yaklaşık 100 Pa civarındaki basınç kaybı, daha düşük hızlarda yapılan denemelerde de sadece 60–70 Pa seviyelerindedir.

3.1.3 C Grubu Siklonlar

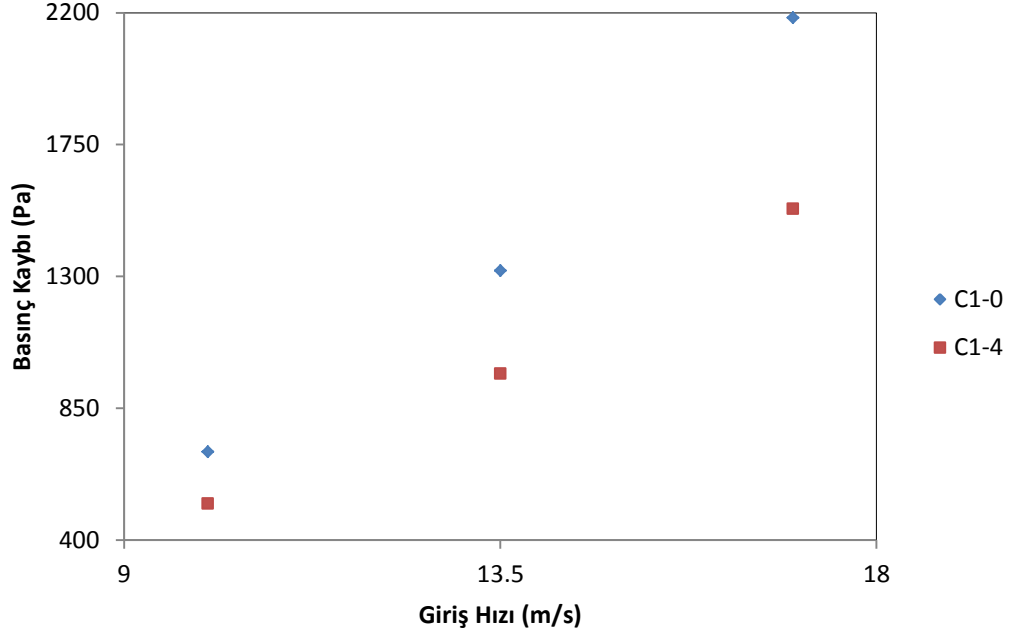
C1 grubu siklonlar için hazırlanan verim grafikleri Şekil 3.13'te sunulmuştur. Burada en dikkat çekici sonuç, hem standart tavanlı C1-0, hem de helezonik tavanlı C1-4 siklonu için gerçekleşen oldukça yüksek partikül tutma verimleridir. Tüm giriş hızları için her iki siklon arasındaki tutma verimi farkı ise ancak %1,5–2 dolaylarında görünmektedir. Helezonik tavanlı siklonda daha düşük verim elde edilmiş olsa da paletsiz tasarıma yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada bu

siklon grubu için belirlenen en yüksek gaz giriş hızında (17 m/s), verim değerlerinin birbirine neredeyse % 1 kadar yakın olduğu görülmektedir.

Basınç kaybı sonuçları incelendiğinde, C kodlu siklonlarda oldukça yüksek basınç kaybı değerleri göze çarpmaktadır (Şekil 3.14). Paletsiz tasarıma sahip standart tavanlı siklonda (C1-0), en düşük gaz giriş hızı olan 10 m/s'de 700 Pa civarında gerçekleşen basınç kaybı parametresi, gaz giriş hızının artmasıyla önce 1300 Pa, sonrasında ise 17 m/s giriş hızında 2200 Pa dolaylarına kadar yükselmiştir. C1-4 siklonunda da giriş hızının artmasıyla basınç kaybı değeri üç katına kadar artarak 10 m/s gaz giriş hızı için 500 Pa iken 17 m/s için 1500 Pa seviyelerine yükselmiştir. Bu siklonlardan elde edilen sonuçlara göre 17 m/s'lik giriş hızında partikül tutma veriminin %1 kadar artması için paletsiz siklon tercih edilmesi durumunda, basınç kaybının 700 Pa civarında (yaklaşık 1,5 kat) arttığı görülmektedir. Diğer giriş hızlarında bu oran biraz daha az olsa bile basınç kayıpları arasındaki fark yine de yüksektir.



Şekil 3.13 C1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri

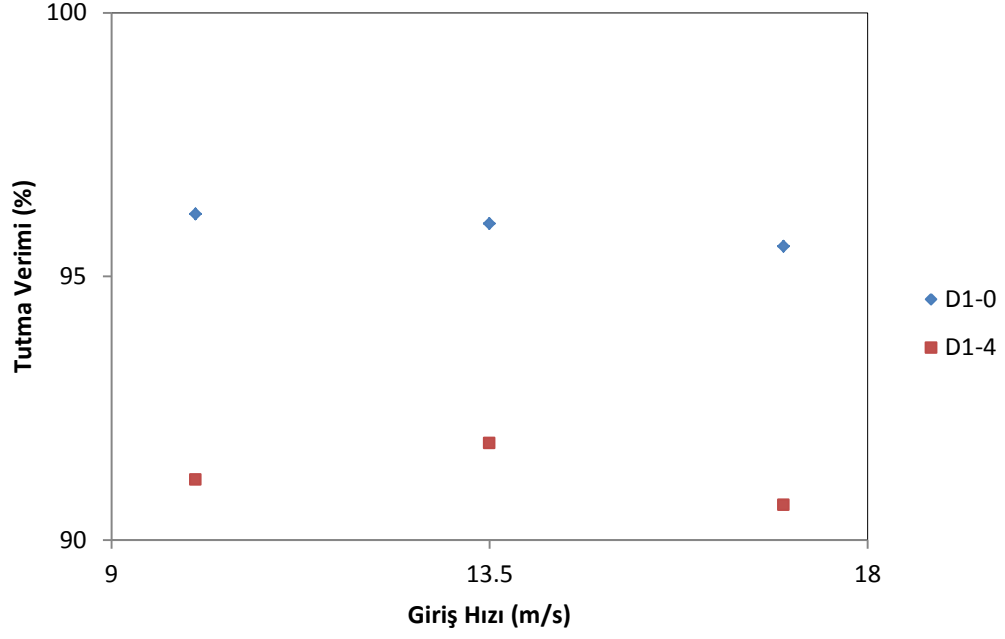


Şekil 3.14 C1 grubu siklonlarda basınç kayıpları

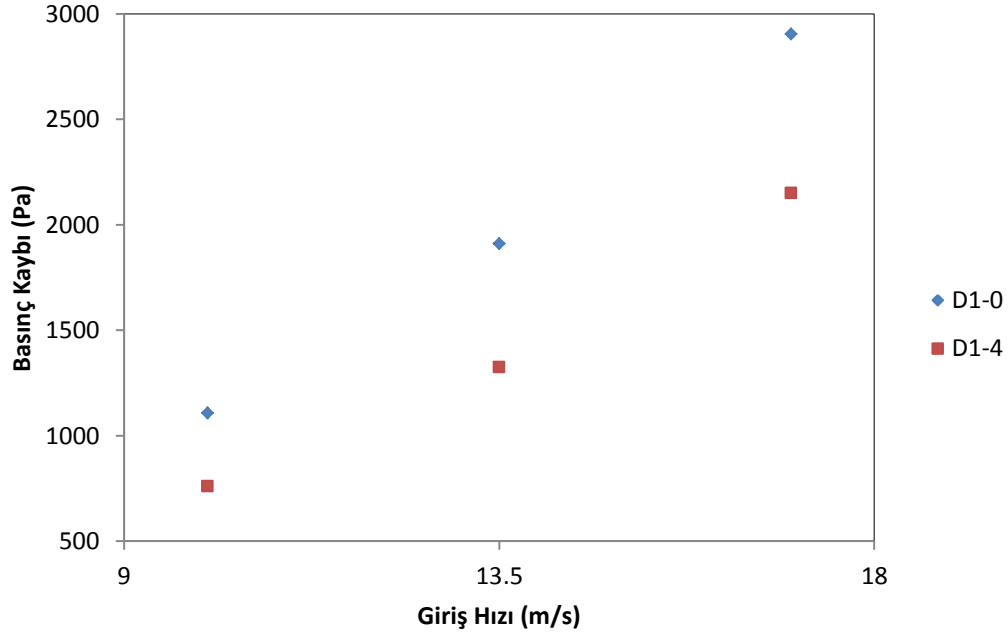
3.1.4 D Grubu Siklonlar

C1 grubu siklonlar da tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalara konu olan son siklon grubu, D1 kodlu siklonlardır. Partikül tutma verimleri bakımından incelendiğinde bu siklon grubunda % 90 üstü verimler dikkat çekmektedir (Şekil 3.15). Standart tavanlı D1-0 siklonunda % 96 dolaylarında gerçekleşen genel tutma verimleri, paletli D1-4 siklonunda ise tüm gaz giriş hızlarının ortalaması olarak % 91 mertebelerindedir.

Diğer siklon grupları içerisinde en büyük giriş kesit alanına sahip D grubu siklonlarda, 17 m/s gaz giriş hızıyla birlikte standart tavanlı D1-0 siklonu için 2900 Pa mertebelerinde basınç kaybı kaydedilmiştir. Helezonik tavan yapısı, bu siklon grubunda da basınç kaybını düşürücü yönde etki etmiş ve en yüksek gaz giriş hızında 2200 Pa civarında basınç kaybı okunmuştur. Önceki siklonlarda olduğu gibi düşük hızlarda bu fark daha da azalmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 D1 grubu siklonlarda partikül tutma verimleri



Şekil 3.16 D1 grubu siklonlarda basınç kayıpları

3.1.5 Kesme Çapları

Partikül tutma verimi sadece siklon geometrisine bağlı olmayıp aynı zamanda toz karakterine de bağlıdır. Arıtılacak tozun boyut dağılımı ve özkütlesi gibi parametreler, verimi doğrudan etkilemektedir. Farklı ortam şartlarında işletilen

ve farklı özelliklere sahip siklonların birbiriyle kıyaslanabilmesi için kesme çapı parametresi öne çıkmaktadır. Kesme çapı, bir siklonun partikül tutma kabiliyetinin önemli bir göstergesidir. Tanım olarak % 50 verimle tutulan partikül çapı şeklinde ifade edilen kesme çapının azalmasıyla siklon genel verimi artmaktadır. Bir siklonun tasarım ve işletme aşamalarında önemli bir kriter olduğu için, rampa yapısının performansa etkisi incelenirken bir de kesme çapı değerlerinin görülmesinde fayda vardır.

Helezonik tavan yapısının performansa etkisi, basınç kaybı ve verim parametreleri cinsinden grafiksel gösterimlerle incelenmiştir. Elde edilen bu bulgulara ek olarak Tablo 3.1’de tüm siklonların hesaplanan kesme çapları verilmiştir. Genel tutma verimi sonuçlarında görüldüğü üzere helezonik tavan yapısı, siklon verimini düşürücü etkiye sahiptir. Tüm gaz giriş hızları için siklonların helezonik tavanlı versiyonlarında, standart tavanlı olanlara göre daha büyük kesme çapı değerleri hesaplanmıştır. Yalnız A3 grubu siklonlarda durum farklıdır. Helezonik tavan yapısının bu grupta performansı olumlu yönde etkilemesi sonucunda siklon kesme çapı da standart tavanlı muadiline göre azalmıştır. A1 grubu siklonlarda gaz giriş hızı arttıkça paletli ve paletsiz siklonlar arasında kesme çapı farkı azalmaktadır. A1 grubuna göre çıkış borusu çapı 0,1D kadar genişleyen A2 grubunda kesme çapı farkları, artan gaz giriş hızıyla 1 μm ’den 0,44 μm ’ye kadar düşmektedir. A3 grubunda ise palet yapısının verimi arttırmasıyla kesme çapları standart tavanlı siklona göre azalmaktadır ve gaz giriş hızının artmasıyla iki siklon arasındaki kesme çapı farkı da artmaktadır. B1 grubu sonuçlarına bakıldığında helezonik tavan yapısının kesme çapını arttırdığını görmek mümkündür. Bu artış tüm siklon grupları içerisinde en yüksek olanıdır. Tüm hızlar için en yüksek kesme çapı değerleri B1-4 siklonunda görülmektedir. B grubu siklonlarda çıkış borusu çapı arttıkça standart tavanlı ve helezonik tavanlı siklonlar arasında farkın azaldığı görülmektedir. C grubu siklonlarda hem helezonik hem de standart tavanlı siklonlarda yüksek verim değerleri gözlemlendiğinden kesme çapları diğer siklonlara göre küçüktür. Helezonik tavanlı C1-4 siklonunda bile 3,11 ila 3,51 μm seviyesinde kesme çapı değerleri oldukça küçük değerlerdir. Tüm gruplara bakıldığında çıkış borusu çapının artmasıyla kesme çapı değerlerinin de arttığı yorumu yapılabilir.

Tablo 3.1 Siklon kesme çapı değerleri

Siklon Grubu	Palet No	Giriş Hızı (m/s)			
		10	13,5	17	20,5
A1	0	–	3,46	3,11	2,90
	4	–	5,81	5,27	5,03
A2	0	–	3,55	3,44	3,61
	4	–	4,54	4,01	4,06
A3	0	–	4,25	4,30	4,54
	4	–	4,03	3,82	3,91
B1	0	3,92	3,61	3,37	–
	4	6,44	6,36	6,50	–
B2	0	3,85	3,62	3,40	–
	4	6,12	5,81	5,86	–
B3	0	4,17	4,41	4,82	–
	4	5,25	5,40	5,37	–
C1	0	2,87	2,60	2,62	–
	4	3,51	3,37	3,11	–
D1	0	3,19	3,27	3,44	–
	4	4,74	4,54	4,88	–

**kesme çapı değerleri µm cinsinden verilmiştir.*

3.2 Maliyet Analizi

Çalışma kapsamında belirlenen siklon geometrilerinde hem basınç kaybı hem de partikül tutma verimi açısından performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla, standart tavanlı siklonlara alternatif olarak farklı açılara sahip giriş paletleri barındıran siklonların kullanılabilirliği test edilmiştir. Palet 1, Palet 2, Palet 3 ve Palet 4 olarak isimlendirilen ve farklı dönüş açılarından oluşan paletlerin bulunduğu siklonlar, standart tavanlı baz modellerine göre partikül tutma veriminde genel olarak düşüğe sebep olmuşlardır. Bir hava kirliliği kontrol cihazında kirleticinin yüksek giderim verimi, ekipmanın birincil hedefidir. Ancak mühendislik yaklaşımında fayda ve maliyet kavramları birbirinden bağımsız değildir. Bu sebeple bir kontrol cihazında yüksek verimin yanı sıra düşük işletme maliyetleri de önemli bir hedeftir. Kullanılan paletler, basınç kaybı değerlerinde de azalma meydana getirmişlerdir ve bir siklonda basınç kaybının düşmesi, işletme maliyetleri bakımından faydalıdır.

Kullanılan rampa yapıları, verimi olumsuz yönde etkilerken basınç kaybını ise olumlu etkilemiştir. Burada ortaya çıkan soru, performansın nasıl etkilendiği sorusudur. Bu sorunun cevabını bulmak için standart tavanlı ve helezonik tavanlı siklonlara yönelik bir maliyet analizi yapılmıştır.

Kullanılan paletler sayesinde (helezonik tavanlı) siklonlarda basınç kaybının azaltılması planlanmış olup, basınç kaybının azalmasıyla birlikte partikül tutma verimi de azalmaktadır. Bu sebeple, modifikasyondan sonra siklon performansının nasıl değiştiğini tayin etmek üzere bazı değerlendirmeler yapılması gerekmektedir. Bu değerlendirmeler genel mühendislik yaklaşımında sıkça görülen fayda/maliyet esasına dayanmaktadır.

Yapılan mali analizlerde standart tavanlı siklonların yanı sıra yalnızca 4 nolu palete sahip helezonik tavanlı siklonlara yer verilmiştir. Diğer palet yapılarının bulunduğu siklonlarda fayda/maliyet oranının ne derece düşük olduğu, deneysel çalışmalar neticesinde de açıkça görülmüştür. Her ne kadar bu siklonlarda basınç kaybı oldukça düşük seviyelerde gerçekleşse de düşük maliyetin yanında bir o kadar da düşük fayda getirmektedirler.

Siklonların performanslarını değerlendirmek için sadece basınç kaybı veya sadece tutma verimi yeterli olmamakta; ayrıca, birbiriyle çok yakından ilişkili parametreler olmalarına rağmen bu iki işletme parametresinin bir arada değerlendirilmesi de mümkün olmamaktadır. Bunun için, verilen belirli işletme şartları altında (giriş partiküler madde konsantrasyonu gibi) bu iki parametre, tutulan partiküler madde kütlesi başına arıtma maliyeti olarak bir arada değerlendirilebilir. Bu amaçla, siklondaki basınç kaybının ne kadarlık bir elektrik tüketimine sebep olduğunu hesaplamak gerekir. Bunun için ise temel güç formülü,

$$P = \frac{Q\rho g\Delta p}{\eta_F} \quad (3.1)$$

şeklinde kullanılabilir. Burada P siklondaki basınç kaybını karşılamak üzere fanın tükettiği güç (Watt), Q atık gazın hacimsel debisi (m^3/s), ρ atık gazın özkütlesi (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), Δp siklondaki basınç kaybı ($\text{m H}_2\text{O}$) ve η_F ise fanın verimidir. Bu şekilde elde edilen güç değeri, siklondaki basınç kaybını

karşılama üzere tüketilen güçtür. Tüketilen elektrik enerjisini bulmak için ise gücün, fanın çalışma süresi ile çarpılması gerekir. Siklonda birim atık gaz başına gerçekleşen güç tüketimi ise,

$$P_u = \frac{P}{Q} \quad (3.2)$$

formülüyle hesaplanır ki burada P_u birim atık gaz başına güç tüketimidir (W.s/m³). Tutulan toz başına arıtma maliyetini hesaplamak için siklonda birim zamanda tutulan partiküler madde kütlesini aşağıdaki formülle hesaplamak gerekir:

$$\dot{m} = QC\eta \quad (3.3)$$

Burada $\dot{m}$ siklonda birim zamanda tutulan partiküler madde kütlesi (kg/s), C siklona giren partiküler madde konsantrasyonu (kg/m³) ve η siklondaki partiküler madde tutma verimidir. Denklem (6) ve (8) birleştirilerek siklonda tutulan partiküler madde kütlesi başına tüketilen elektrik enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\eta_e = \frac{P}{\dot{m}} \quad (3.4)$$

Burada η_e siklonda tutulan partiküler madde kütlesi başına tüketilen elektrik enerjisidir (Wh/kg veya kWh/ton) ve aynı zamanda maliyet verimliliği olarak da adlandırılır. Paletli ve paletsiz (helezonik ve düz tavan) siklonlarda arıtma performansını değerlendirmek üzere Denklem (3.4)'te verilen maliyet verimliliği formülü kullanılmıştır. Kullanılan tüm siklonlar için helezonik tavan, basınç kaybını düşüyorsa da tutma veriminde de değişikliğe yol açmakta ve maliyet verimliliğini değiştirmektedir. Çalışmanın bu aşamasında, kullanılan paletlerin maliyet verimliliğine etkileri değerlendirilmiştir.

Tüm siklonlar için giriş partikül konsantrasyonu 10.000 mg/m³, gazın özkütlesi ise 1,2 kg/m³ kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu noktada dikkate alınması gereken önemli bir husus, hesaplamalarda kullanılan basınç kayıplarının sadece siklonlarda gerçekleşen basınç kaybı olduğudur ve ölçülen

basınç kayıplarından daha fazlasının siklon bağlantı boruları ve elemanlarında gerçekleştiği; yani ihtiyaç duyulan fan gücünün hesaplanandan çok daha fazla olması gerektiği asla unutulmamalıdır. Siklonlarda maliyet verimliliği hesaplanırken sadece siklondaki basınç kayıpları kullanılmış; diğer tüm yardımcı ekipman ve bağlantıların helezonik ve düz tavanlı siklonlar için özdeş oldukları varsayılmıştır.

Sonuçları değerlendirmeden önce dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, tüm siklon gruplarının birbirinden bağımsız olduğudur. Farklı siklonlar için elde edilen maliyet oranları birbiriyle kıyaslanamaz. Bir diğer önemli nokta da analizlerden çıkarılacak sonuçlarla direkt olarak geometri tavsiyesi yapılamayacağıdır. Unutulmamalıdır ki yapılan analizlerde görülen işletme maliyeti azalmalarını etkileyen iki deney çıktısı bulunmaktadır. Basınç kayıplarındaki azalmaların olumlu etkisi yanında partikül tutma verimlerindeki düşüşler de negatif etki yapmaktadır. Siklon seçiminde her iki parametre de belirleyici rol oynamaktadır.

A1 grubu siklonlarda geometri ve deneysel sonuçlar baz alınarak yapılan maliyet analizi sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir. Yapılan hesaplara göre helezonik tavan yapısına sahip siklonların, standart siklonlara göre işletme maliyeti açısından ortalama %42,23 daha avantajlı olduğu söylenebilir. A grubu siklonlarda ikinci yüksek giriş hızı, diğer tüm siklon gruplarında ise en yüksek gaz giriş hızı olan 17 m/s için %44,1’lik değer, işletme maliyetleri açısından neredeyse yarı yarıya düşüş anlamına gelmektedir.

A2 grubu siklonlarda da helezonik tavanın ekonomik etkisi Tablo 3.3’te verilmiştir. Standart tavanlı ve helezonik tavanlı siklonlar arasındaki partikül tutma verimi farkları, özellikle artan hızla birlikte %1,3 seviyelerindedir. Üç farklı giriş hızı içinse ortalama maliyet azalımı % 28 mertebelerindedir. Genel tutma verimlerinin birbirine yakın olması ve basınç kaybında bu denli avantaj sağlanması, helezonik tavan yapısının işletme açısından olumlu etkiye sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Tablo 3.2 A1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		A1-0	A1-4	
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,000908	0,000908	
	Partikül tutma verimi (%)	95,09	88,47	
	Basınç kaybı (Pa)	778	444	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	1,54E-04	8,80E-05	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,70E-03	9,69E-04	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,04960	0,03043	38,7
0,17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001144	0,001144	
	Partikül tutma verimi (%)	95,99	90,31	
	Basınç kaybı (Pa)	1350	710	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	3,37E-04	1,77E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,95E-03	1,55E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,08527	0,04766	44,1
20,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001379	0,001379	
	Partikül tutma verimi (%)	96,49	91,12	
	Basınç kaybı (Pa)	1897	1005	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	5,71E-04	3,03E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	4,14E-03	2,19E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,11920	0,06687	43,9

Tablo 3.3 A2 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		A2-0	A2-4	
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,000908	0,000908	
	Partikül tutma verimi (%)	94,84	91,84	
	Basınç kaybı (Pa)	623	444	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	1,24E-04	8,80E-05	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,36E-03	9,69E-04	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,03983	0,02931	26,4
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001144	0,001144	
	Partikül tutma verimi (%)	95,15	93,51	
	Basınç kaybı (Pa)	997	695	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	2,49E-04	1,73E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,18E-03	1,52E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,06353	0,04506	29,1
20,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001379	0,001379	
	Partikül tutma verimi (%)	94,66	93,37	
	Basınç kaybı (Pa)	1367	975	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	4,12E-04	2,94E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,98E-03	2,13E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,08755	0,06331	27,7

Deneyisel çalışmalarda bir helezonik tavanlı siklonun, standart siklona göre tutma veriminde artışa neden olduğu tek grubun A3 siklonları olduğu

görülmüştür. Basınç kaybı parametresi açısından incelendiğinde ise çok az da olsa düşüş olduğu yine ilgili deneyler sırasında belirlenmiştir. Performans kriterlerinin temeli olan iki parametrede de olumlu yönde olan bu eğilimin, işletme maliyetlerine yansması diğer siklon gruplarına nazaran çok etkili gözükmemektedir (Tablo 3.4). Özellikle 17 m/s ve 20,5 m/s giriş hızlarında standart tavanlı ve helezonik tavanlı siklonlarda yaklaşık % 3 civarı ekonomik iyileşme hesaplanmıştır. Partikül tutma veriminin artmasına rağmen maliyetteki azalmanın çok fazla olmamasının nedeni basınç kaybı parametresinin neredeyse hiç değişmemesidir.

Tablo 3.4 A3 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		A3-0	A3-4	
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,000908	0,000908	
	Partikül tutma verimi (%)	92,76	93,44	
	Basınç kaybı (Pa)	550	500	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	1,09E-04	9,91E-05	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,20E-03	1,09E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,03595	0,03244	9,8
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001144	0,001144	
	Partikül tutma verimi (%)	92,6	94,06	
	Basınç kaybı (Pa)	950	937	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	2,37E-04	2,34E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,07E-03	2,05E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,06220	0,06040	2,9
20,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001379	0,001379	
	Partikül tutma verimi (%)	91,83	93,8	
	Basınç kaybı (Pa)	1290	1280	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	3,88E-04	3,85E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,82E-03	2,79E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,08517	0,08273	2,9

B1 grubu siklonlara dair yapılan maliyet analizi Tablo 3.5'te verilmiştir. Giriş hızının 10 m/s olduğu ilk durumda helezonik tavanlı siklonda basınç kaybı, standart tavanlı siklona göre %26 civarı düşüş göstermektedir. Buna karşılık partikül tutma veriminde ise % 10 kadar azalma gerçekleşmiştir. Bu haliyle ilk durumda % 19 civarı maliyet azalımı sağlanmıştır. Giriş hızının artmasıyla işletme maliyetlerindeki azalma %40 mertebelerine yaklaşmaktadır. 13,5 m/s gaz giriş hızında B1-4 siklonunda gerçekleşen basınç kaybı, standart tavanlı B1-0 siklonuna göre yaklaşık % 45 daha düşüktür. Aynı durum 17 m/s'lik en yüksek

gaz giriş hızında yapılan deneysel çalışmalar için de geçerlidir. Orta ve yüksek giriş hızlarında yapılan deneylerde, en düşük giriş hızındaki deneye oranla benzer seviyelerde partikül tutma verimi görülmesine rağmen helezonik tavanlı siklondaki basınç kaybı düşüşleri daha kuvvetlidir. Bu durumun ekonomik yansıması da daha yüksek maliyet düşüşleri olarak görünmektedir.

Tablo 3.5 B1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		B1-0	B1-4	
10	Giriş PM yükü (kg/s)	0,000841	0,000841	
	Partikül tutma verimi (%)	94,2	84,82	
	Basınç kaybı (Pa)	488	357	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	8,96E-05	6,55E-05	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,07E-03	7,79E-04	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,03141	0,02552	18,8
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001135	0,001135	
	Partikül tutma verimi (%)	95,03	85,15	
	Basınç kaybı (Pa)	1070	607	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	2,65E-04	1,50E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,34E-03	1,32E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,06826	0,04322	36,7
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,00143	0,00143	
	Partikül tutma verimi (%)	95,66	84,58	
	Basınç kaybı (Pa)	1677	903	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	5,23E-04	2,82E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	3,66E-03	1,97E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,10629	0,06473	39,1

B2 grubu siklonlara dair yapılan maliyet analizi Tablo 3.6'da verilmiştir. Giriş hızının 10 m/s olduğu ilk durumda helezonik tavanlı siklon için maliyet %15 civarındayken, giriş hızının artmasıyla işletme maliyetlerindeki azalma %20 mertebelerine çıkmaktadır. Ortalama %18'lik tasarrufun sağlandığı B2 grubu siklonlarda, partikül tutma verimlerinde azalma üç farklı giriş hızında yapılan deneyler için de benzer düzeylerde. 10 m/s'lik en düşük giriş hızında, B1 grubunda olduğu gibi standart ve helezonik tavanlı siklonlar arasında basınç kaybı farkı, diğer hızlara göre daha düşük oranda gerçekleştiği için maliyet azalım oranı da daha az olmuştur.

Tablo 3.6 B2 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		B2-0	B2-4	
10	Giriş PM yükü (kg/s)	0,000841	0,000841	
	Partikül tutma verimi (%)	94	85,9	
	Basınç kaybı (Pa)	440	345	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	8,08E-05	6,33E-05	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	9,60E-04	7,53E-04	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,02838	0,02435	14,2
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001135	0,001135	
	Partikül tutma verimi (%)	94,65	87,1	
	Basınç kaybı (Pa)	765	558	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	1,90E-04	1,38E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,67E-03	1,22E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,04900	0,03884	20,7
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,00143	0,00143	
	Partikül tutma verimi (%)	95,24	86,9	
	Basınç kaybı (Pa)	1180	872	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	3,68E-04	2,72E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,58E-03	1,90E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,07512	0,06084	19,0

B grubu siklonların sonuncusu B3 kodlu siklonlar için yapılan maliyet analizi sonuçları Tablo 3.7’de verilmiştir. Hem standart tavanlı B3-0 siklonunda, hem de helezonik tavanlı B3-4 siklonunda gerçekleşen partikül tutma verimleri birbirlerine yakın sayılabilecek değerlerdedir. Ancak helezonik tavanın neden olduğu basınç kaybı düşüşündeki fark, bu siklonlar için kısmen az olduğu için maliyet azaltım oranı ortalama %8,5 civarında kalmıştır.

Tutma verimleri açısından benzer bir durum A2 grubu siklonlarda da görülmüştür. Ancak bahsi geçen grupta helezonik tavanlı siklonda basınç kaybı değerleri daha ciddi bir düşüş göstermiştir. Tutma verimi değişimleri benzer eğilimler gösterirken basınç kaybı değişimleri farklı olan iki grup (A2-B3) arasında önemli geometrik farklar bulunmaktadır. Giriş kesit alanının ve çıkış borusu çapının değişmesi, debi ve basınç kaybı parametreleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Buradan hareketle her bir siklonun kendi içinde değerlendirilmesi gerekliliğini tekrar hatırlatmakta fayda vardır. Çünkü çalışmada kullanılan palet yapılarının hepsi tasarım olarak aynı standartta olsa da, her siklon için ayrı üretilmiş ve kullanılmıştır.

Tablo 3.7 B3 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		B3-0	B3-4	
10	Giriş PM yükü (kg/s)	0,000841	0,000841	
	Partikül tutma verimi (%)	93,02	89,7	
	Basınç kaybı (Pa)	500	430	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	9,18E-05	7,89E-05	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,09E-03	9,39E-04	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,03259	0,02906	10,8
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001135	0,001135	
	Partikül tutma verimi (%)	92,27	89,16	
	Basınç kaybı (Pa)	895	807	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	2,22E-04	2,00E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,95E-03	1,76E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,05881	0,05488	6,7
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,00143	0,00143	
	Partikül tutma verimi (%)	90,89	89,3	
	Basınç kaybı (Pa)	1330	1205	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	4,15E-04	3,76E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,90E-03	2,63E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,08872	0,08181	7,8

C1 grubu siklonlar için yapılan maliyet analizleri Tablo 3.8’de sunulmuştur. Giriş kesit alanı bakımından geniş bir girişe sahip olan bu siklonlarda, istenilen gaz giriş hızını elde etmek için ihtiyaç duyulan debi de artmaktadır. Yapılan analiz sonucunda helezonik tavanlı siklonların standart siklonlara oranla ortalama %26 mertebelerinde maliyet azalmasına sebep oldukları tespit edilmiştir. Yüksek basınç kayıplarının gerçekleştiği C1-0 siklonuna göre helezonik tavanlı C1-4 siklonun bu oranlarda tasarruf sağlaması iyi bir sonuç olarak nitelendirilebilir.

Son olarak Tablo 3.9’da sunulan D1 grubu siklonlara dair maliyet hesapları incelendiğinde, ilk iki gaz giriş hızında (10 m/s ve 13,5 m/s) yapılan deneylerde, helezonik tavan yapısının % 25’ten fazla tasarruf sağladığı görülmüştür. En yüksek gaz giriş hızında ise standart tavanlı siklonda görülen yaklaşık 3000 Pa mertebelerindeki basınç kaybı değeri, helezonik tavanlı D1-4 siklonunda %30 civarında azalma göstermiştir. Basınç kaybındaki bu derecede bir azalma da ilgili siklonda % 22’lik maliyet azalımı anlamına gelmektedir. Tüm siklon grupları içerisinde en geniş giriş kesit alanına sahip D grubu siklonlarda, helezonik tavan yapısının işletme maliyetlerine etkisinin pozitif yönde olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 3.8 C1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		C1-0	C1-4	
10	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001009	0,001009	
	Partikül tutma verimi (%)	96,57	94,96	
	Basınç kaybı (Pa)	701	524	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	1,54E-04	1,15E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	1,53E-03	1,14E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,04401	0,03346	24,0
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001362	0,001362	
	Partikül tutma verimi (%)	97,16	95,33	
	Basınç kaybı (Pa)	1320	968	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	3,93E-04	2,88E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,88E-03	2,11E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,08237	0,06156	25,3
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001716	0,001716	
	Partikül tutma verimi (%)	97,13	96	
	Basınç kaybı (Pa)	2183	1530	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	8,17E-04	5,73E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	4,76E-03	3,34E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,13626	0,09663	29,1

Tablo 3.9 D1 grubu siklonlar için işletme maliyet analizi

Giriş hızı (m/s)	Parametre	Siklon Kodu		Maliyet Azaltımı (%)
		D1-0	D1-4	
10	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001262	0,001262	
	Partikül tutma verimi (%)	96,18	91,14	
	Basınç kaybı (Pa)	1108	760	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	3,05E-04	2,09E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	2,42E-03	1,66E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,06984	0,05056	27,6
13,5	Giriş PM yükü (kg/s)	0,001703	0,001703	
	Partikül tutma verimi (%)	96	91,84	
	Basınç kaybı (Pa)	1910	1325	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	7,10E-04	4,93E-04	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	4,17E-03	2,89E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,12062	0,08747	27,5
17	Giriş PM yükü (kg/s)	0,002145	0,002145	
	Partikül tutma verimi (%)	95,57	90,67	
	Basınç kaybı (Pa)	2905	2150	
	Siklonda güç tüketimi (kW)	1,36E-03	1,01E-03	
	Birim işletme gücü (kW / (m ³ /s))	6,34E-03	4,69E-03	
	Maliyet verimliliği (kWh/ton PM)	0,18429	0,14376	22,0

3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları

HAD modelleri ile performans değerlendirmesi, deneysel çalışmalarda olduğu gibi basınç kaybı ve partikül tutma verimi olmak üzere iki farklı parametre açısından yapılmıştır. Basınç kaybına dair elde edilen deneysel veri, model kalibrasyonu için kullanılmıştır. Çalışmalarda siklonların statik basınç, tanjant hız ve eksenel hız gibi parametrelerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, renkli haritalar şeklinde görsel olarak sunulmaktadır. Bu haritalar yalnızca sayısal değerleri görselleştirmekle kalmayıp aynı zamanda siklondaki iç ve dış vorteksin yapısı hakkında da bilgi vermektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen tecrübeler ışığında HAD modellerinin yalnızca standart ve helezonik tavanlı siklonlar ile gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür. Ayrıca modelleme çalışması, siklonların birbiriyle kıyaslanması amacıyla yapılmamıştır. Sonuçları, farklı siklonların birbirine göre durumunu değerlendirmek amacıyla yorumlamak yanlış olacaktır. Çalışmanın amacı yalnızca belirlenen siklonlarda giriş paletlerinin performansa etkisini araştırmaktır.

3.3.1 Kalibrasyon

Siklonlarda basınç kaybına dair deneysel veri ile yapılan kalibrasyon sonucu modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar Tablo 3.10'da verilmiştir. Genel olarak model sonuçlarının deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu, sonuçlardan rahatlıkla görülebilmektedir. Tüm siklonlar içerisinde yalnızca birkaç hız denemesinde olmak üzere deney ve model sonuçları arasında % 10 mertebelerinde farklar vardır. En yüksek farklar sırasıyla B2-4 siklonunun 10 m/s'lik, A3-0 siklonunun 13,5 m/s'lik ve A2-4 siklonunun 13,5 m/s'lik giriş hızlarında gerçekleşmiştir. En düşük farklar ise B2-4 siklonunun 17 m/s, A2-0 siklonunun 13,5 m/s, B1-0 ve B2-0 siklonlarının da 13,5 m/s'lik giriş hızı denemelerinde görülmüştür. Tüm grupların standart tavanlı versiyonlarında deneysel ve model sonuçları arasında ortalama fark % 3,98'dir. Helezonik tavanlı siklonlarda ise ortalama % 4,48 fark vardır. Genel itibarıyla model ve deney sonuçlarının bu derecelerde uyumluluk göstermesi, HAD modellerinin başarısını tekrar ortaya koymaktadır. Basınç kaybı modellerinin yüksek doğruluk payıyla

tahmin edilebilmesinden hareketle yapılan kalibrasyon ile hız profili için yapılan çalışmaların da yüksek güvenilirlikli olduğu söylenebilir.

Tablo 3.10 Basınç kaybına dair deney ve model sonuçları

Siklon grubu	Giriş hızı (m/s)	Basınç kaybı (Pa)					
		Standart tavan			Helezonik tavan		
		deney	model	<i>fark (%)</i>	deney	model	<i>fark (%)</i>
A1	13,5	778	821	5,53	444	419	5,63
	17	1350	1295	4,07	710	648	8,73
	20,5	1897	1863	1,79	1005	942	6,27
A2	13,5	623	619	0,64	444	402	9,46
	17	997	967	3,01	695	705	1,44
	20,5	1367	1399	2,34	975	940	3,59
A3	13,5	550	604	9,82	500	461	7,80
	17	950	961	1,16	937	929	0,85
	20,5	1290	1368	6,05	1280	1199	6,33
B1	10	488	532	9,02	357	328	8,12
	13,5	1070	1077	0,65	607	602	0,82
	17	1677	1698	1,25	903	957	5,98
B2	10	440	413	6,14	345	308	10,72
	13,5	765	760	0,65	558	553	0,90
	17	1180	1211	2,63	872	876	0,46
B3	10	500	479	4,20	430	443	3,02
	13,5	895	888	0,78	807	800	0,87
	17	1330	1444	8,57	1205	1280	6,22
C1	10	701	656	6,42	524	499	4,77
	13,5	1320	1282	2,88	968	930	3,93
	17	2183	1978	9,39	1530	1478	3,40
D1	10	1108	1047	5,51	760	730	3,95
	13,5	1910	1897	0,68	1325	1314	0,83
	17	2905	2970	2,24	2150	2076	3,44
Ortalama Fark % 3,98±% 3,05					Ortalama Fark % 4,48±% 3,07		

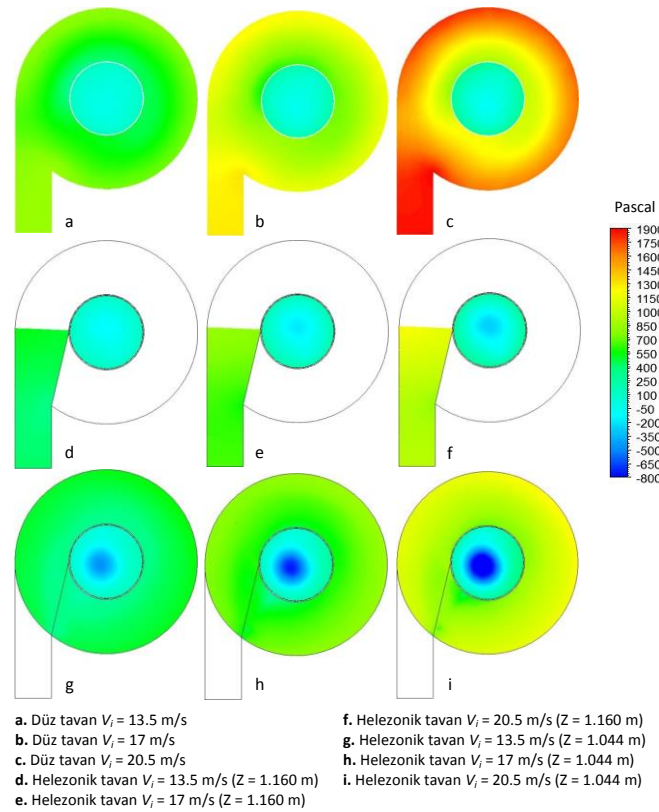
3.3.2 Basınç ve Hız Alanları

A Grubu Siklonlar

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de A1 kodlu siklonlar için elde edilen basınç haritaları gösterilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, siklonun giriş ve çıkışından alınan fark basınç ölçümlerine dayanarak bir siklonda gerçekleşen toplam basınç kaybını vermektedir. Görsellerde sunulan haritalarda ise giriş ve çıkış

bölgelerinin yanı sıra siklonun her bölgesinde oluşan basınç değerlerini görmek mümkündür.

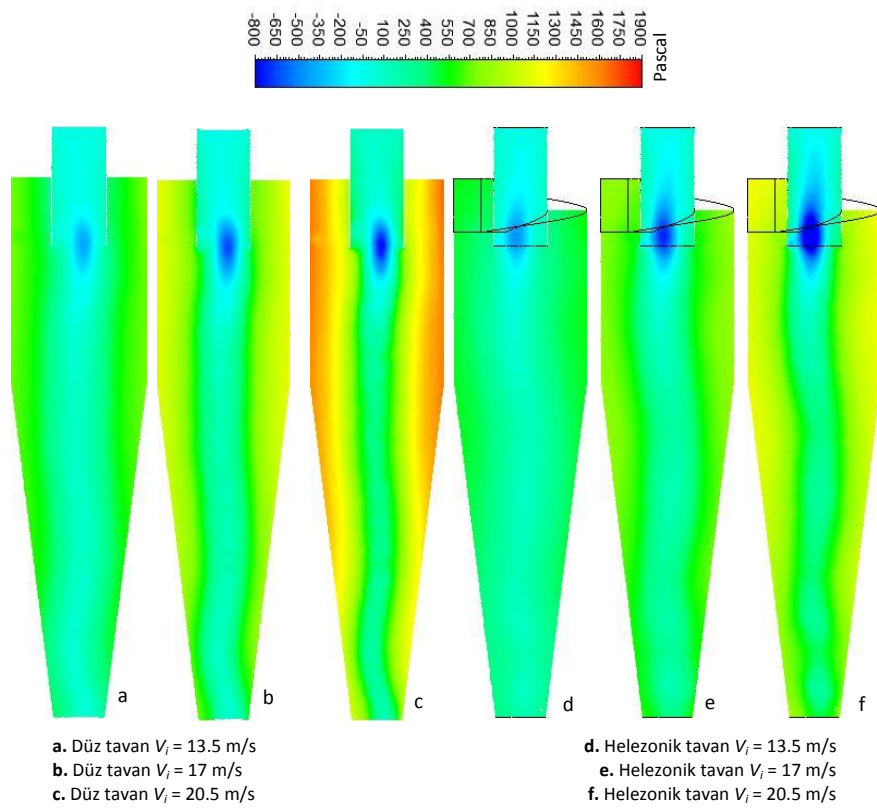
Siklonların üstten görünümünün yer aldığı Şekil 3.17'deki (a), (b) ve (c) görselleri standart tavanlı siklonlara aittir. Diğer altı görsel ise helezonik tavanlı siklonların üç farklı hızda ve iki farklı kesitte oluşturulmuş basınç haritalarını sunmaktadır. Farklı kesitlerden görünümünün kullanılmasının nedeni, rampa yapısının siklon girişinin üst kısmından başlayarak alt kısmında bitmesidir. Haritalar, siklonlarda bir kesit olarak, akımın o kesit üzerindeki sayısal değerlerini bir renk skalası limitlerinde görselleştirmektedir. Bu yüzden helezonik tavanlı siklonlarda üstten görünümün incelenebilmesi için giriş yüksekliğinin üst ve alt seviyelerinden kesit alınmıştır. Tüm siklon grupları için basınç ve hız haritalarının üstten görünümü incelenirken bu bilgi göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 3.17 A1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)

A1 kodlu siklonlara karşıdan bakıldığında yüksek hızın basınca etkisi açıkça görülmektedir. Şekil 3.18.c ve Şekil 3.18.f, standart ve helezonik tavanlı siklonlar için en yüksek gaz giriş hızının olduğu modellerdir. Her bir siklon kendi

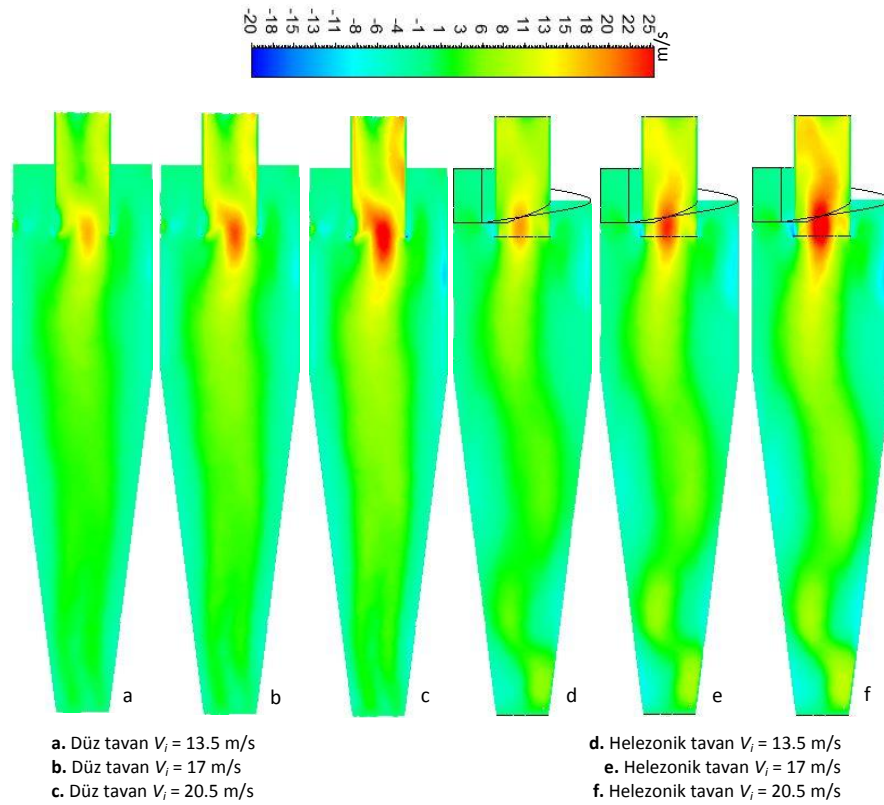
içinde kıyaslandığında, hızla birlikte basıncın nasıl arttığı açıkça görülmektedir. Paletli ve paletsiz siklonlar birbiriyle kıyaslandığında ise helezonik tavanın basınç kaybını düşürücü etkisi net olarak anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar deneysel çalışmalarla da örtüşmektedir. Ancak deneysel çalışmalarla anlaşılması imkansız olan bir durum model çalışmaları ile ortaya konulmuştur. Özellikle yüksek hızlarda iç vorteksin hareketinde dalgalanma olduğu tespit edilmiştir. Model sonuçlarına göre artan gaz giriş hızında her iki siklonda da negatif basınç alanları oluştuğu gözlenmiştir. Özellikle çıkış borusunun hemen girişinde akımın ani daralmasının, o bölgede türbülans oluşumuna neden olduğu söylenebilir.



Şekil 3.18 A1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

Bir siklondaki gaz akımının hızı farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Eksenel ve tanjant hızlar, toplam hızın belirlenmesinde belirgin etkiye sahip hız bileşenleridir. Eksenel hız, hareketin siklon boyunca aşağı ve yukarı yönlü hızını temsil etmektedir. Şekil 3.19'da A1-0 ve A1-4 siklonlarının üç farklı hızda eksenel hız haritaları verilmiştir. Aşağı yönlü hızın negatif, yukarı yönlü hızın ise pozitif olduğu görsellerde hız değişimlerinin tam da çıkış yapısının ağzında yaşandığı görülmektedir. O bölgedeki ani daralma iç vorteksteki akımın

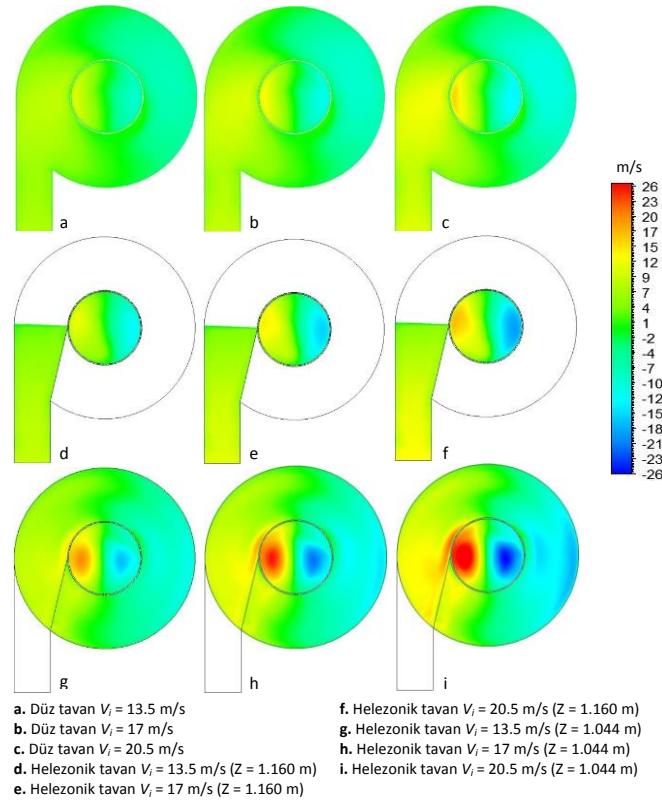
hızlanmasına sebep olmaktadır. Artan gaz giriş hızıyla birlikte helezonik tavanlı A1-4 siklonunda en yüksek eksenel hızın, çıkış borusu girişinde 25 m/s civarlarına çıktığı ve çıkış borusunun ortalarına kadar yavaşça azaldığı anlaşılmaktadır. Standart tavanlı A1-0 siklonunda ise yalnızca çıkış borusu girişinde eksenel hızın 25 m/s mertebelerine çıktığı görülmektedir. Eksenel hız parametresi, siklon yüksekliği boyunca değişen bir değer olduğu için enine kesit alınarak üstten görünümün incelenmesi anlamsız olacaktır. Bu sebeple tüm siklonlarda eksenel hız haritaları yalnızca karşıdan görünüm şeklindedir.



Şekil 3.19 A1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

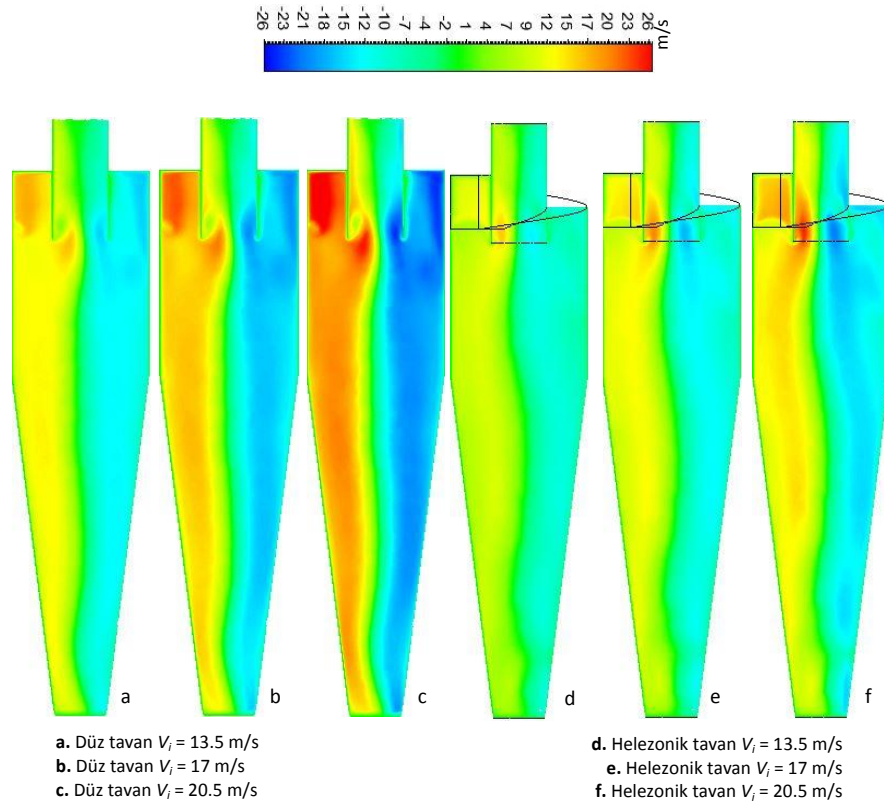
Gaz hareketinin toplam hızını belirleyen bir diğer hız bileşeni de tanjant hız olarak ifade edilmektedir. Teğetsel hız olarak da ifade edilebilen bu hız bileşeni, radyal mesafeye dik gelmektedir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21, A1 grubu siklonların tanjant hız haritalarını sırayla üstten ve önden görünüm şeklinde sunmaktadır. Görsellerde gaz giriş yönündeki hız değerleri pozitif sayılarla ifade edilirken, ters yöndeki hızlar ise negatif değerler almaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere standart tavanlı siklonlarda üstten görünüm haritalarını elde etmek için giriş ağzının en üst noktasından kesit alınmaktadır. Helezonik tavanlı siklonlarda ise

rampa yapısından ötürü aynı yükseklikten alınan kesitte, giriş ağzı ve çıkış borusunun üst yüksekliğinde oluşan hız değerleri görülmektedir. Şekil 3.20'de ilk ve ikinci sıradaki gösterimlerde çıkış borusunun üst kısmı görülmektedir. Özellikle düz tavanlı (paletsiz) siklonlarda çıkış borusu içinde simetrik hız dağılımı görülebilmektedir. Şekil 3.20.g, Şekil 3.20.h ve Şekil 3.20.i'de ise palet yapısının bittiği yükseklikteki tanjant hızlar haritalanmıştır. Bu görsellerde hız artışıyla birlikte akımın çıktığı yüksek hızlar görülebilmektedir.



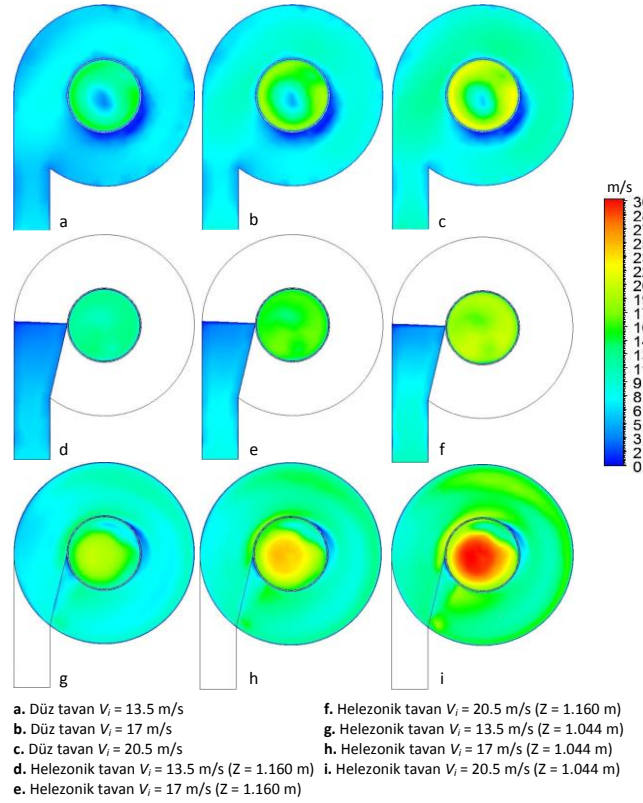
Şekil 3.20 A1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)

Standart tavanlı A1-0 siklonunda, özellikle akımın rahatladığı gövde ve konik kısmın üst bölgelerinde ve duvara yakın bölgelerde tanjant hızlar açısından simetrik bir görüntü oluştuğu söylenebilir. Standart tavanlı bu siklonda en yüksek tanjant hız değerleri, gövdenin üst bölgesinde ve çıkış borusu ağzında görülmektedir. Helezonik tavanlı A1-4 siklonunda ise düşük hızlardan itibaren iç vorteks yapısının dalgalı olduğu ve en yüksek tanjant hız değerlerinin çıkış borusu ağzında gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.21 A1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

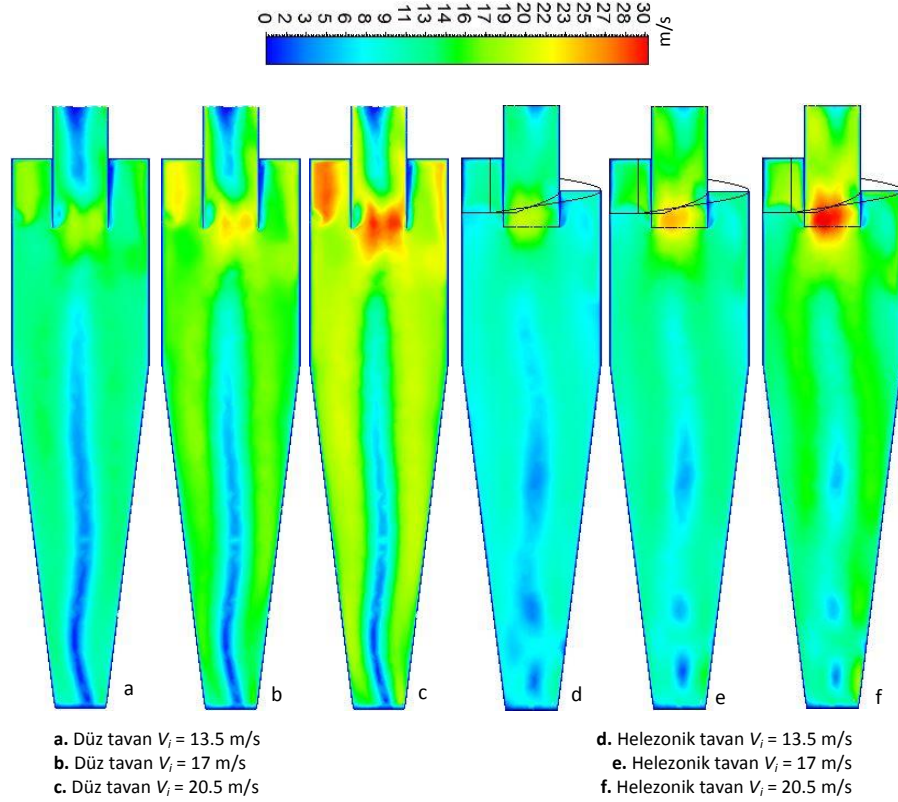
Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te A1 kodlu siklonlar için toplam hız haritaları verilmiştir. Toplam hız parametresi, tüm hız parametrelerinin bileşeni olarak ortaya çıkmaktadır. Siklonlara üstten bakıldığında gövdede hızın sıfır veya sıfıra çok yakın olduğu izlenimi oluşmaktadır (Şekil 3.22). Ancak daha önce de belirtildiği gibi üstten görünüm şeklinde elde edilen görseller, giriş yapısının üst yüksekliğinden alınan kesitlerle oluşturulmaktadır. Duvara çok yakın seyreden akımın 0 m/s'ye yakın bir hıza sahip olması beklenen bir durumdur. Standart tavanlı siklonlarda çıkış borusu çevresinde ölü alan olarak tabir edilebilecek, hızın 0 m/s mertebelerinde olduğu bölgeler olduğu görülmektedir. Bunun sebebi merkezkaç kuvveti etkisiyle akımın duvara doğru sıkışması olarak yorumlanabilir. Helezonik tavanlı siklonda palet yapısının bu ölü alanı büyük oranda azalttığı görülmektedir.



Şekil 3.22 A1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)

Toplam hız haritalarında rampa yapısının iç vorteksi nasıl etkilediği açıkça görülmektedir (Şekil 3.23). Paletsiz A1-0 siklonunda üç farklı giriş hızında yapılan modelde, iç vorteks dalgalı bir yapıda gözükse de hızın merkezde 0 m/s olduğu akış düzenine sahiptir. Ancak helezonik tavanlı siklonda giriş hızı 10 m/s olan siklonda dahi vorteks yapısının merkezindeki hız değişimleri göze çarpmaktadır.

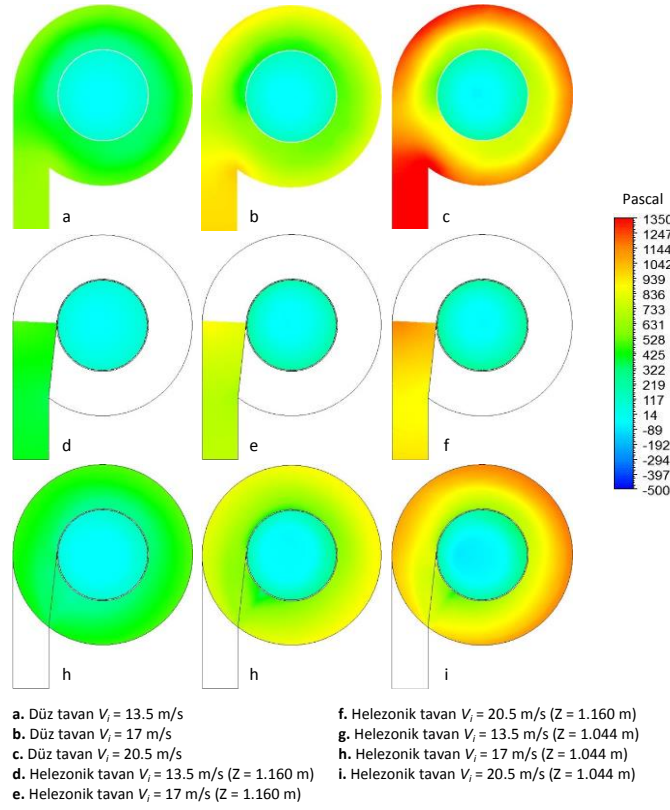
Toplam hız parametresi, genel olarak standart tavanlı siklon gövdesinde daha yüksek değerlere sahiptir. Ancak 20,5 m/s'de A1-4 siklonunda, iki siklon arasındaki maksimum hız değeri oluşmaktadır. Bunun sebebi, düzensiz iç vorteksin çıkış borusu girişinde aniden daralan akış alanı ve takiben hızın yükselmesi olarak yorumlanabilir.



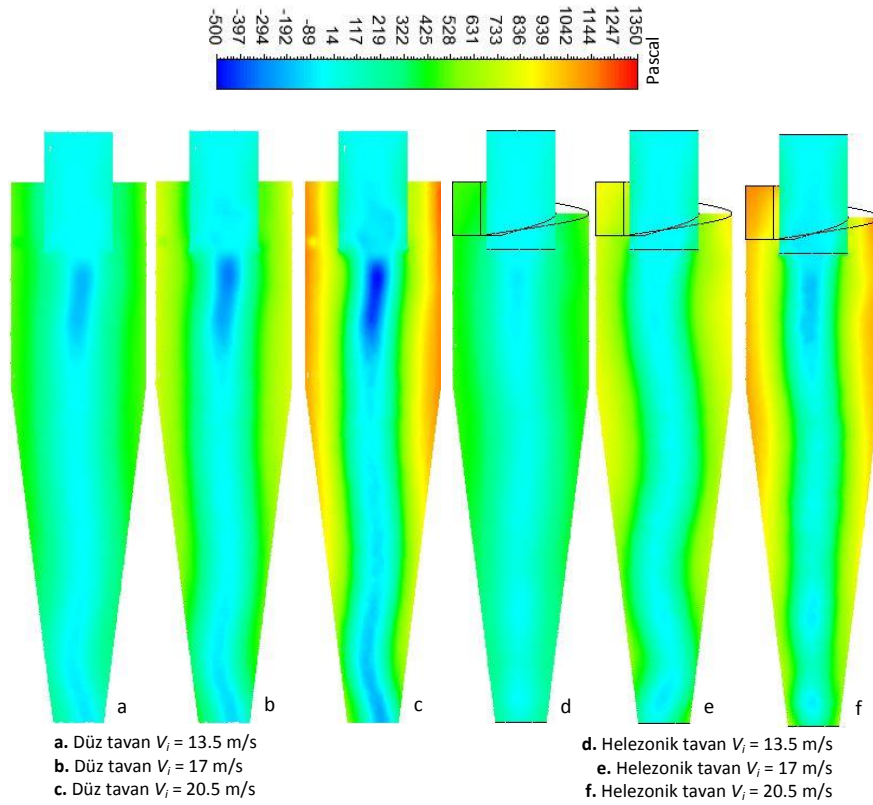
Şekil 3.23 A1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de A2 kodlu siklonlar için basınç haritaları verilmiştir. Gaz giriş hızındaki artışın etkisiyle basınç kayıplarındaki artış rahatlıkla görülebilmektedir. Haritalara göre iç vorteks yapısı, bu siklon grubu için doğrudan helezonik tavan yapısının etkisinde değildir. Örneğin en yüksek giriş hızında A2-0 siklonunda çok dalgalı bir iç vorteks gözlenirken, helezonik tavanlı siklonunda daha stabildir. Bu siklon grubu için ortanca giriş hızı değeri olan 17 m/s’de ise A2-4 siklonunda çok dalgalı bir iç vorteks yapısı gözlenmektedir. Buradan hareketle iç vorteks yapısının sadece helezonik tavandan etkilendiği yorumunu yapmak yanlış olacaktır.

A2 grubunda, standart tavanlı siklonlarda hız artışıyla birlikte çıkış borusu girişinde ve gövdede negatif basınç oluşumu gözlenirken; helezonik tavanlı A2-4 siklonunda neredeyse hiç oluşmamaktadır. Dikkat çeken bir diğer nokta, palet yapısının bulunduğu siklonlarda yüksek basınç kaybı olmasıdır. Daha dar çıkış borusuna sahip A1-4 siklonunda, standart tavanlı muadiline göre basınç kayıpları daha düşüktür (Şekil 3.18). A2-4 siklonunda ise helezonik tavan, A2-0 siklonuna oranla gövdedeki basınç kaybını arttırmıştır (Şekil 3.25).

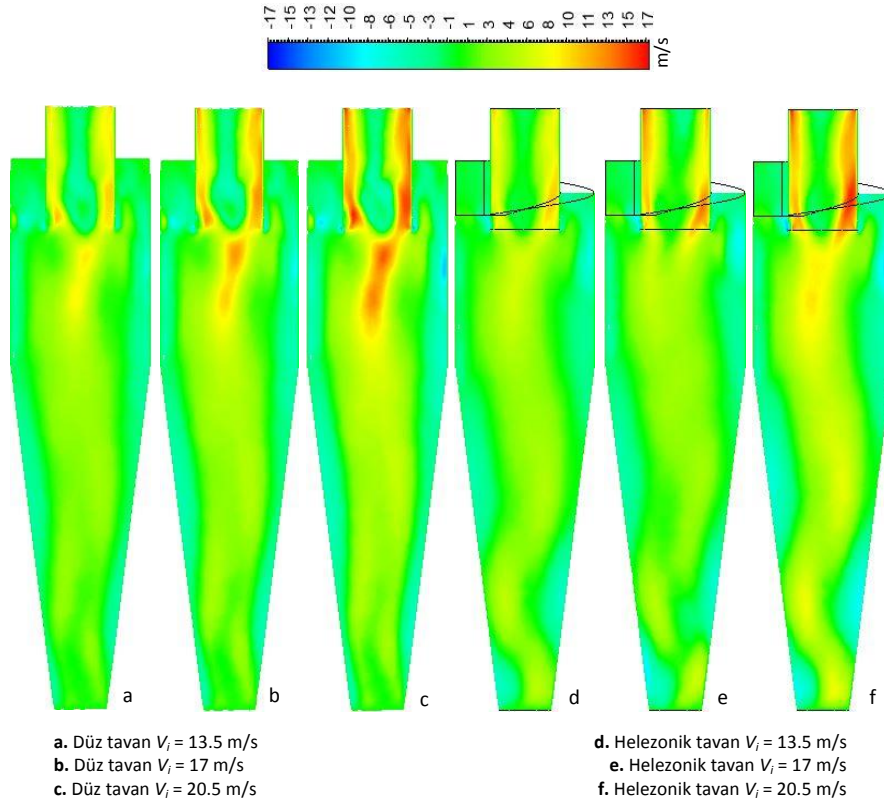


Şekil 3.24 A2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.25 A2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

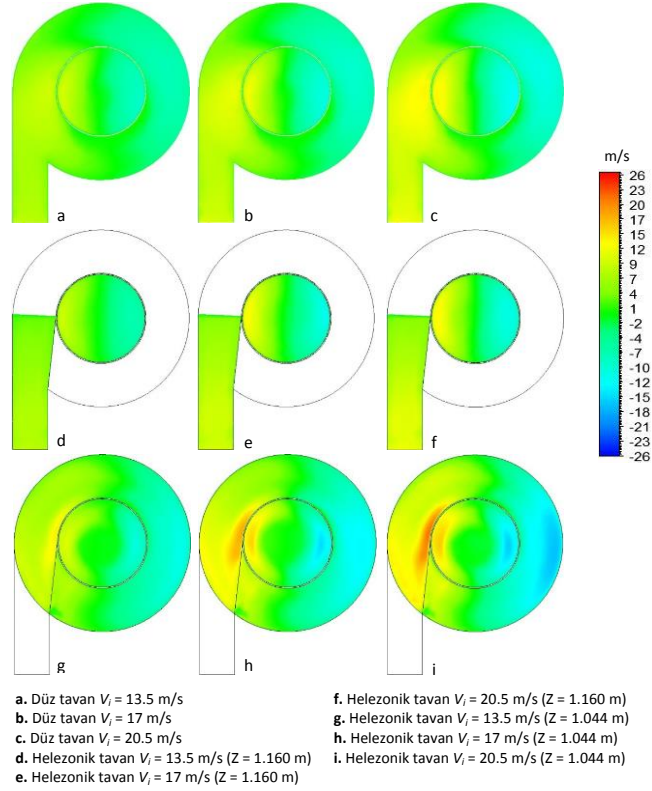
Şekil 3.26'da A2-0 ve A2-4 siklonlarının üç farklı hızda eksenel hız haritaları verilmiştir. Standart tavanlı siklonda büyük hız değişimleri tam da çıkış yapısının ağzında başlayıp borunun içerisinde devam etmektedir. O bölgedeki ani daralma iç vorteks akımının hızlanmasına sebep olmaktadır. Helezonik tavanlı siklonda ise çıkış borusu içerisinde en yüksek eksenel hızlar gerçekleşmektedir. Artan gaz giriş hızıyla birlikte helezonik tavanlı A2-4 siklonunda ve standart tavanlı A2-0 siklonunda en yüksek eksenel hızların 17 m/s civarlarına çıktığı anlaşılmaktadır.



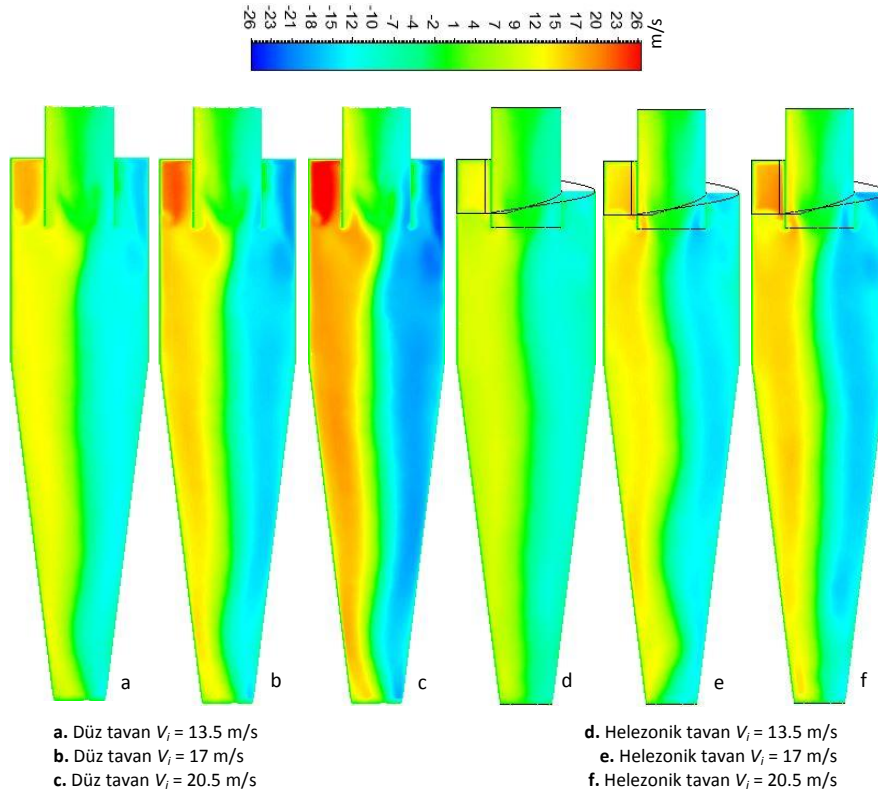
Şekil 3.26 A2 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de A2 grubu siklonlar için tanjant hız haritaları verilmiştir. Artan gaz giriş hızıyla birlikte standart tavanlı siklonda daha keskin bir tanjant hız artışı gözlenmektedir. Bu siklonda en yüksek gaz giriş hızında 26 m/s mertebelerine çıkan tanjant hız bileşeni, rampalı A2-4 siklonunda ise 17 m/s mertebelerine ulaşmaktadır. Bu değerler dış vorteksin oluşmaya başladığı bölgede gözlenirken, gövdede 5-6 m/s civarı düşüşler gözlenmektedir. Siklonların üstten görünüm haritalarında, duvar yüzeyinde hız 0 m/s olacağından tanjant hızların düşük ve birbirine yakın gözükmesi beklenen bir

durumdur. Palet yapısının dönüşünü tamamladığı yükseklikten alınan kesitte ise tanjant hız bileşenindeki değişim daha net görünmektedir.

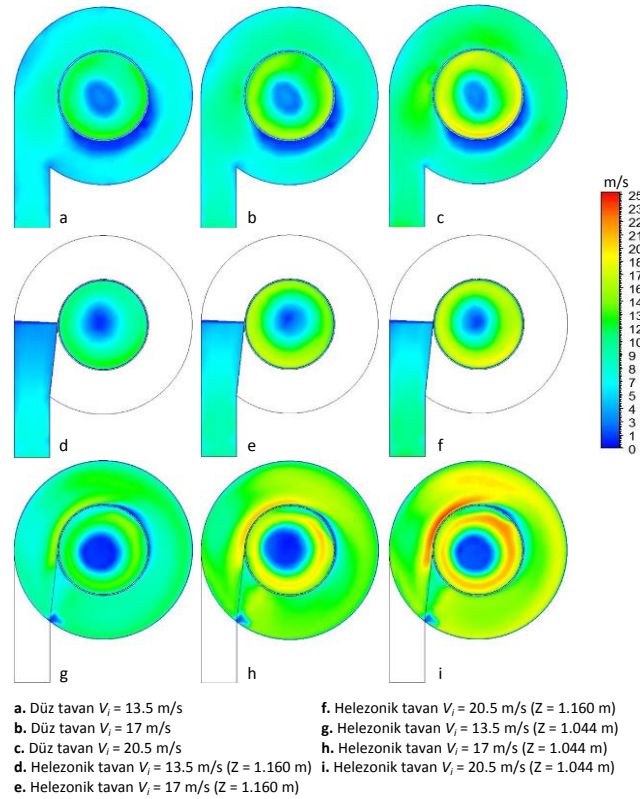


Şekil 3.27 A2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.28 A2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

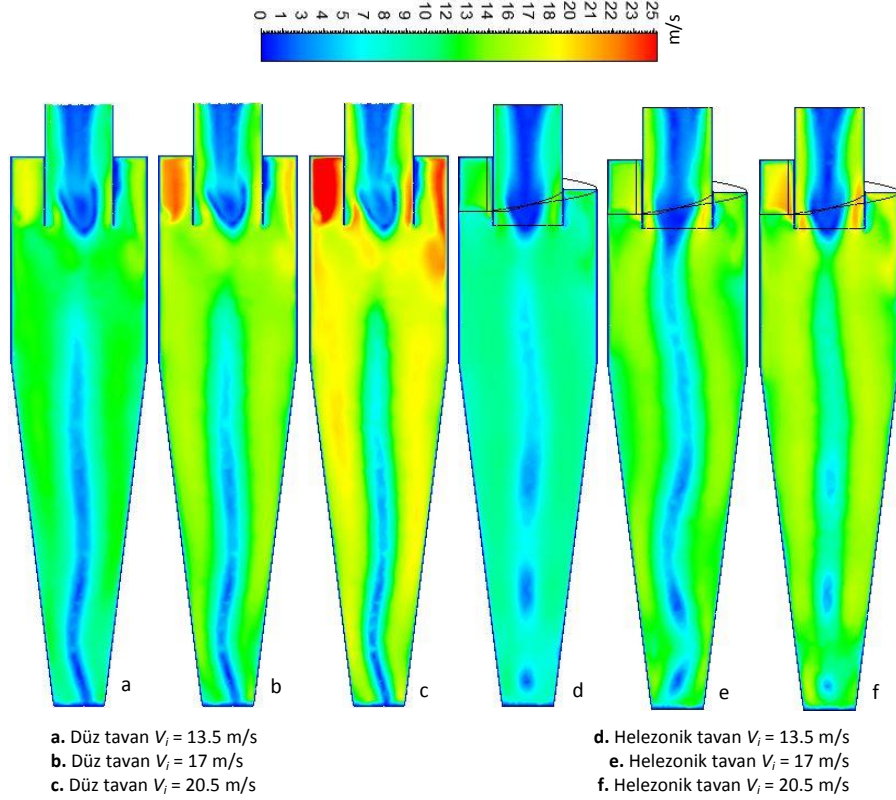
Tanjant hız grafiklerinin ardından A2-0 ve A2-4 siklonları için üç farklı giriş hızında toplam hız haritaları verilmiştir (Şekil 3.29 ve Şekil 3.30). A grubu siklonlarda deneysel çalışmalarda belirlenen en yüksek gaz giriş hızı 20,5 m/s olarak belirlenmiştir. Ancak grafiklerde, özellikle standart tavanlı siklonda gövde içerisinde 23 ila 25 m/s akış hızları tespit edilmiştir. Yine paletsiz A2-0 siklonunda iç vorteks merkezinde hızın 0 m/s olduğu görülmektedir. Helezonik tavanlı siklonda ise vorteks merkezinde değişken hız değerleri dikkat çekmektedir.



Şekil 3.29 A2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)

A2 grubunda her iki siklonda da tüm gaz giriş hızları için çıkış borusu girişinde ve içerisinde düzgün vorteks akımı olduğunu söylemek mümkündür. Hem üstten hem de önden görünüm haritalarına göre merkezde hızın sıfır olduğu düzgün dairesel hareket rahatlıkla görülebilmektedir. Ancak standart tavanlı siklonda gazın çıkış borusuna yaklaşma hızı çok daha yüksektir.

Siklon girişinden itibaren oluşan vorteksin çıkış borusu etrafında neden olduğu ölü alan, A2-0 siklonunda da görülmektedir (Şekil 3.29). Palet yapısıyla birlikte bu ölü alan oluşumu neredeyse tamamen ortadan kalkmıştır (Şekil 3.30).

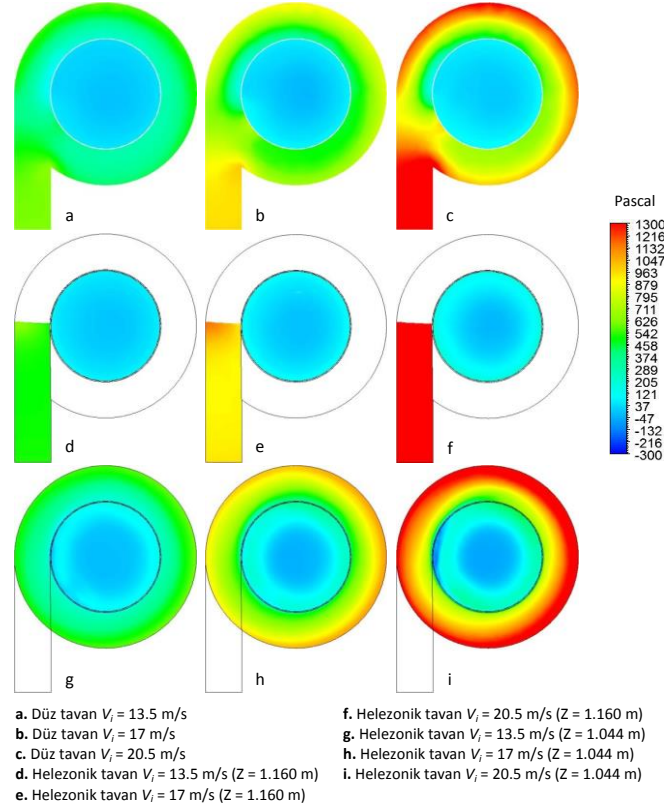


Şekil 3.30 A2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

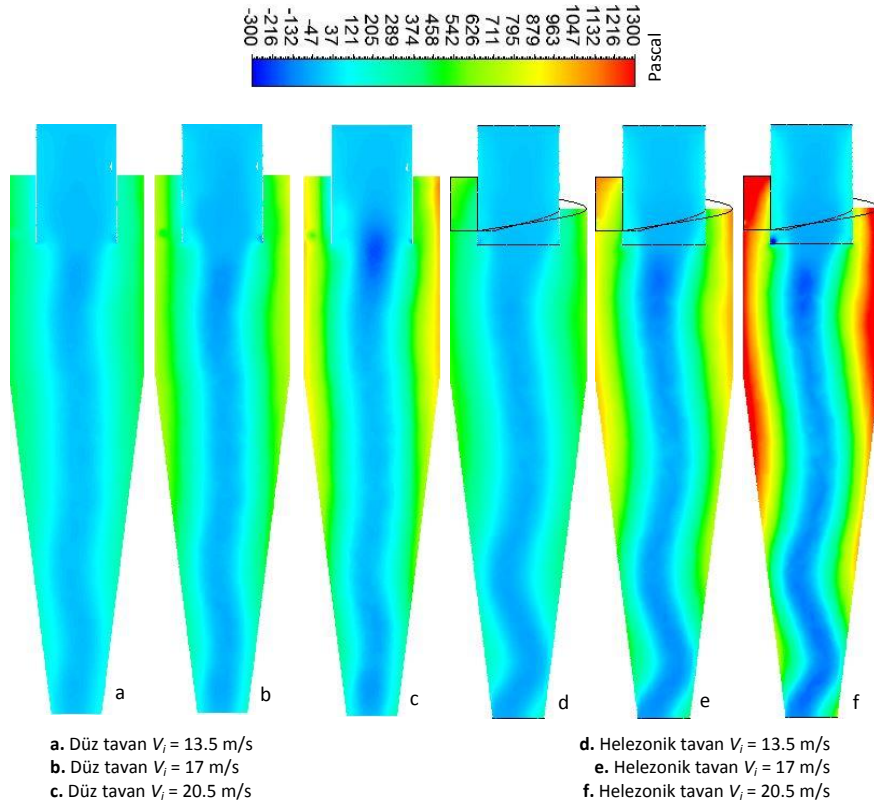
A3 kodlu siklonlar için basınç haritaları Şekil 3.31 ve Şekil 3.32’de verilmiştir. Gaz giriş hızlarının artmasıyla birlikte basınç değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu siklon grubunda çıkış borusu çapı (B3 grubu ile beraber) diğer gruplara göre daha geniştir. Bu sebeple düşük hızlarda siklon içerisinde büyük basınç farkları oluşmamaktadır. Gaz giriş hızı arttıkça gövde içerisinde oluşan basınç farkları da daha belirgin seviyelere çıkmaktadır. Özellikle helezonik tavanlı A3-4 siklonunda, gövde içerisinde en yüksek basınç ve en düşük basınç değerlerini görmek mümkündür.

A3 grubu siklonlar, hem helezonik tavanlı hem de standart tavanlı versiyonlarında birbirine çok yakın basınç kaybı değerlerine sahiptir. Bu ifade siklondaki toplam basınç kaybını temsil etmektedir ve deneysel verilerle doğrulanmaktadır. Model sonuçları açısından incelendiğinde de, üstten görünüm haritalarında giriş ve çıkış arası basınç farkları deneysel verileri desteklemektedir (Şekil 3.31). Hem standart hem de helezonik tavanlı siklonlarda negatif basınç oluşumu çok kuvvetli değildir. Çıkış borusu çapının geniş olması nedeniyle iç vorteksin alt kısımlarında görülen negatif basınç, çıkış borusu girişinde büyük

oranda şiddetini korumaktadır. Ani daralmanın neden olduğu hız artışı ve dolayısıyla basınç düşüşü, bu siklonlarda daha zayıf gözükmemektedir.

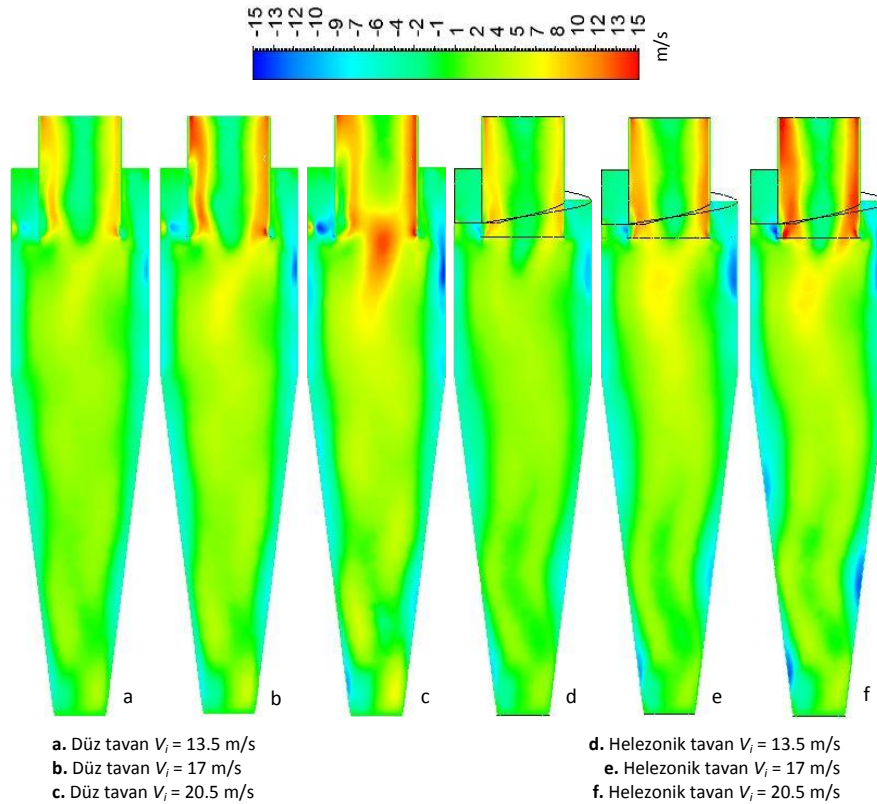


Şekil 3.31 A3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.32 A3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

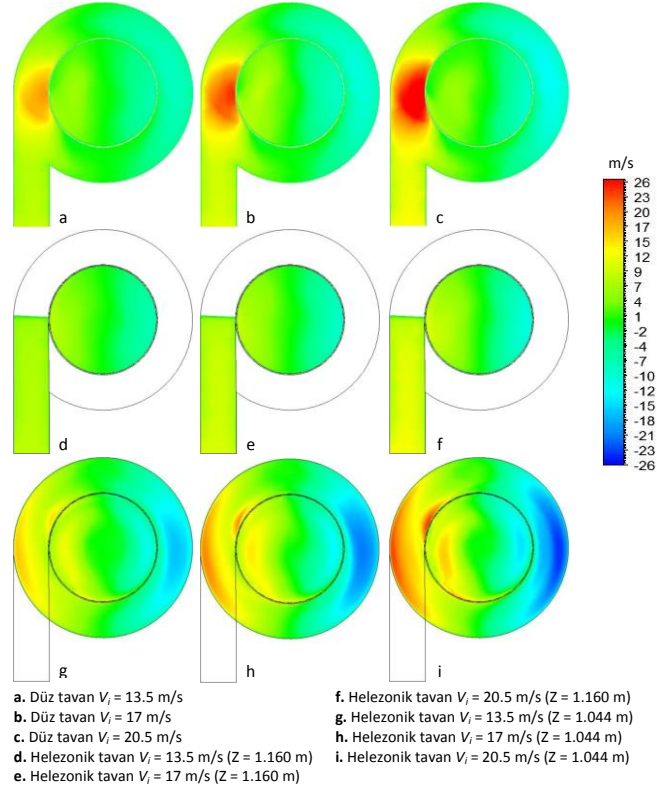
Şekil 3.33'te A3-0 ve A3-4 siklonlarının üç farklı hızda eksenel hız haritaları verilmiştir. Bu gruptaki siklonlarda en yüksek eksenel hız değerlerinin 15 m/s civarında olduğu gözlenirken, özellikle çıkış borusu içerisinde eksenel hızın yükseldiği görülmektedir. Dar çıkış yapısına sahip siklonlarda, özellikle çıkış borusu ağzında eksenel hız artışı görülmektedir. Ancak geniş bir çıkış borusu çapına sahip bu siklon grubunda ani daralma söz konusu değildir. Şekil 3.32 tekrar incelendiğinde bu bölgede önemli basınç kayıpları olmadığı görülecektir. Bu durumla ilişkili olarak ani bir hız değişimi de olmamaktadır. Çıkış borusu içerisinde ise iç vorteksin siklon gövdesindeki yapısına oranla daha dar bir kesitte yol aldığı görülmektedir. Bu da hız artışına neden olmaktadır. Özellikle yüksek gaz giriş hızlarında bu artış daha da belirgin görülmektedir.



Şekil 3.33 A3 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

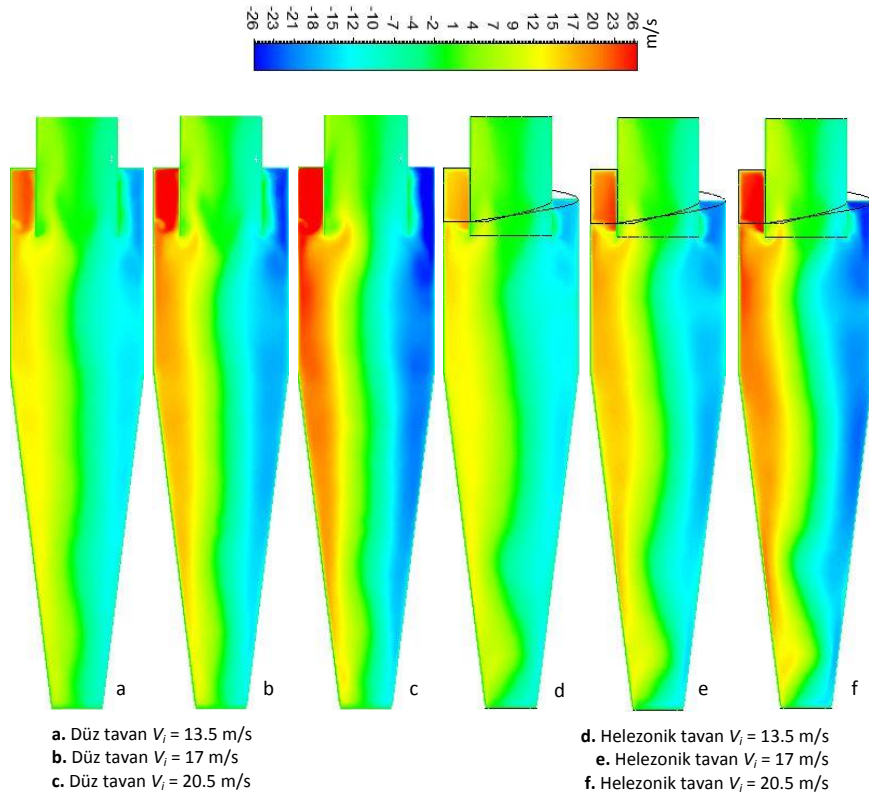
Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te A3 grubu siklonların tanjant hız haritaları verilmiştir. Çıkış borusunun genişliğinden ötürü, giriş ağzında ani bir genişleme olmamaktadır. Ayrıca dönüşün de başlamasıyla o bölgede akımın hızı oldukça artmaktadır. Bu hız artışı siklonun üstten görünümünde de rahatlıkla görülebilmektedir (Şekil 3.34.c). Çıkış borusu içerisinde ise geniş boru çapının

da etkisiyle düşük tanjant hız değerleri tespit edilmiştir. Siklonlarda gaz giriş hızı arttıkça yüksek tanjant hız değerlerinin, konik kısmın daha alt kısımlarında gerçekleştiği görülmektedir. Bu da iç vorteksin daha alt kısımlarda oluştuğu anlamına gelmektedir.

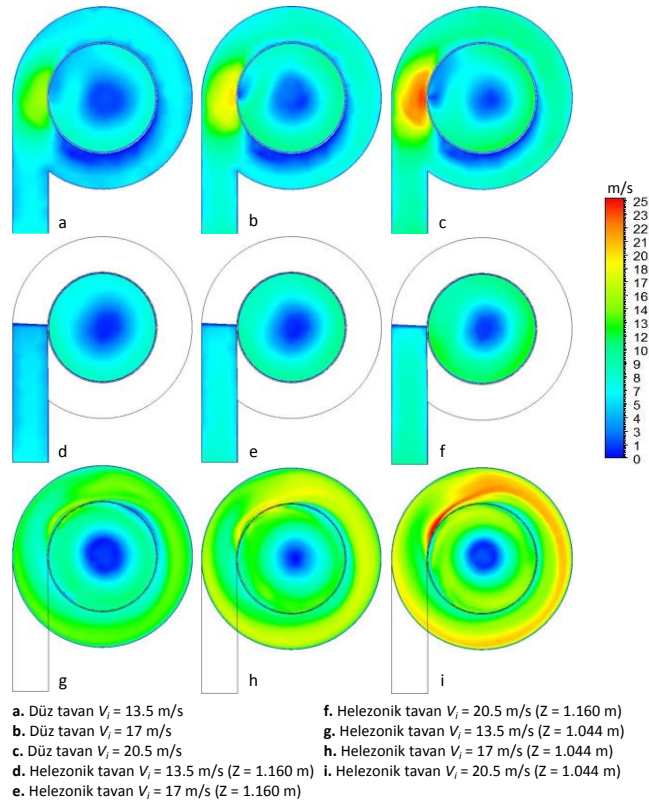


Şekil 3.34 A3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)

Şekil 3.36 ve Şekil 3.37'de A3 kodlu siklonlar için toplam hız haritaları verilmiştir. Basınç haritalarında olduğu gibi toplam hız haritalarında da rampa yapısının iç vorteksi nasıl etkilediği açıkça görülmektedir. Gaz giriş hızlarının farklı olduğu ilk üç siklon gösteriminde iç vorteksin yapısı, helezonik tavanlı siklonlara göre daha düzgün görünmektedir. Ancak helezonik tavanlı siklonlarda, tüm giriş hızları için vorteks yapısındaki bozulma ve dalgalanmalar göze çarpmaktadır. Çıkış yapısının diğer siklonlara göre daha geniş olmasının bu durumu değiştirmediği gözlenmektedir.

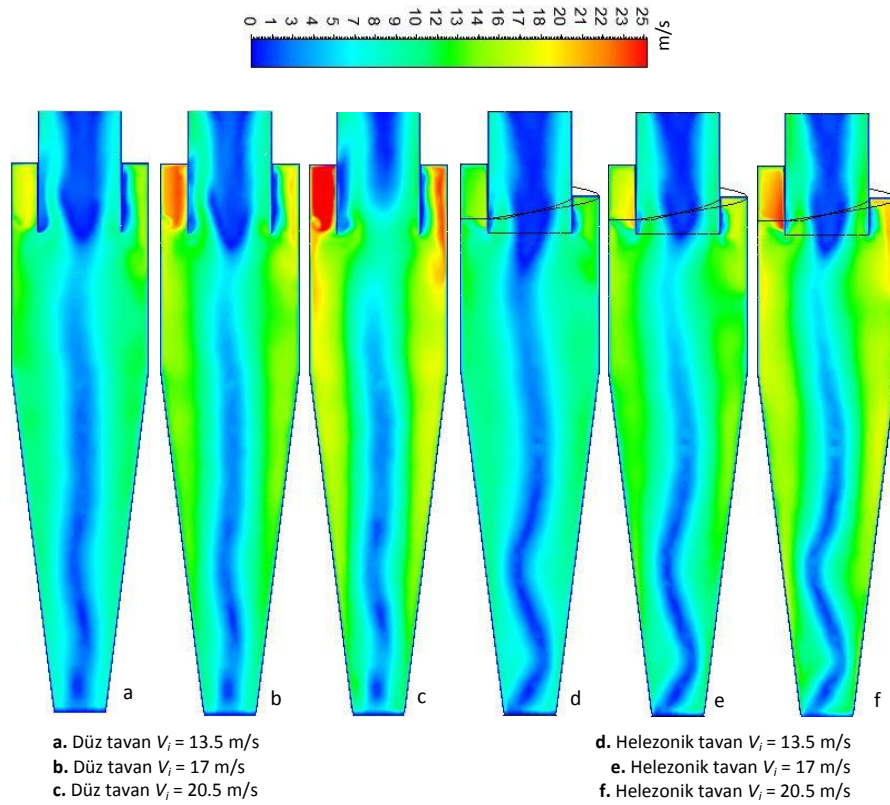


Şekil 3.35 A3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)



Şekil 3.36 A3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)

Basınç haritalarının gösterildiği Şekil 3.32 ile toplam hız haritalarının gösterildiği Şekil 3.37 dikkatle incelendiğinde akımın toplam enerjisinin nasıl dağılım gösterdiği net olarak görülmektedir. Her iki siklon için hız haritaları incelendiğinde, standart tavanlı A3-0 siklonunda girişten hemen sonraki bölgede gerçekleşen hızın, helezonik tavanlı A3-4 siklonundakinden çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Basınç haritalarına bakıldığında ise helezonik tavanlı siklonda, aynı bölgede çok daha yüksek basınç değerleri gözlenmektedir. Bu durum toplam enerjinin asla değişmeyeceği kuralı ile açıklanabilir. Bernoulli prensibi gereği bilindiği üzere akımın hızlandığı yerde statik basıncı düşer. Toplam enerji daima korunacağından, akımın yavaşlaması da statik basınç artışına neden olacaktır. Elde edilen görsellerde bu durum net olarak görülmektedir.

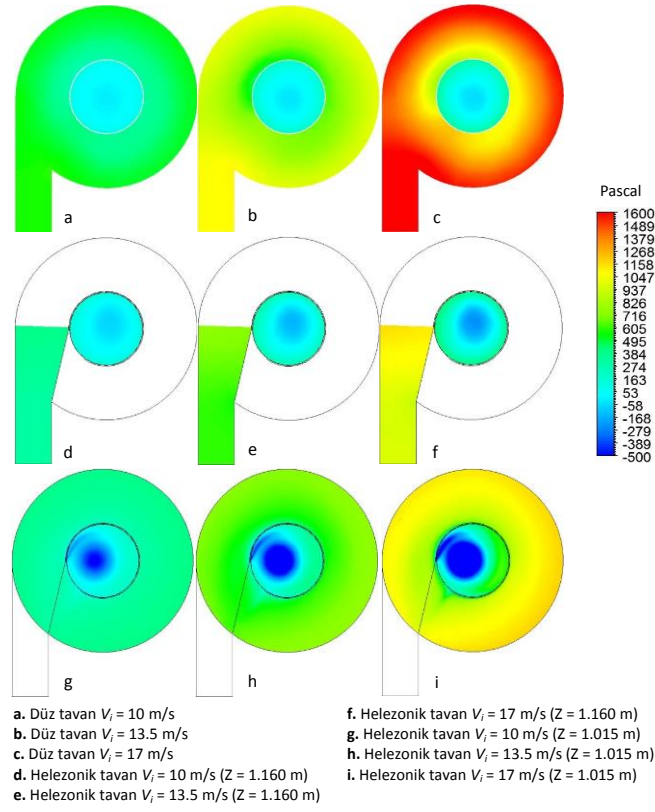


Şekil 3.37 A3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

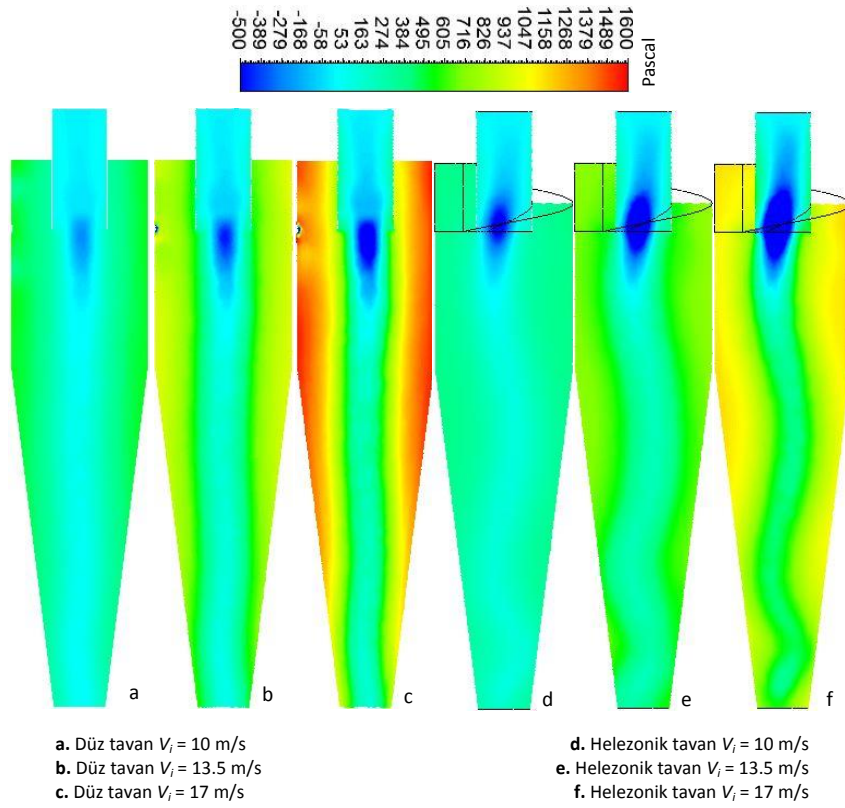
B Grubu Siklonlar

Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'da B1 kodlu siklonlar için oluşturulan basınç haritaları gösterilmiştir. Görsellerde gaz giriş hızı soldan sağa doğru artış göstermektedir. Hem standart hem de helezonik tavanlı siklonlarda, artan gaz giriş hızıyla birlikte basınç parametresindeki artış rahatlıkla görülmektedir. Helezonik tavan yapısının basınç kaybını azaltıcı etkisi bu grupta da söz konusudur. Grup bazında değerlendirildiğinde paletsiz siklonlarda maksimum basınç kaybının gerçekleştiği görülmektedir. Siklonların önden görünümüne bakıldığında standart tavanlı olanlarda iç vorteks stabil yapısı dikkat çekmektedir. Özellikle en yüksek gaz giriş hızı olan 17 m/s'de dahi çok ufak dalgalanmalar söz konusudur. Ancak palet yapısıyla birlikte helezonik tavanlı siklonlarda, en düşük giriş hızından en yükseğine kadar iç vorteks yapısının çok dalgalı bir görüntüsü vardır (Şekil 3.39). Üstten görünüm haritaları incelendiğinde de bu durum fark edilmektedir. Örneğin aynı siklonun farklı yüksekliklerdeki kesit alanlarını gösteren Şekil 3.38.f ve Şekil 3.38.i'de, iç vorteks merkezinin yer değiştirdiğini görmek mümkündür.

Basınç kaybı grafiklerinde dikkat çeken bir diğer nokta da çıkış borusu ağzında oluşan negatif basınç alanıdır (Şekil 3.39). Artan gaz giriş hızıyla birlikte bu negatif basınç bölgelerini tüm siklonlarda daha net biçimde görmek mümkündür. Ancak standart ve helezonik tavanlı siklonlar arasında bazı farklar gözlenmektedir. Paletsiz siklonlarda negatif basınç oluşumu, çıkış borusunun hemen hemen giriş kısmında görülmekte ve düşük gaz giriş hızlarında oldukça azalmaktadır. Helezonik tavanlı olanlarda ise çıkış borusunun girişinde başlayıp ortalarına kadar uzanan negatif basınç alanları söz konusudur. Azalan gaz giriş hızıyla bu alanlar küçülmektedir fakat şiddetinde bir azalma olmamaktadır.

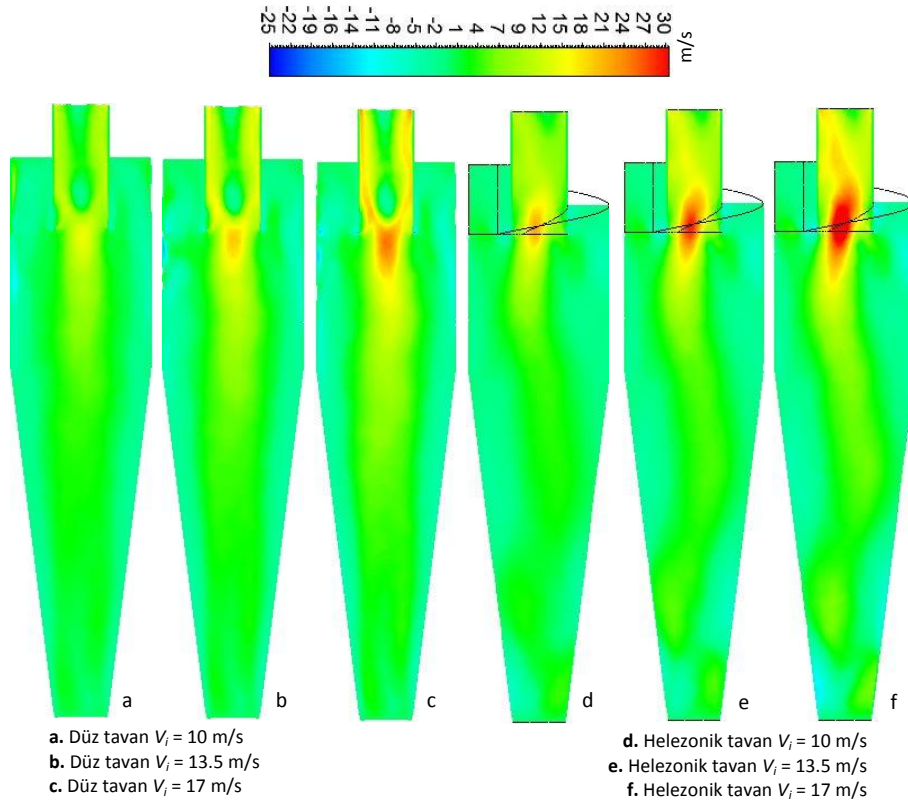


Şekil 3.38 B1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)



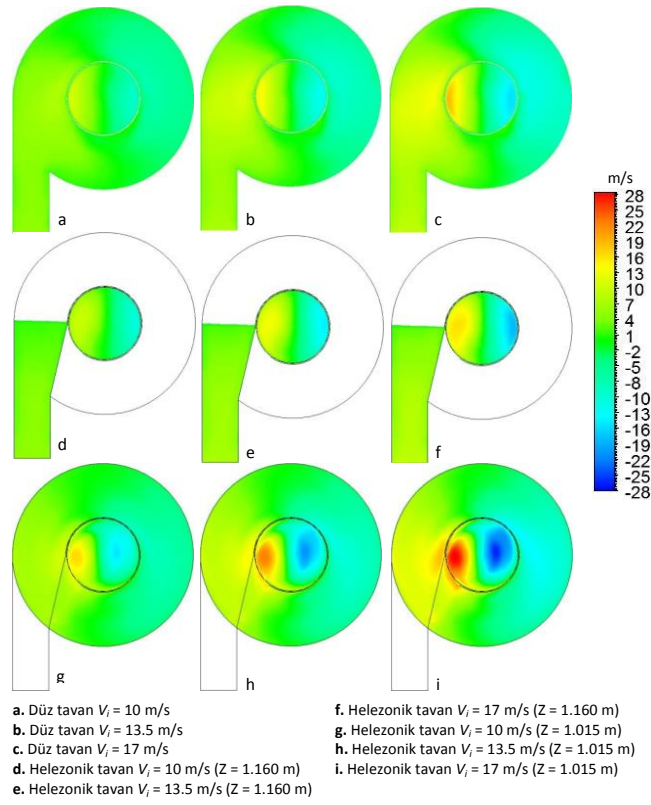
Şekil 3.39 B1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

B1-0 ve B1-4 siklonlarının değişen giriş hızlarında eksenel hız haritaları şekil 3.40'ta verimiştir. Dikey doğrultuda aşağı yönlü hızın negatif, yukarı yönlü hızın ise pozitif olduğu görsellerde ani hız değişimleri, özellikle çıkış borusu ağzında gerçekleşmektedir. Helezonik tavanlı siklonda, siklon gövdesi boyunca genişçe bir alanda salınım yapan i vorteks akımının daha dar bir alanda akmaya zorlanmasından ötürü, çıkış borusunda daha yüksek hız değişimleri gözlenmektedir.



şekil 3.40 B1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (nden görünüm)

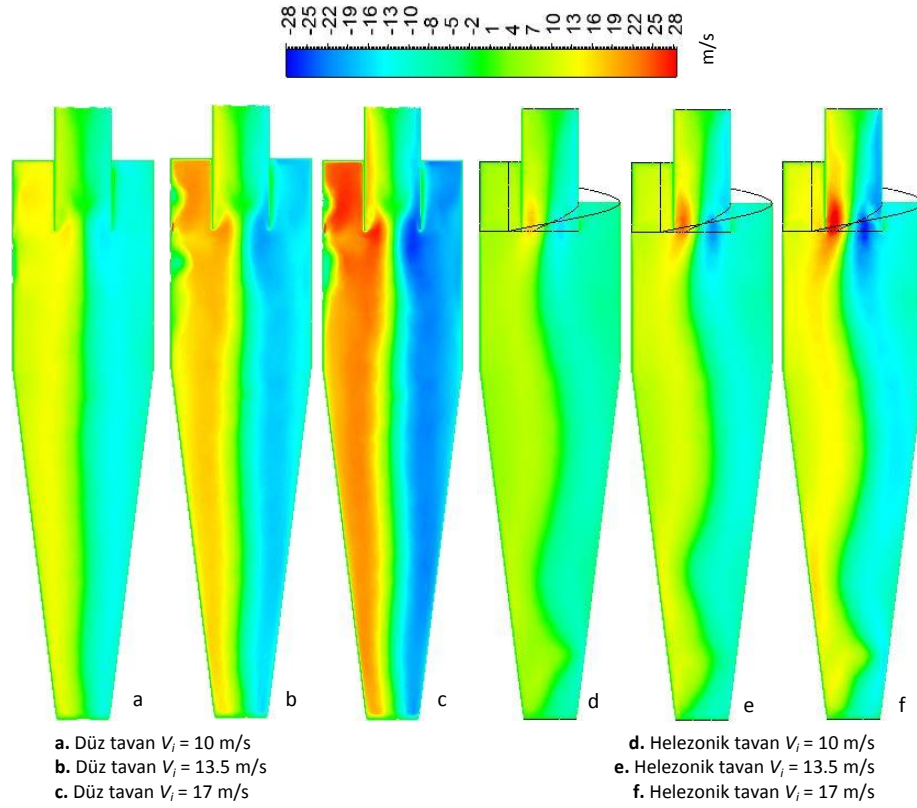
şekil 3.41'de B1 grubu siklonların tanjant hız haritaları, siklonların üstten görünümü şeklinde verilmiştir. Standart tavanlı siklonlara bakıldığında, giriş hızının artmasıyla tanjant hız değişiminin çok kuvvetli olmadığı düşüncesi oluşmaktır. Ancak ilgili siklonlar için oluşturulan görsellerin, eksenel olarak siklonun toplam yüksekliğinden elde edildiğini hatırlamakta fayda vardır. Helezonik tavanlı siklonlarda, siklon tabanından itibaren $Z=1.015$ m kotundaki tanjant hızlara bakıldığında, giriş hızı artışıyla birlikte tanjant hız bileşenindeki artış da net olarak anlaşılmaktadır.



Şekil 3.41 B1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)

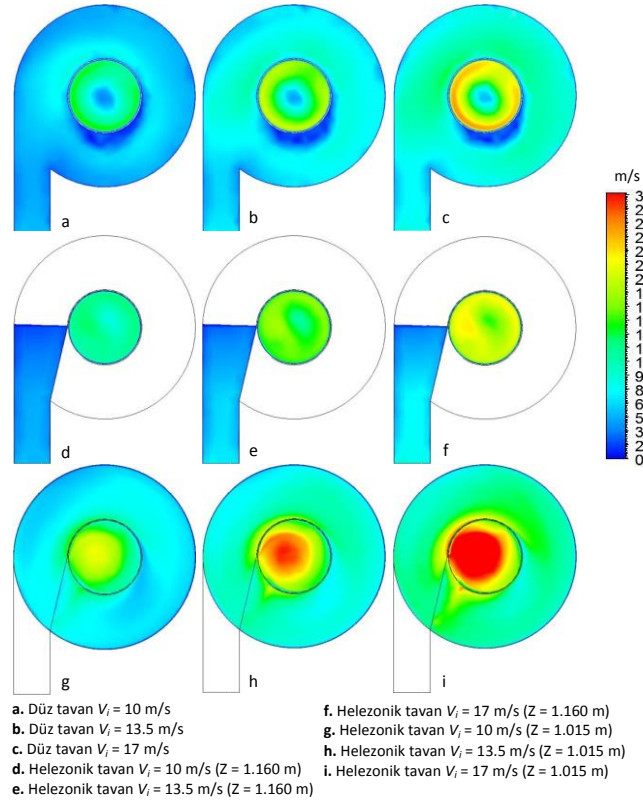
Siklonların önden görünüşleri incelendiğinde hız değişimi daha iyi anlaşılmaktadır (Şekil 3.42). Standart tavanlı siklonda paletli olana göre çok daha kuvvetli artışlar göze çarpmaktadır. Özellikle standart tavanlı siklonda, akımın rahatladığı gövde ve konik kısmın üst bölgelerinde ve duvara yakın bölgelerde tanjant hızlar açısından simetrik bir görüntü oluşmaktadır. Ancak artan gaz giriş hızları ve iç vorteksin dalgalanmasıyla bu simetrik görüntü bozulmaya başlamaktadır. Daha önce A1 grubu siklonlarda da benzer bir durum görülmüştür (Şekil 3.21) ancak A1-0 siklonundaki tanjant hız dağılımı B1-0 siklonundaki kadar simetrik gözükmemektedir. Bunun sebebi olarak, A1 grubu siklonların giriş yüksekliklerinin B1 grubu siklonlardan 0,1D oranında daha alçak olması gösterilebilir. Siklonlarda giriş yüksekliğindeki artış, tur sayısını (*dönüş sayısı*) azaltmaktadır. Tur sayısı da iç vorteksin stabilitesini etkileyebilecek bir faktördür. Helezonik tavanlı siklonda ise iç vorteksin dalgalı yapısı tanjant hız parametresini de etkilemiştir. Siklon gövdesinde herhangi bir yükseklikte ve radyal mesafede tanjant hızlar incelendiğinde, asimetrik akış düzeni göze

çarpmaktadır. Ayrıca giriş hızı artışıyla birlikte tanjant hızların değişimi çok daha zayıf düzeyde gerçekleşmektedir.



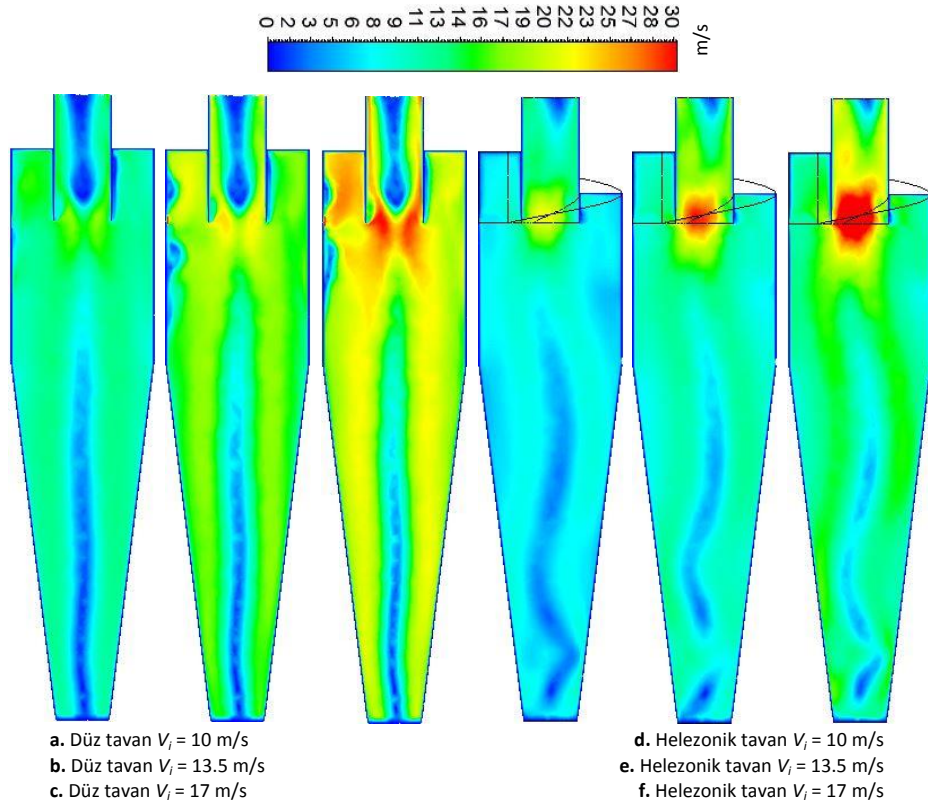
Şekil 3.42 B1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.43'te B1 kodlu siklonların toplam hız haritaları üstten görünüm halinde verilmiştir. Hem standart hem de helezonik tavanlı siklonların en yüksek ($Z=1.160$ m) seviyesinde toplam hız dağılımları (a), (b), (c), (d), (e) ve (f) şekillerinde gösterilmektedir. İç vorteks yapıları incelendiğinde, giriş hızının artışıyla birlikte hız dağılımı daha belirgin bir hal almaktadır. En yüksek giriş hızı için standart tavanlı siklonun iç vorteksinde radyal mesafede büyük bir hız değişimi mevcuttur. Çıkış borusuna kadar daha serbest hareket eden akım, daralan kesitte yüksek debinin de etkisiyle daha da hızlanmaktadır (Şekil 3.43.c). Yine standart tavanlı siklonlara bakıldığında, çıkış borusu etrafında (boru çevresinin yaklaşık % 30'u kadar) ölü alan oluştuğu görülmektedir. Bu durum merkezkaç kuvvetinin etkisiyle akımın duvara doğru sıkışmasından ötürü kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.43 B1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)

Helezonik tavanlı siklonlarda palet yapısının etkisiyle ölü alan oluşumunun azaldığı söylenebilir. Üstten görünümde bunu farketmek mümkün olmasa da karşıdan görünümün verildiği görsellerde bu yorumu yapmak mümkündür (Şekil 3.44). Paletli siklonda iç vorteksin dalgalı yapısının etkisi toplam hız haritalarında da görünmektedir. Özellikle Şekil 3.44.f incelendiğinde, dalgalanmanın etkisiyle geniş bir yarıçapta ilerleyen iç vorteks akımı, çıkış borusu girişinde ani daralma ile en yüksek hız seviyelerine çıkmaktadır. Bu bölgede oluşan türbülansın tekrar normale dönmesi ise ancak çıkış borusunun en üst kısmında (siklondan sonraki kısım dahil yaklaşık 30 cm) gerçekleşmektedir. Aynı grupta standart tavanlı siklona bakıldığında ise daha düzgün bir iç vorteks sonucu stabil bir hız dağılımı gözlenmektedir. Çıkış borusu ağzında daralmadan ötürü yine hız artışı olmuş, ancak bu artış dairesel akım içerisinde daha homojen bir biçimde gerçekleşmiştir. Nitekim standart ve helezonik tavanlı siklonlar kıyaslandığında, ilk grupta çıkış borusu içinde düzgün bir vorteksten ötürü hızın 0 m/s olduğu ölü alan gözlemlenirken, palet yapısına sahip ikinci grupta ise hız haritalarına göre bir türbülans olduğu anlaşılmaktadır.

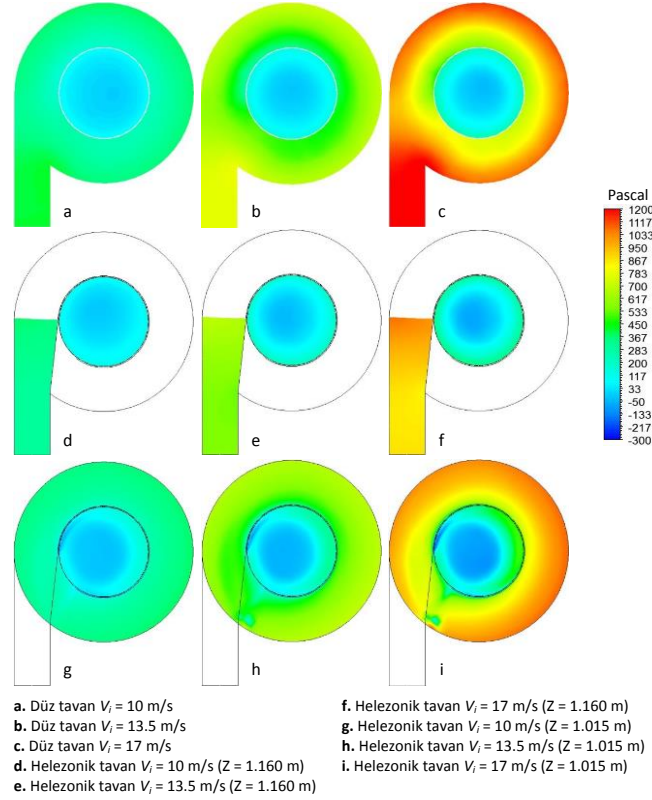


Şekil 3.44 B1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

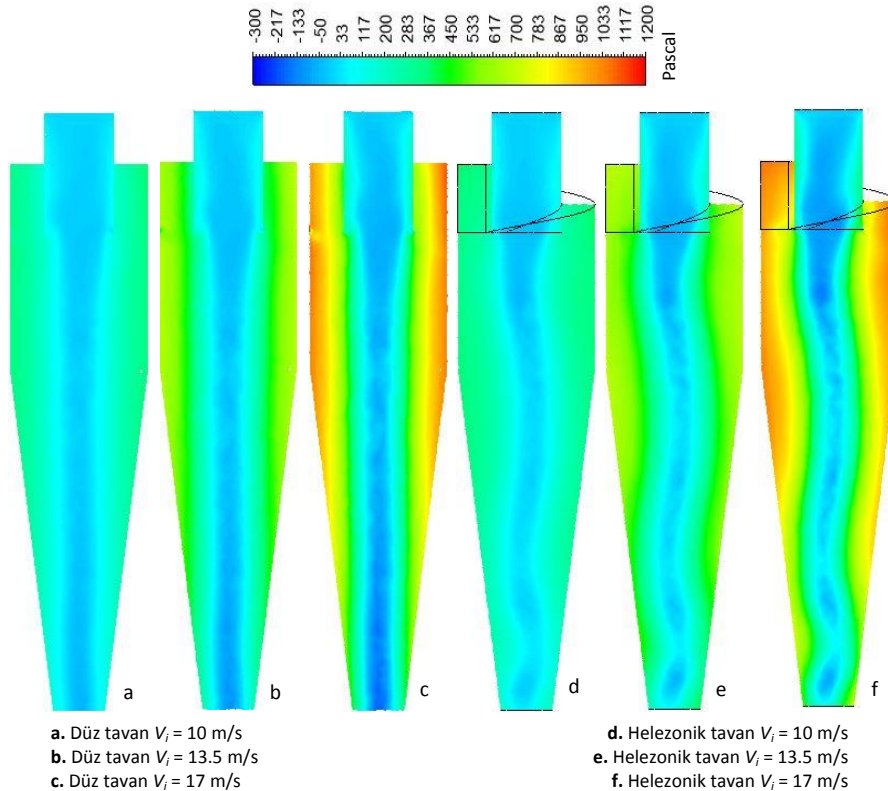
Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da B2 kodlu siklonlar için basınç haritaları sunulmuştur. Standart ve helezonik tavanlı siklonlar için giriş hızının artmasıyla basınç artışı, görsellerde rahatlıkla farkedilmektedir. Üstten görünüm haritalarında helezonik tavan yapısının etkisiyle basınç kaybının azaldığı görülebilmektedir. Karşıdan görünüm haritalarına göre ise hem paletli hem de paletsiz siklonda hız artışıyla birlikte benzer bir değişim trendi görünmektedir. Siklon içerisindeki basınç alanları incelendiğinde büyüklük olarak basınç değerleri birbirine yakın seviyelerdedir. Ancak bu grupta da helezonik tavanın etkisiyle iç vortekste dalgalı bir yapı söz konusudur. Standart tavanlı siklonda ise geniş bir çıkış borusu çapının da etkisiyle, en yüksek gaz giriş hızında bile stabil bir iç vorteks yapısı mevcuttur.

Basınç haritalarında siklon merkez çizgisi ve etrafında oluşan negatif basınç alanları incelendiğinde; standart tavanlı siklonda özellikle konik kısmın alt kısmında, siklon gövdesinde ve çıkış borusunda negatif basınç olduğu gözlenmektedir. Ancak helezonik tavanlı siklonda özellikle çıkış borusunun hemen altında başlayıp üst kısmına kadar uzanmaktadır. Siklon gövdesinde ise

düzensiz iç vorteks akımından dolayı basınç alanları da dağınık görünmektedir (Şekil 3.46).

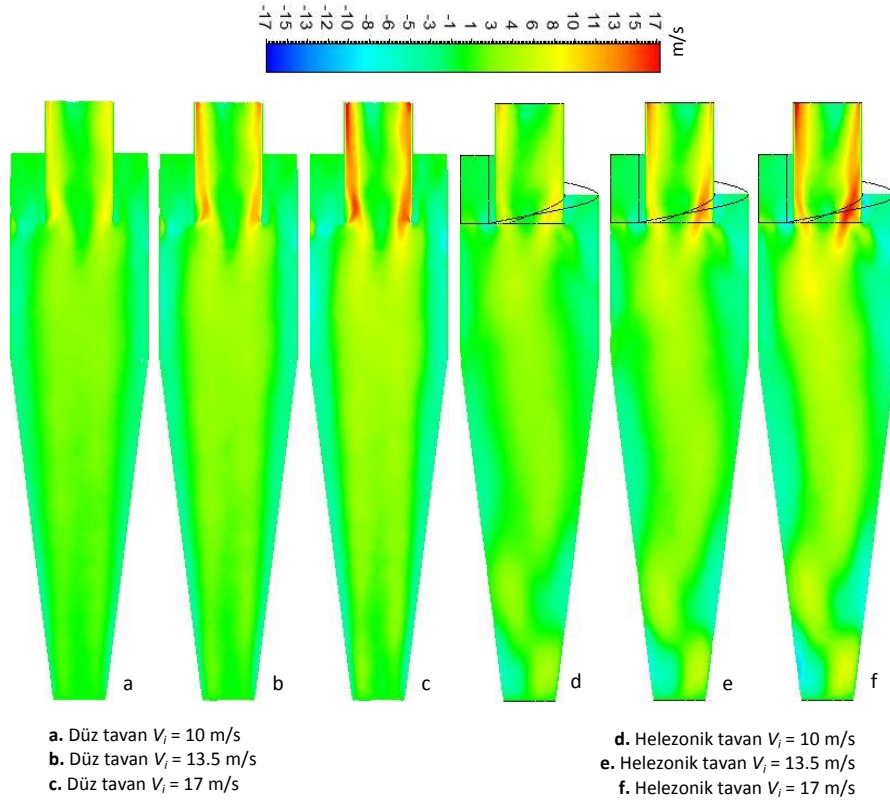


Şekil 3.45 B2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.46 B2 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.47’de B2-0 ve B2-4 siklonlarının üç farklı hızda eksenel hız haritaları verilmiştir. Siklonlarda büyük hız değişimlerinin tam da çıkış yapısının ağzında yaşandığı görülmektedir. O bölgedeki ani daralma iç vorteksteki akımın hızlanmasına sebep olmaktadır. Artan gaz giriş hızıyla birlikte helezonik tavanlı B2-4 siklonunda ve standart tavanlı B2-0 siklonunda en yüksek eksenel hızın çıkış borusu içinde 17 m/s civarlarına çıktığı anlaşılmaktadır. Eksenel hız bileşeni, standart tavanlı siklonda gövde ve çıkış borusu içerisinde radyal mesafede daha homojen görünmektedir. İç vorteksin dalgalı yapısından ötürü helezonik tavanlı siklonda ise radyal mesafeye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

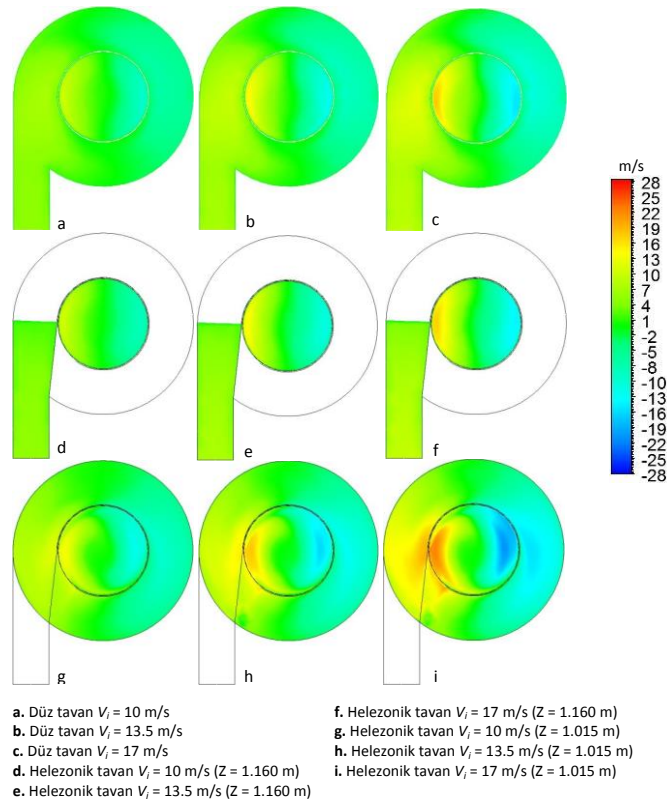


Şekil 3.47 B2 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

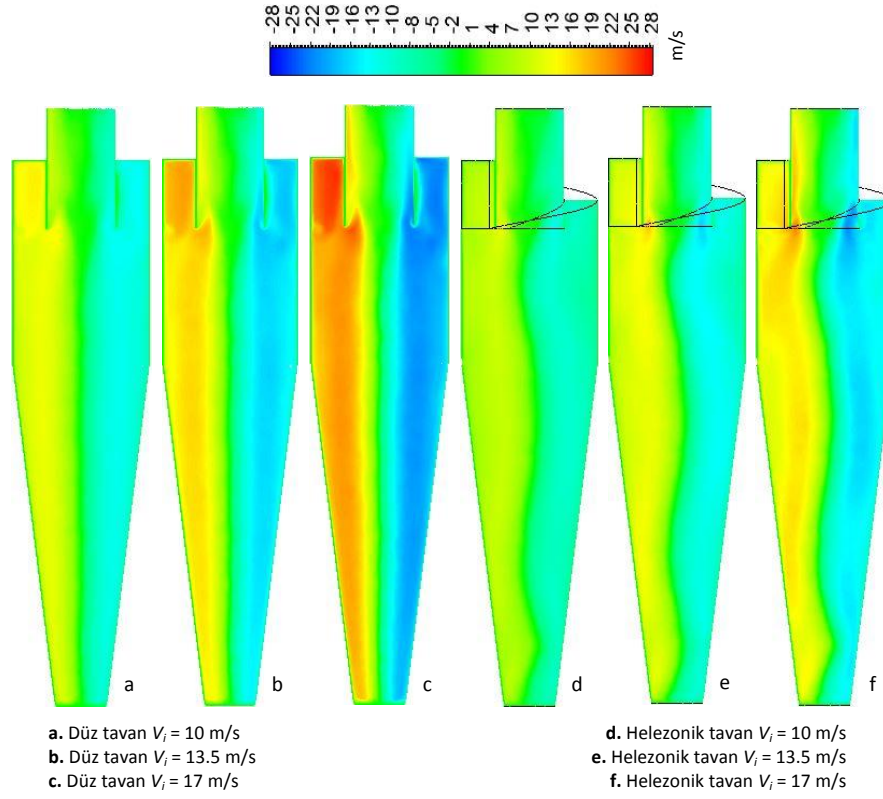
Şekil 3.48 ve Şekil 3.49’da B2 grubu siklonların tanjant hız haritaları verilmiştir. Standart tavanlı siklonda artan gaz giriş hızıyla birlikte tanjant hız bileşeninde de ciddi bir artış söz konusudur. Helezonik tavanlı siklonda ise gövde ve koni yüksekliği boyunca zayıf bir değişim söz konusudur. Ancak her iki siklonda da kesin olarak artan bir trend vardır. Standart tavanlı siklonda en yüksek gaz giriş hızıyla beraber tanjant hız bileşeni 28 m/s mertebelerine kadar çıkmaktadır. Bu

değer özellikle giriş yapısından hemen sonraki bölgede oluşmaktadır. Gaz akımı konik kısma doğru ilerlerken tanjant hız bileşeni 5-6 m/s kadar azalmaktadır. Helezonik tavanlı siklonda tanjant hızın en yüksek olduğu bölge çıkış borusunun girişi ve ortalarına kadar olan kısımdır. Bu durum en iyi, giriş hızının en yüksek seviyede olduğu (17 m/s) denemeyi gösteren Şekil 3.49'da görülmektedir. Aynı siklonun üstten görünümü incelendiği zaman da çıkış yapısının hemen önünde tanjant hız bileşenindeki artış rahatlıkla görülmektedir (Şekil 3.48.i).

İç vorteks yapısının stabil olduğu paletsiz siklonlarda tanjant hız dağılımı oldukça simetrik bir görüntü vermektedir. Helezonik tavanlı siklonda ise iç vorteksin dalgalı yapısı sebebiyle düzensiz bir dağılım vardır.



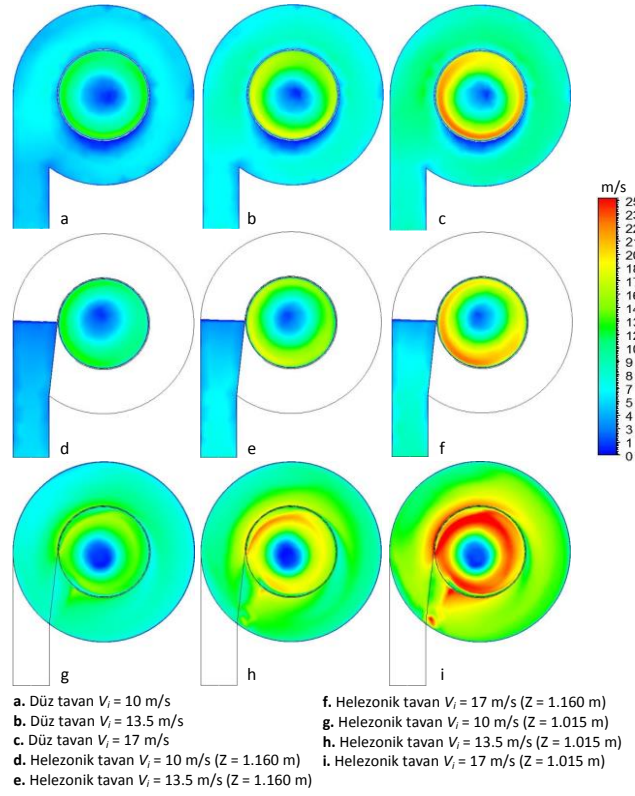
Şekil 3.48 B2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)



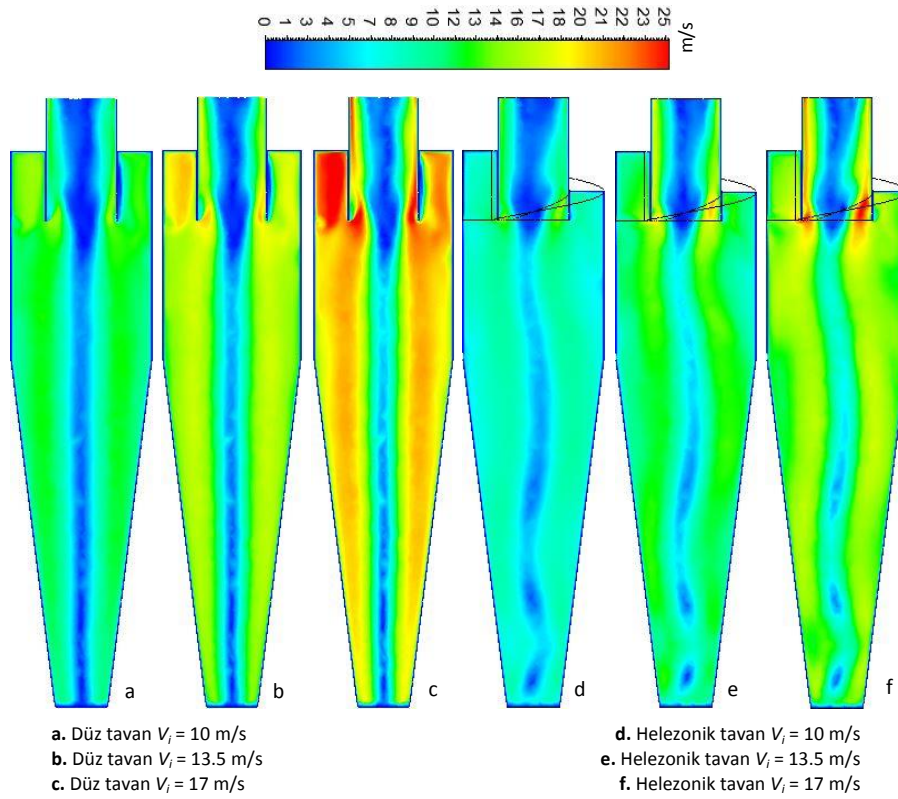
Şekil 3.49 B2 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’de B2 kodlu siklonlar için toplam hız haritaları verilmiştir. Basınç haritalarında olduğu gibi toplam hız haritalarında da rampa yapısının iç vorteksi nasıl etkilediği açıkça görülmektedir. Gaz giriş hızlarının farklı olduğu ilk üç siklonda iç vorteksin yapısı ve toplam hız dağılımı neredeyse simetrik bir görüntü çizmektedir. Ancak helezonik tavanlı siklonlarda, tüm giriş hızları için vorteks yapısındaki bozulma ve dalgalanmalar göze çarpmaktadır.

Standart tavanlı siklonda toplam hızın en yüksek olduğu bölgeler girişin gövdeye açılan kısmı ve çıkış borusunun girişidir. Bu bölgelerde hız 25 m/s mertebelerine kadar çıkmaktadır. Hız dağılımı ise hem siklon toplam yüksekliği boyunca, hem de çıkış borusu içerisinde oldukça düzgündür. Helezonik tavanlı B2-4 siklonunda ise en yüksek hız değerleri çıkış borusu girişinde oluşmaktadır. Siklon toplam yüksekliği boyunca gerçekleşen hızlar ise en fazla, standart tavanlı B2-0 siklonunun 13,5 m/s giriş hızında gerçekleşen toplam hız değerleri kadardır.

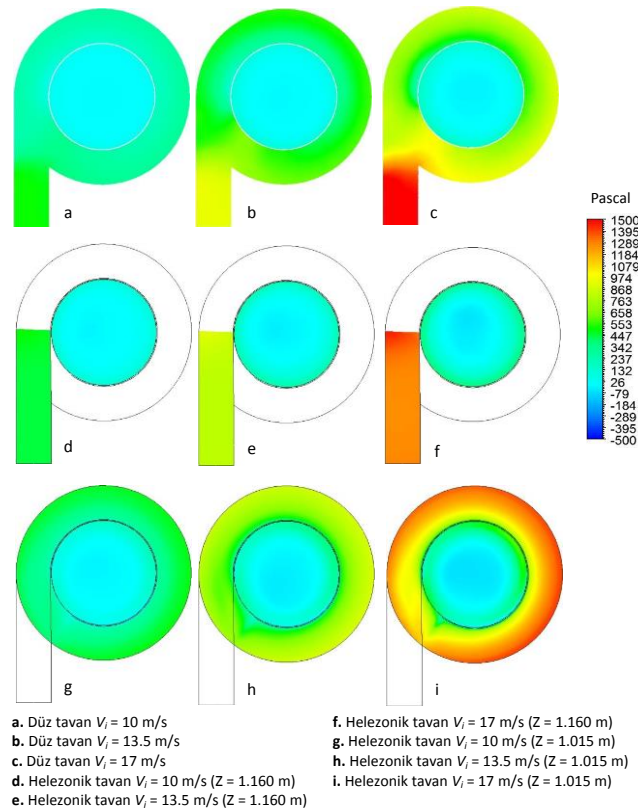


Şekil 3.50 B2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm).



Şekil 3.51 B2 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.52 ve Şekil 3.53’de B3 kodlu siklonlar için basınç haritaları üstten ve karşıdan görünüm şeklinde verilmiştir. Bu siklon grubu en geniş çıkış borusu çapına sahip olanlardan biridir. Bu sebeple düşük hızlarda siklon içerisinde büyük basınç farkları oluşmamaktadır. B3 grubunda paletli ve paletsiz siklonlar arasında genel olarak büyük basınç kaybı farkları yoktur. Siklonlar kendi içinde değerlendirildiğinde ise giriş hızındaki artışla birlikte oluşan basınç kaybının da arttığı görülmektedir. Siklon giriş ve çıkışları arasındaki basınç kaybı açısından standart tavanlı siklonda daha yüksek basınç kaybı vardır. Ancak siklon gövdesinde gerçekleşen basınç alanları incelendiğinde helezonik tavanlı siklonda daha yüksek basınç değerleri okunmaktadır. Çıkış borusu çapının siklon yarıçapından dahi geniş olması, her iki siklonda da tüm hız denemeleri için çıkıştaki basınç kaybının çok az olmasına neden olmaktadır.

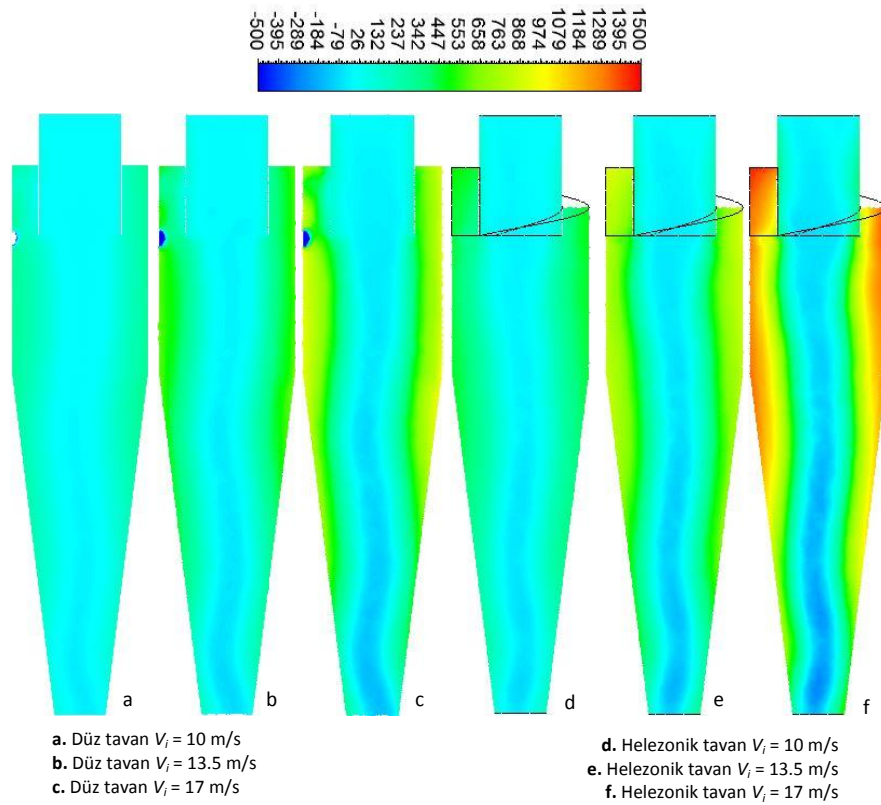


Şekil 3.52 B3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)

B3 grubunun basınç haritalarında dikkat çeken bir diğer nokta da iç vorteks yapısıdır. Daha dar çıkış borusu çapına sahip gruplarda, genellikle helezonik tavanlı siklonların iç vorteks yapısında dalgalanmalar gözlenirken standart tavanlı olanlarda daha stabil bir iç vorteks gözlenmektedir. Ancak çıkış borusu

çapının daha geniş olduğu bu grupta standart tavanlı siklonda da iç vorteks, dalgalı bir yapıya sahiptir (Şekil 3.53).

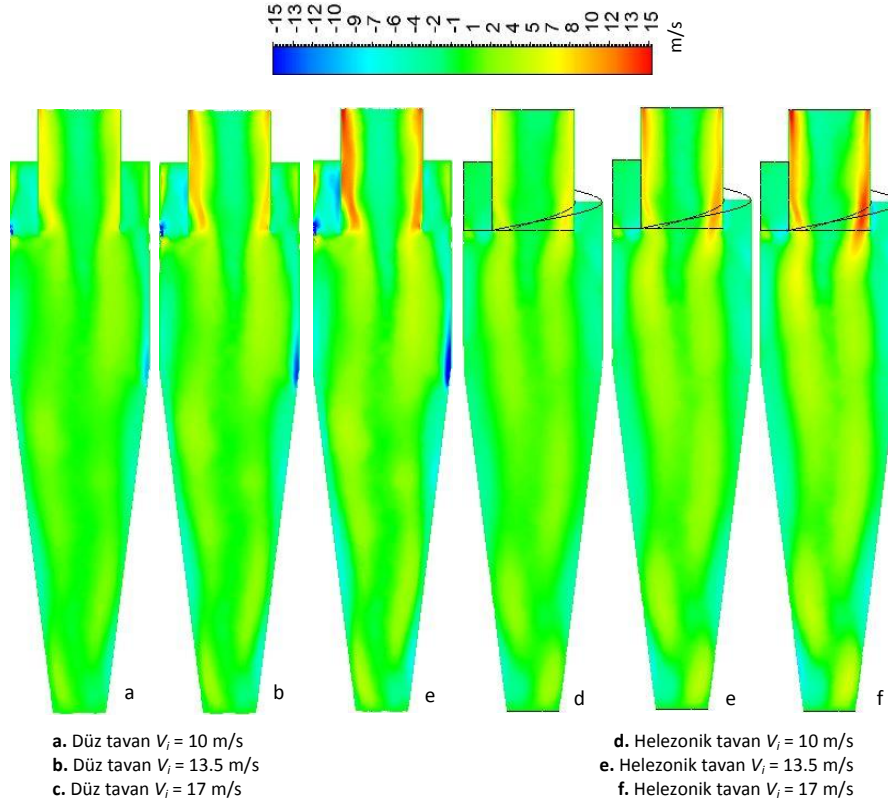
Son olarak hem standart tavanlı hem de helezonik tavanlı B3 grubu siklonlarda negatif basınç alanı oluşumunun oldukça az olduğunu söylemek mümkündür. Özellikle en yüksek gaz giriş hızında, helezonik tavanlı siklonun konik kısmında ve siklon merkez çizgisi etrafında oluşan negatif basınç, çıkış borusu girişine doğru etkisini yitirmektedir. Bu siklonlarda çıkış borusunun neden olduğu ani daralma etkisi oldukça zayıftır.



Şekil 3.53 B3 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.54'te B3-0 ve B3-4 siklonlarının üç farklı hızda eksenel hız haritaları verilmiştir. Her iki siklonda da özellikle en yüksek gaz giriş hızının olduğu durumlarda çıkış borusu içerisinde eksenel hızın 15 m/s seviyelerine çıktığı görülmektedir. B3 grubu siklonlarda çıkış yapısının genişliğinden dolayı ani daralma söz konusu değildir ve iç vortekste eksenel hız dağılımı siklon boyunca stabil görünmektedir. İç vorteksin standart tavanlı siklonda da dalgalı bir yapıya sahip olmasından dolayı, çıkış borusu ve gövde boyunca eksenel hız değişimi helezonik tavanlı siklona benzer şekilde gerçekleşmektedir. Ancak

özellikle Şekil 3.54.e incelendiğinde en yüksek giriş hızında, akımın gövdeden konik kısma geçtiği bölgede aşağı yönlü eksenel hız pik yapmaktadır. Bu durumu çıkış borusu genişliğinin dış vortekse etkisi olarak yorumlamak mümkündür.

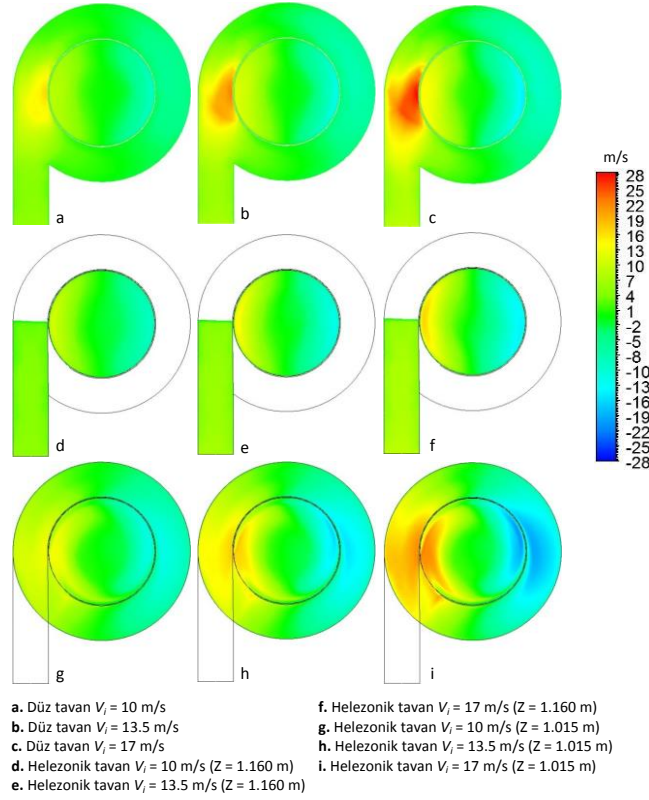


Şekil 3.54 B3 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

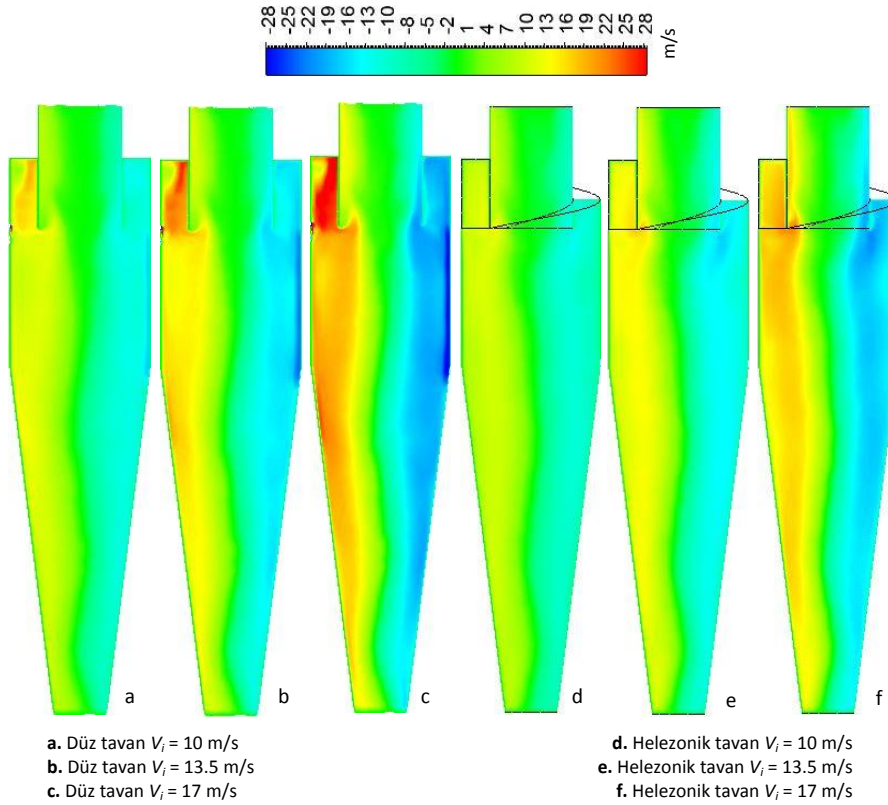
Şekil 3.55 ve Şekil 3.56'da B3 grubu siklonların tanjant hız haritaları verilmiştir. Çıkış borusunun genişliğinden ötürü, diğer siklonlarda giriş ağzında gerçekleşen ani genişleme olmamaktadır. Bu sebeple en yüksek tanjant hız değerleri de siklonların giriş kanalının gövdeye açıldığı bölgede oluşmaktadır. Çıkış borusu çapının geniş olmasından dolayı artan gaz giriş hızıyla birlikte, boru içindeki tanjant hız bileşenlerinin değişimi zayıf olmaktadır. Hem standart tavanlı B3-0 siklonunda, hem de helezonik tavanlı B3-4 siklonunda özellikle 17 m/s giriş hızına çıkıldığında, tanjant hızın bariz bir şekilde arttığı görülmektedir. Düşük hızlarda değişimi tespit etmek daha zordur.

B3-0 siklonunda gövde yüksekliği boyunca tek taraflı maksimum tanjant hız değerleri tespit edilmiştir. Hız dağılımının radyal mesafede simetrik olmamasının sebebi iç vorteksin dalgalı yapısıdır. Standart tavanlı siklonlarda iç vorteksin stabil olmayışından ötürü, gövde yüksekliği boyunca dış vorteks yapısı bir tarafta

genişlerken diğer tarafta daralmaktadır. Bu durum daralan bölgede hızın artmasıyla sonuçlanmaktadır.



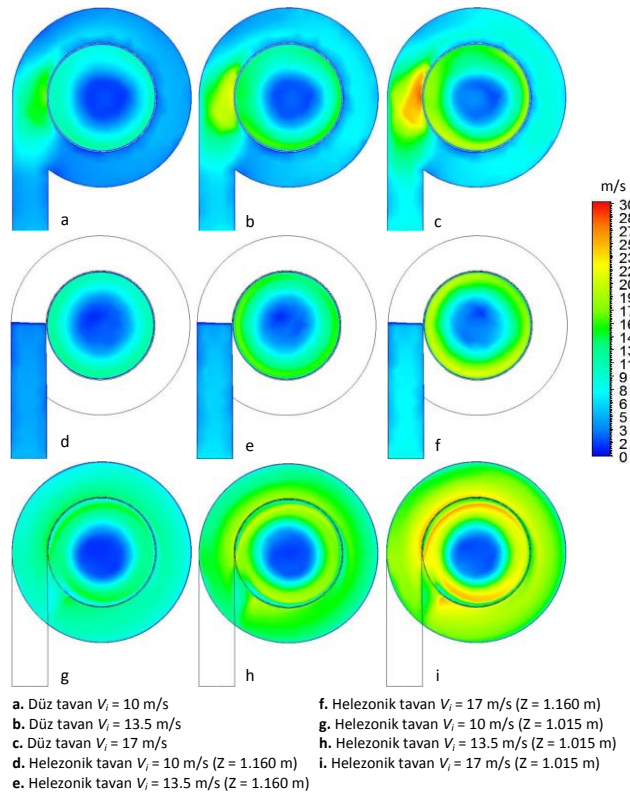
Şekil 3.55 B3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)



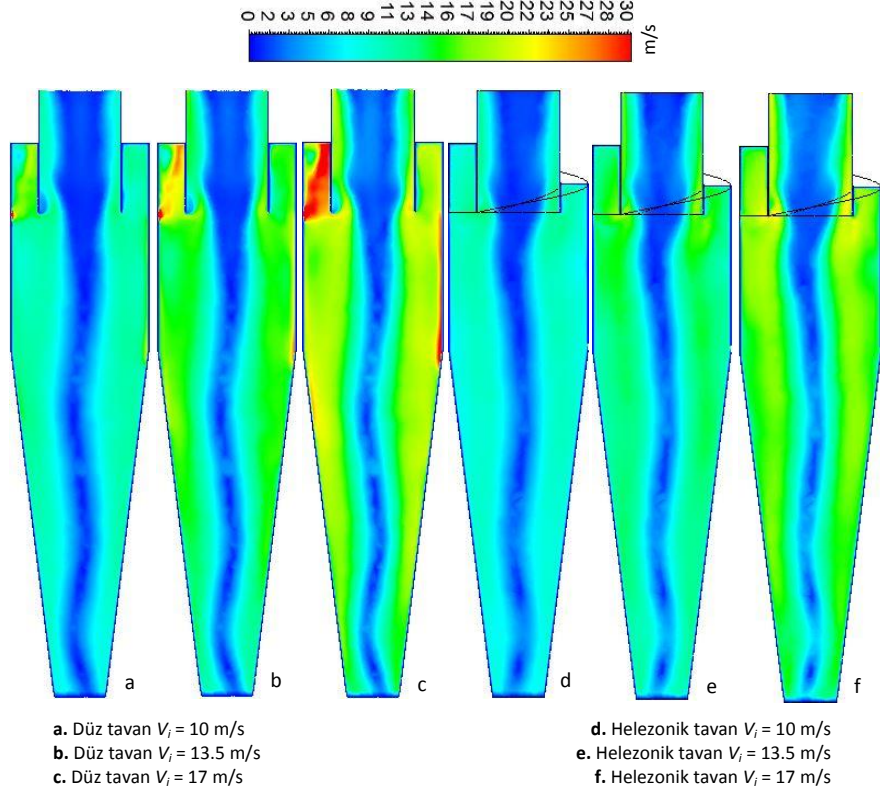
Şekil 3.56 B3 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.57 ve Şekil 3.58, B3 grubu siklonların toplam hız haritalarını sırasıyla üstten ve karşıdan görünüm olacak şekilde sunmaktadır. Büyük çaplı çıkış borusunun etkisi toplam hız haritalarında da kendisini göstermektedir. Standart tavanlı siklonlarda özellikle girişin gövdeye açılan bölgelerinde pik değere ulaşan toplam hız değerleri, siklon genelinde çok daha düşük seviyelerdedir. Ayrıca geniş çıkış çapının etkisiyle daralan ya da genişleyemeyen gaz akımı, çıkış borusu duvarı ile siklon gövde duvarı arasında yeteri kadar mesafe olmamasından dolayı boru etrafında ölü alan oluşturmamaktadır.

Helezonik tavanlı B3-4 siklonunda, rampa yapısının siklona giren gaz akımını aşağı doğru yönlendirmesi sonucu çok yüksek hız değerleri oluşmamıştır. Rampa yapısı ile akım, siklon çıkış borusu ve gövde duvarı arasında sıkışmamaktadır. Ayrıca tur sayısı ya da dönüş sayısı olarak nitelendirilen parametre de azalmaktadır.



Şekil 3.57 B3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)



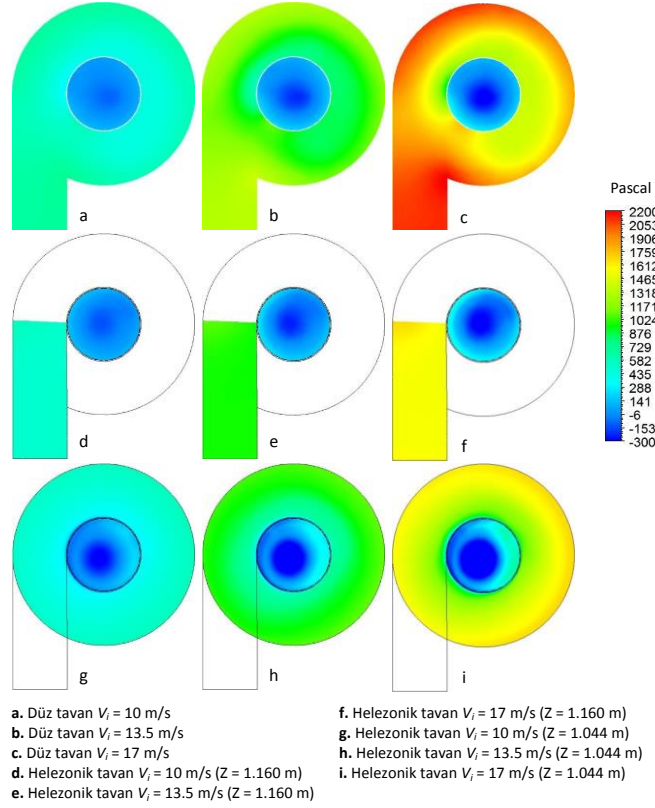
Şekil 3.58 B3 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

C Grubu Siklonlar

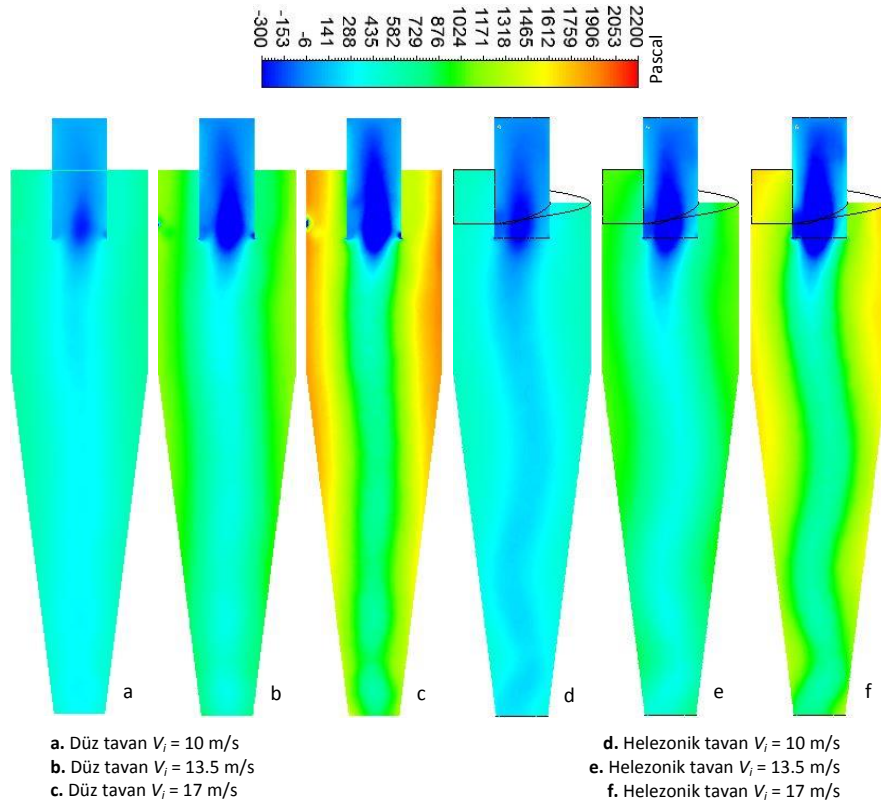
Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'da C1 kodlu siklonlarda basınç haritaları verilmiştir. C grubu için elde edilen görseller incelenirken, A ve B gruplarına göre daha büyük bir giriş kesit alanına sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Bu durum aynı gaz giriş hızı için daha yüksek debi ihtiyacı anlamına gelmektedir. Siklon içerisindeki basınç ve hız değişimleri doğrudan debiyle ilişkilidir.

Basınç haritaları incelendiğinde, düşük hızlarda siklon içerisinde büyük basınç değişimleri gözlenmemektedir. Bunun sebebi giriş genişliğinin büyük olması ve dolayısıyla tutma yüksekliği olarak adlandırılan akım genişliğinin artması şeklinde yorumlanabilir. Gaz giriş hızının artmasıyla siklon içerisindeki basınç farkları da artmaktadır. Önden görünüm haritalarına bakıldığında, en düşük basınç değerlerinin çıkış borusunun içinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum hem standart tavanlı hem de helezonik tavanlı siklonun tüm hız denemelerinde rahatlıkla görülebilmektedir. C grubu siklonlarda da helezonik tavanlı versiyonlarda, iç vorteksteki dalgalanma dikkat çekmektedir. Bu dalgalanma, dış vorteks yapısının da stabil olmadığı anlamına gelmektedir. Bu

noktada palet yapısının diğer siklonlara göre genişlemiş olmasının bir etkisi olmadığı anlamı da çıkarılabilir.

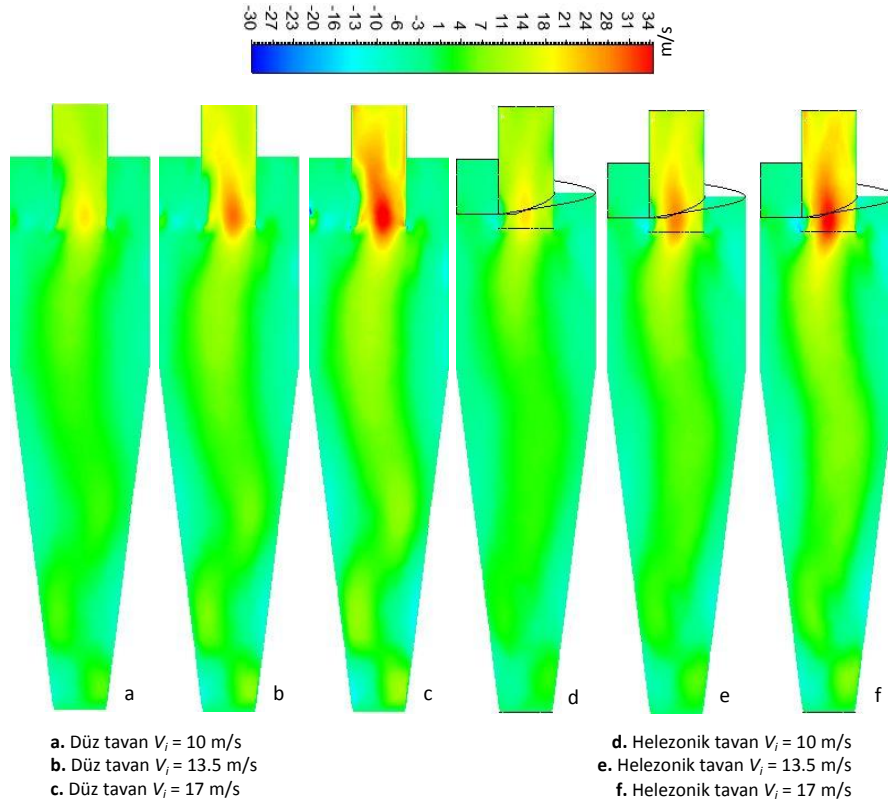


Şekil 3.59 C1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.60 C1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.61’de C1-0 ve C1-4 siklonlarının üç farklı hızda eksenel hız haritaları verilmiştir. İlk üç model gösterimi, standart tavanlı siklonun farklı giriş hızları ile elde edilmiş eksenel hız dağılımını vermektedir. Artan gaz giriş hızıyla birlikte her iki siklonda da çıkış yapısı girişinde eksenel hız parametresinin 35 m/s mertebelerine çıktığı görülmektedir. Hızın diğer siklonlara göre bu mertebelere çıkmasının birincil nedeni, daha dar olan çıkış borusu çapıdır.

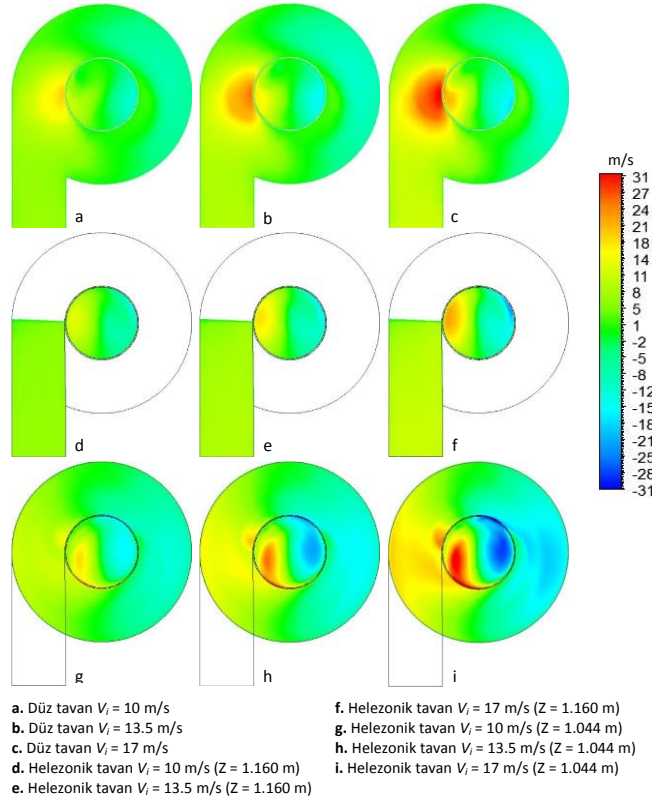


Şekil 3.61 C1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

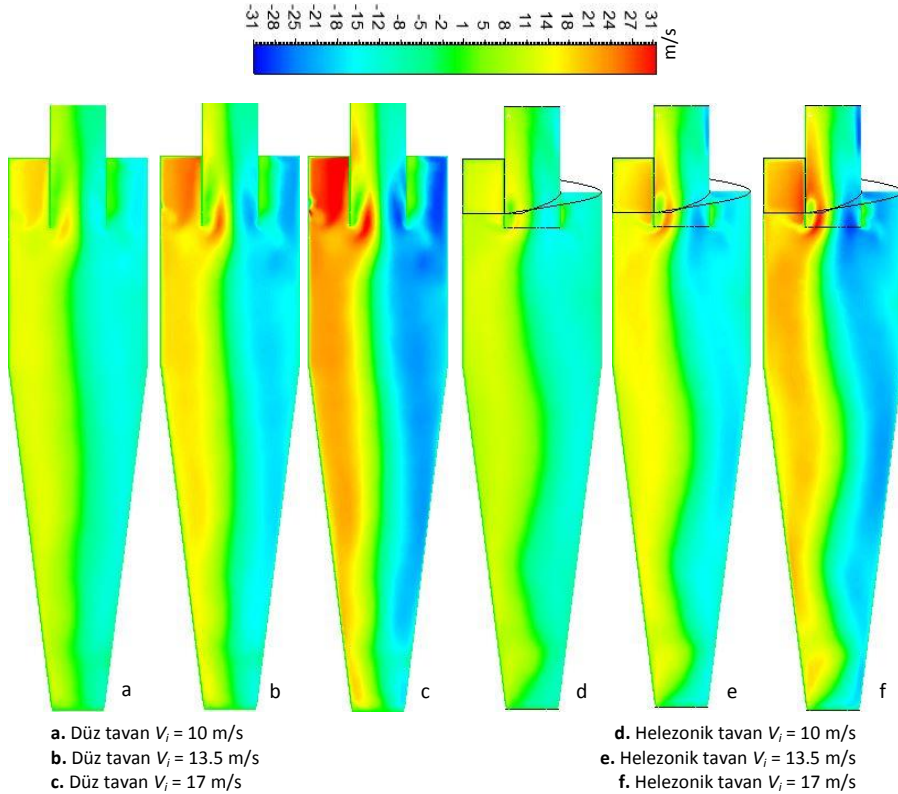
Şekil 3.62 ve Şekil 3.63’te C1 grubu siklonların tanjant hız haritaları verilmiştir. Giriş yapısının halihazırda geniş olması ile akımın ani genişlemesi bu siklonlarda söz konusu değildir. Bu sebeple girişten itibaren dönüşe başlayan akımın hız kazandığı görülmektedir.

Haritalardan palet yapısının siklon gövdesinde teğetsel hızı düşürdüğü sonucu çıkarılabilir. Ancak özellikle çıkış borusunun giriş bölgeleri için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Bu bölgede hem paletli hem de paletsiz siklonda benzer hız değerleri oluşmaktadır. Şekil 3.62.i incelendiğinde, helezonik tavanlı siklonun giriş kanalının hemen altından alınan kesitte, hem pozitif hem de negatif yönlü tanjant hız değerlerinin maksimum düzeye ulaştığı görülmektedir.

Bu bölge çıkış borusunun iç kısmına denk geldiği için böyle simetrik bir görüntü elde edilmesi normaldir. Aynı siklon için önden görünüm haritasında (Şekil 3.63.f) oldukça dalgalı iç vorteks yapısı dikkat çekmektedir.

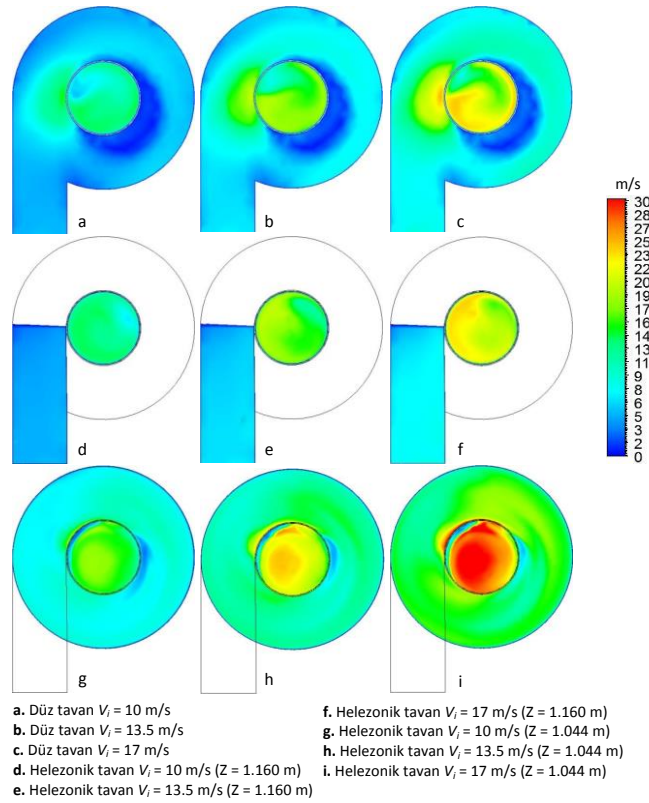


Şekil 3.62 C1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)



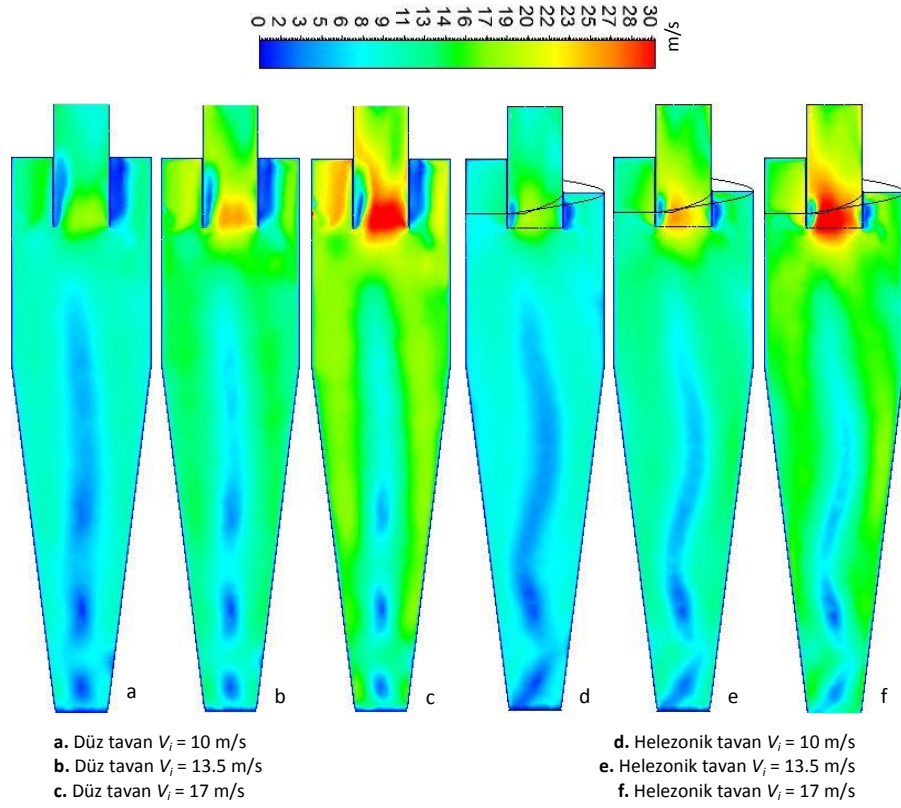
Şekil 3.63 C1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.64 ve Şekil 3.65'te C1 grubu siklonlar için toplam hız haritaları verilmiştir. 17 m/s gaz giriş hızında özellikle çıkış yapısındaki daralmayla toplam gaz hızının 30 m/s civarlarına çıktığı görülmektedir. Paletsiz siklonun üstten görünüm haritalarına bakıldığında çıkış borusu etrafında ölü alan olduğu görülmektedir. Bu durum tüm gaz giriş hızları için geçerlidir. Ölü alan tanımı, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle duvara doğru sıkışan gaz akımından doğan boşluk olarak ifade edilebilir. Palet yapısına sahip siklonda ise ölü alan oluşumu oldukça küçük bir bölgede gerçekleşmektedir.



Şekil 3.64 C1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)

Helezonik tavan sayesinde gaz akımı, dönüşüne başlarken aynı zamanda aşağı yönlü harekete de başlamaktadır. Bu da paletli siklonlarda tanjant hızın düşük olmasına yol açmaktadır. Siklonlarda toplam hızın önemli kısmı tanjant hız bileşeninden oluşmaktadır. İkinci en etkin hız bileşeni ise eksenel hızdır. Karşıdan görünüm haritalarına bakıldığında, düşey doğrultuda çok büyük hız değişimlerinin olmadığı görülmektedir. Yatay mesafede ise daha belirgin renk değişimleri görülmektedir. Yani hız değişimi yatayda daha fazladır.

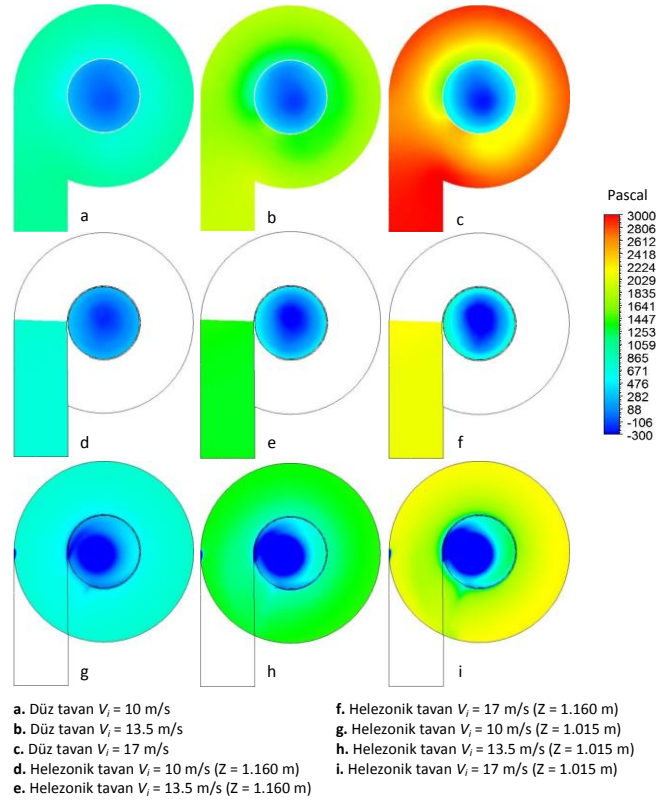


Şekil 3.65 C1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

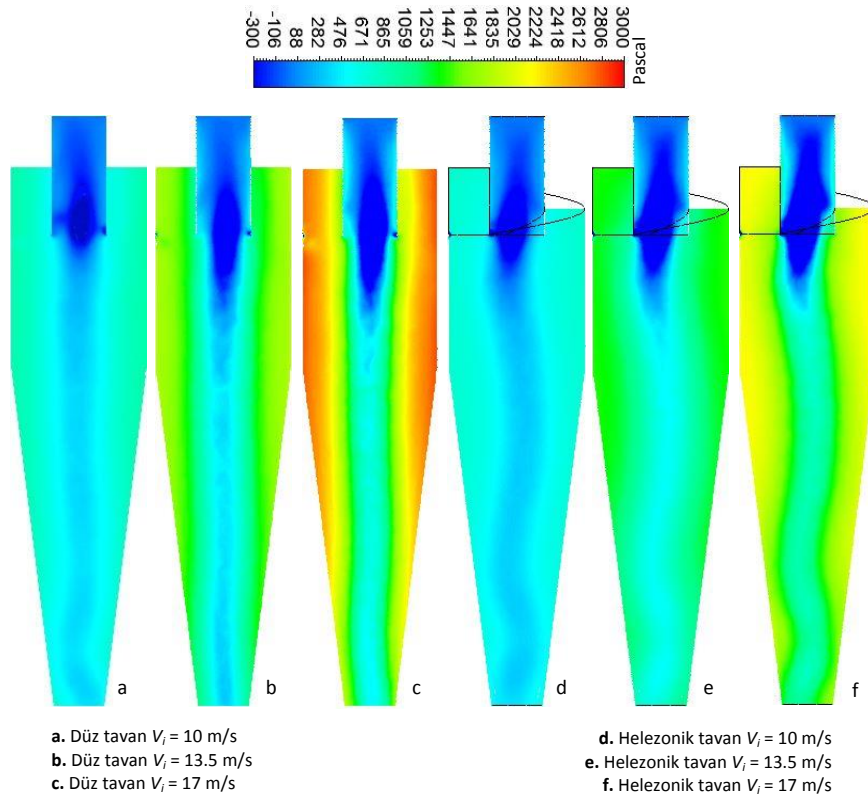
D Grubu Siklonlar

Şekil 3.66 ve Şekil 3.67’de D1 kodlu siklonlar için basınç haritaları verilmiştir. Bu siklonlar boyutlarına göre çalışmadaki en büyük giriş kesit alanına sahip olanlardır. Bu özelliklerinden ötürü, önceden belirlenen hızlarda çalışmak için ihtiyaç duyulan debi diğer siklonlardan çok daha fazladır.

Model sonuçlarına göre hem standart tavanlı hem de helezonik tavanlı siklonların tüm giriş hızı değerleri için çıkış borusunda yüksek mertebelerde negatif basınç söz konusudur. Geniş ve yüksek bir giriş yapısına sahip bu siklonlar için düşük giriş hızlarında siklon gövdesinde büyük basınç farkları yoktur. Artan giriş hızıyla birlikte merkezden gövdeye doğru belirgin farklar gözlenmektedir. Düşük hızlarda hem standart tavanlı hem de helezonik tavanlı siklonda, çıkış borusu girişinde ve içinde negatif basınç oluşumu gözlenmektedir. Ancak gaz giriş hızının, dolayısıyla debinin, artmasıyla negatif basınç alanı gövdenin ortasına kadar uzanmaktadır. Şekil 3.67.c’ye bakıldığında, yüksek hızda gövdedeki basınç değişimi ve çıkış borusu ile arasındaki fark rahatlıkla görülmektedir.

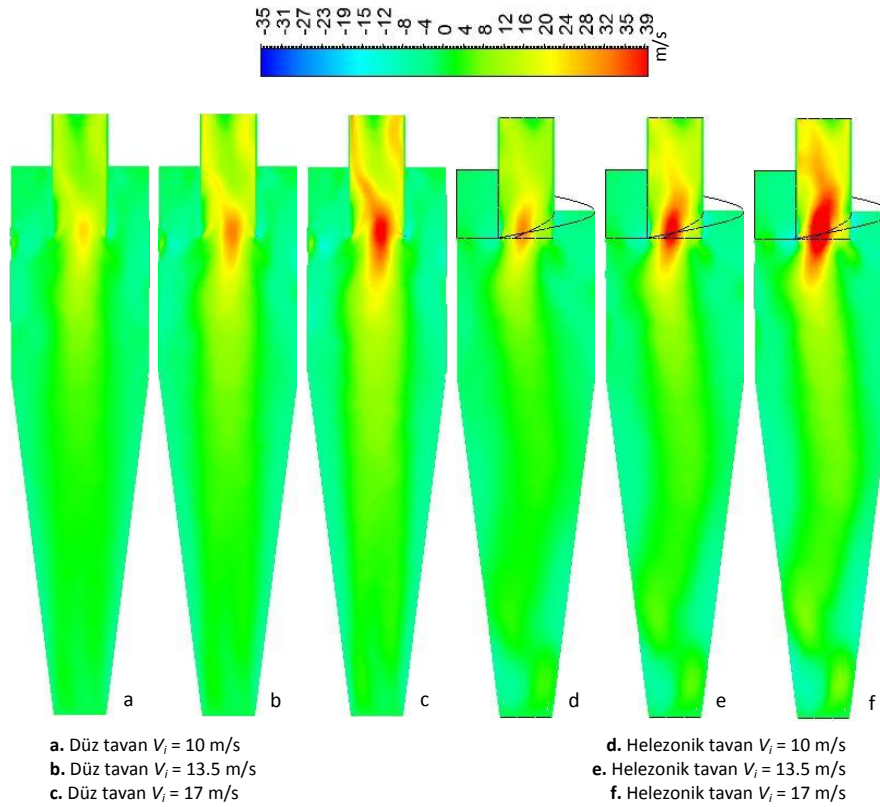


Şekil 3.66 D1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.67 D1 kodlu siklonlarda basınç haritaları (önden görünüm)

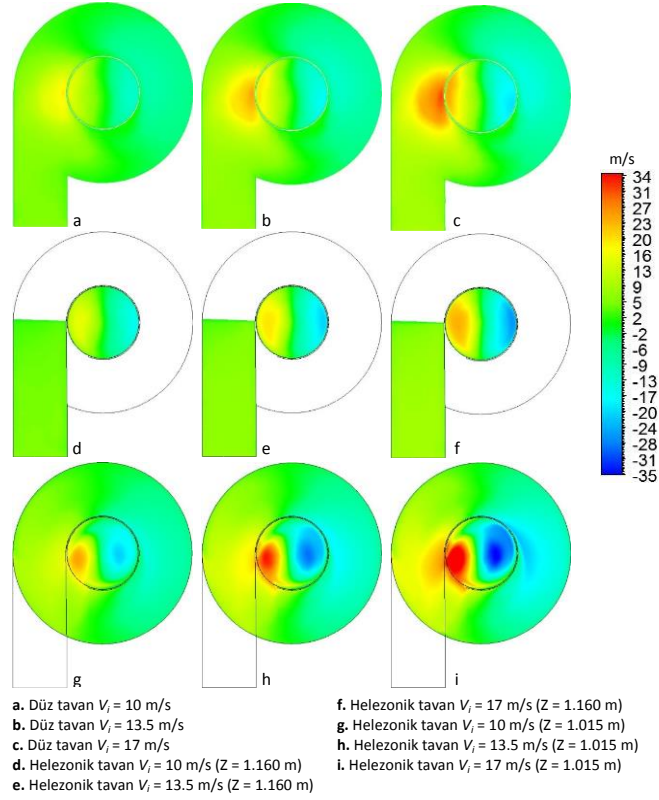
D grubu siklonlarda eksenel hız parametresi, Şekil 3.68’de verilen haritalarda incelenebilmektedir. İlk üç model gösterimi, standart tavanlı siklonun farklı giriş hızları ile elde edilmiş eksenel hız dağılımını vermektedir. Bu görsellerde iç vorteksin yatay ekseninde stabil bir görüntüye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi C grubuna göre artan giriş kesit alanı ve daha stabil akım hacmi olabilir. Helezonik tavanlı siklonlarda ise iç vorteks yapısı dalgalı görünmektedir. Bu durumun sonucu olarak paletli siklonun çıkış borusunda, standart tasarıma göre daha yüksek eksenel hız değerleri gerçekleşmektedir.



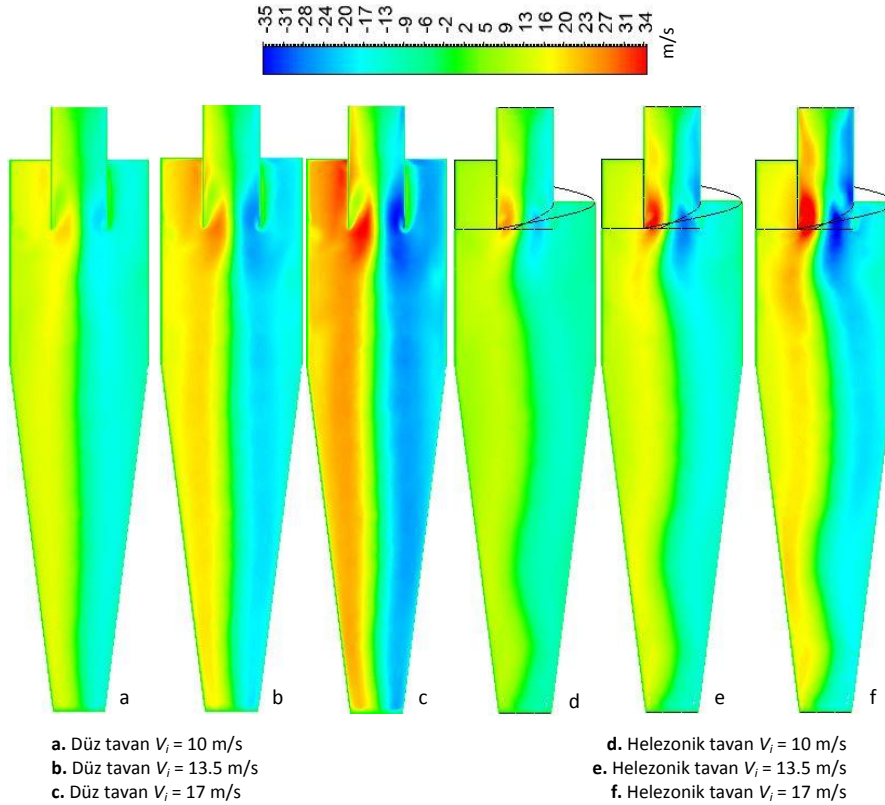
Şekil 3.68 D1 kodlu siklonlarda eksenel hız haritaları (önden görünüm)

Şekil 3.69 ve Şekil 3.70’de D1 grubu siklonların tanjant hız haritaları verilmiştir. Giriş genişliğinin büyük olması, D1 grubu siklonlarda 17 m/s giriş hızını elde etmek için ihtiyaç duyulan debiyi, diğer siklon gruplarına göre daha da arttırmaktadır. Bu durumda siklon içerisindeki tanjant hız değerleri de artmaktadır. Giriş hızının 17 m/s olduğu her iki siklonda da tanjant hız değerleri, 35 m/s mertebelerine kadar çıkmaktadır. Standart tavanlı siklonda iç vorteksin stabil yapısından ötürü simetrik bir tanjant hız dağılımı görülmektedir. Helezonik tavanlı D1-4 siklonunda ise özellikle çıkış borusunun girişine bakıldığında asimetrik hız dağılımı dikkat çekmektedir (Şekil 3.70). Çıkış

borusunun içinde ise vorteks yapısı dairesel bir kanalda ilerlediği için düzgün bir tanjant hız dağılımı oluşmaktadır.

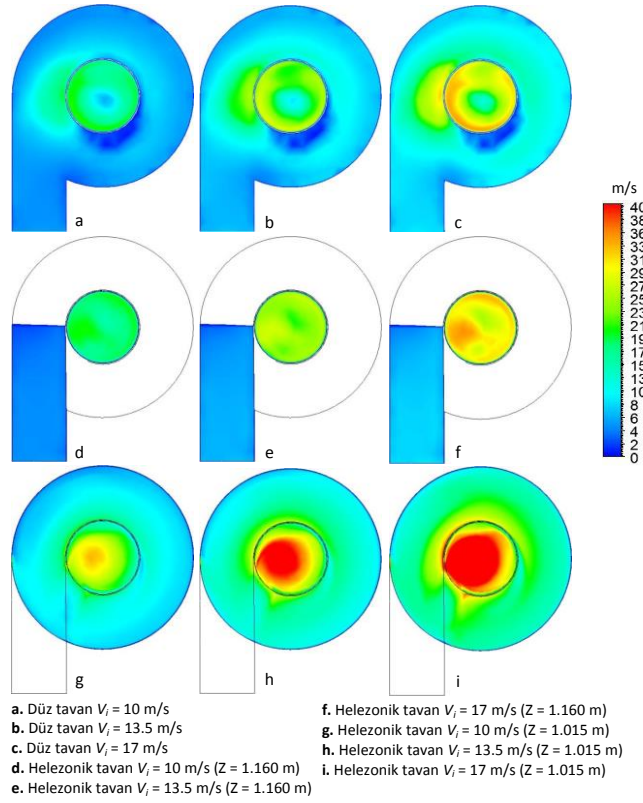


Şekil 3.69 D1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (üstten görünüm)

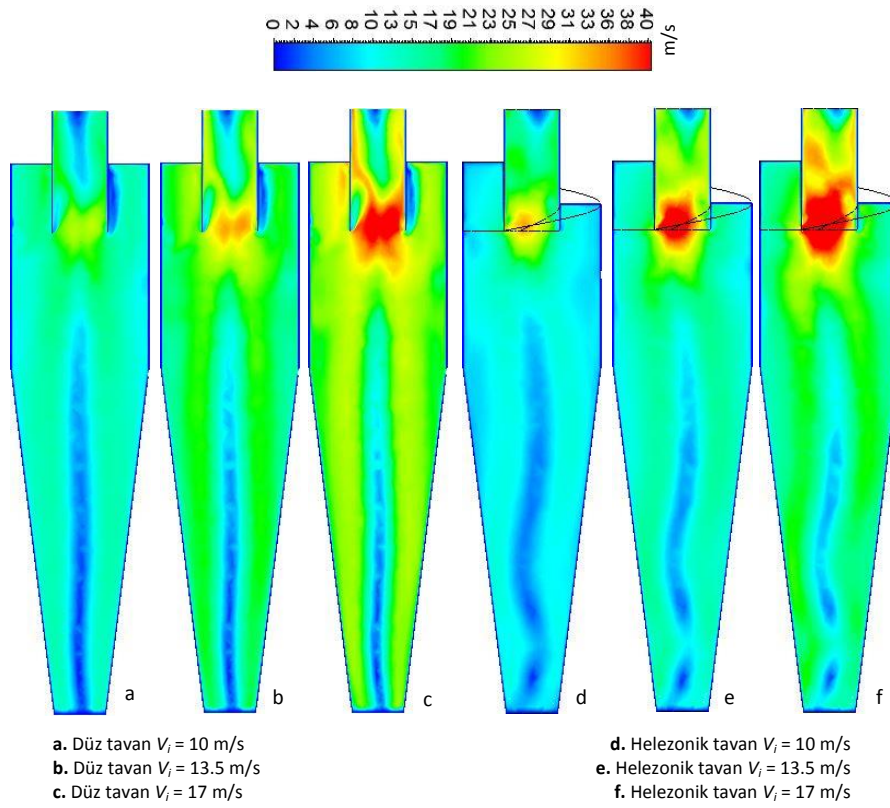


Şekil 3.70 D1 kodlu siklonlarda tanjant hız haritaları (önden görünüm)

Son olarak D1 grubu siklonlarda toplam hız haritaları Şekil 3.71 ve Şekil 3.72’de verildiği gibidir. Tüm denemelerde iç vorteksin merkez çizgisinde, siklonun belli bir yüksekliğine kadar toplam hız 0 m/s’dir. En düşük gaz giriş hızının olduğu siklonlarda bu yükseklik siklon gövdesinin ortalarına kadar çıkmaktadır. Giriş hızı arttıkça iç vorteks akımı da hızlanmakta ve düzensizleşmektedir. En yüksek gaz giriş hızının olduğu hem standart hem de helezonik tavanlı siklonlarda, çıkış borusuna da yaklaştıkça toplam hızın çok fazla artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Çıkış borusu girişinde ise türbülanslı akım olduğu ve vorteks merkez çizgisinin kaybolduğu söylenebilir. Çıkış borusunun çıkışına doğru ise, türbülansın sona erdiği ve yeniden merkezde hızın 0 m/s olduğu düzgün vorteks akımının oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.72.a). Yüksek gaz giriş hızı için ihtiyaç duyulan yüksek debinin de etkisiyle siklonlarda 40 m/s mertebelerinde toplam hız parametresi tespit edilmiştir. Bu seviyede hız oluşumu, hem paletli hem de paletsiz siklonda görülmektedir. D grubunda palet yapısının iç vortekse etkisi göz önüne alındığında, 13,5 m/s gaz giriş hızında dahi çıkış borusunda maksimum toplam hız değerleri saptanmıştır. Standart tavanlı D1-0 siklonunda aynı gaz giriş hızında oluşan en yüksek toplam hız değeri ancak 32–33 m/s civarında görünmektedir. Şekil 3.71.h ve Şekil 3.71.i’de de çıkış borusunun üstten görünümüne bakıldığında, düzensiz vorteks yapısı ve ulaştığı hız değeri görülebilmektedir.



Şekil 3.71 D1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (üstten görünüm)



Şekil 3.72 D1 kodlu siklonlarda toplam hız haritaları (önden görünüm)

3.3.3 Partikül Tutma Verimleri

Ayrık Faz Modeli - Discrete Phase Model (DPM)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerinde partikül tutma verimleri, kesme çapı parametresi üzerinden yorumlanmaktadır. Çalışmaya konu siklonlar için kesme çapı parametresi, deneysel sonuçlara ilaveten HAD modelleri ile tahmin edilmiştir. Tablo 3.11’de her iki yöntemle elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 3.11 Kesme çapına dair deney ve model sonuçları

Siklon grubu	Giriş hızı (m/s)	Kesme çapı (μm)					
		Standart tavan			Helezonik tavan		
		ölçülen	hesaplanan	fark (%)	ölçülen	hesaplanan	fark (%)
A1	13,5	3,46	3,62	4,67	5,81	6,08	4,65
	17	3,11	3,16	1,58	5,27	5,36	1,71
	20,5	2,90	2,85	1,82	5,03	4,99	0,80
A2	13,5	3,55	3,83	7,88	4,54	4,83	6,46
	17	3,44	3,53	2,73	4,01	4,03	0,51
	20,5	3,61	3,4	5,95	4,06	4,36	7,50
A3	13,5	4,25	4,67	9,83	4,03	4,19	3,90
	17	4,30	4,35	1,10	3,82	3,73	2,48
	20,5	4,54	4,21	7,26	3,91	3,77	3,65
B1	10	3,92	4,24	8,16	6,44	6,99	8,56
	13,5	3,61	3,47	3,88	6,36	6,6	3,84
	17	3,37	3,31	1,78	6,50	6,04	7,06
B2	10	3,85	4,14	7,66	6,12	5,42	11,44
	13,5	3,62	3,38	6,59	5,81	6,15	5,85
	17	3,40	2,99	12,13	5,86	6,2	5,80
B3	10	4,17	4,64	11,29	5,25	5,39	2,67
	13,5	4,41	4,5	2,15	5,40	5,71	5,74
	17	4,82	4,44	7,86	5,37	4,87	9,31
C1	10	2,87	2,49	13,19	3,51	3,47	1,04
	13,5	2,60	2,45	5,85	3,37	3,5	3,90
	17	2,62	2,38	9,03	3,11	3,25	4,61
D1	10	3,19	3,26	2,19	4,74	5,27	11,08
	13,5	3,27	3,4	3,98	4,54	4,28	5,69
	17	3,44	3,18	7,56	4,88	4,5	7,85
Ortalama Fark % 6,09 $\pm$ % 3,54				Ortalama Fark % 5,25 $\pm$ % 3,05			

Basınç kayıplarında olduğu gibi her bir siklon için deney ve model sonuçları arasında en fazla % 10 - 12 civarı farklar mevcuttur. Standart tavanlı siklonlar için ortalama % 6,09; helezonik tavanlı siklonlar içinse ortalama % 5,25 fark

hesaplanmıştır. Bu farkları modelin yanılma payı olarak düşünmek mümkündür. Tez kapsamında yapılan bu çalışmalarda elde edilen sonuçların, deneysel ve modelleme olarak birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Buradan hareketle, basınç kaybında olduğu gibi kesme çapı parametresinin de HAD modelleri ile rahatlıkla ve güvenilir bir biçimde çalışılmasının mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışma, standart tasarıma sahip siklonlarda bazı modifikasyonlar yapılarak performans değişimini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu modifikasyonlar kapsamında başlıca helezonik tavan yapıları (palet yapıları) ön plana çıkmaktadır. Helezonik tavanlı siklonlarda performansı oluşturan iki temel parametre olan basınç kaybı ve partikül tutma verimleri incelenmiştir. Ardından bu iki parametre baz alınarak maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modelleri ile akış özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun sebebi, performans verilerinin oluşumunda akış özelliklerinin doğrudan etkili olmasıdır.

Çalışmaya dair bazı kısıtları önceden belirtmek, sonuçların yorumlanmasında faydalı olacaktır. Burada en önemli kısıtlayıcı faktör, hava fanıdır. Bilindiği üzere fanların alt ve üst çalışma limitleri mevcuttur. Bu limitler dahilinde çalışma kapsamında tüm siklon gruplarında aynı minimum giriş hızını seçmek mümkün olmamıştır. Giriş kesit alanının büyüklüğü sebebiyle bir grupta en düşük gaz giriş hızı 13,5 m/s olarak seçilebilmiştir. Ayrıca giriş kesit alanı gibi çıkış borusu boyutları çalışma kapsamında sınırlı sayıda bulunmaktadır. Bu gibi temel tasarım kriterleri, çalışmanın bir diğer kısıtlayıcı faktörleridir. Yine kısıtlayıcı faktör olarak değerlendirilebilecek diğer parametre de çalışmada partikül madde olarak seçilen uçucu küldür. Çalışma laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirildiği için temin edilen toz malzemenin sunduğu boyut dağılımının dışına çıkmak mümkün olmamıştır. Bu açıdan oluşabilecek uç senaryoları test etmek, çalışma kapsamında mümkün olmamıştır.

Çalışma kapsamında, standart tasarım ve helezonik tavanlı (paletli) siklonlarda basınç kaybı ve partikül tutma verimi parametreleri önce deneysel metotlarla araştırılmıştır. Ardından deneysel verilerle kalibre edilen HAD modelleri ile, ilgili siklonlarda hız bileşenleri ve basınç kaybı başta olmak üzere temel performans parametreleri incelenmiştir.

Standart tasarım olarak tanımlanan siklonlar gövde, konik kısım ve çıkış borusu uzunluğu itibariyle Stairmand yüksek verimli siklon geometrisi baz alınarak inşaa edilmiştir. Giriş yapısı boyutları ve çıkış borusu çapı ise her siklonda değişkenlik göstermektedir. Bu siklonlara ilave edilen paletler ile giriş ve gövde yapıları modifiye edilmiştir. Bu çalışmaların temel hedefi, helezonik tavan yapısının siklon performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktır.

Çalışmalar sırasında standart siklon tasarımlarına, sırasıyla dört farklı palet yapısı ilave edilmiştir. Bunlar içerisinde giriş kanalını siklon merkez çizgisine kadar kapalı bir kanal şeklinde uzatan 1 nolu palet, giriş kanalı yüksekliğinin $\frac{1}{4}$ 'ü oranında alçalan 2 nolu palet ve giriş kanalı yüksekliğinin $\frac{1}{2}$ 'si oranında alçalan 3 nolu palet yapılarının basınç kaybını büyük oranda azalttığı tespit edilmiştir. Basınç kaybı üzerindeki pozitif etkilerinin yanında partikül tutma verimi üzerinde ise genellikle olumsuz etkiye sahiptirler. Endüstriyel kullanımda siklonların pek çok zaman ön arıtma prosesi olarak işletildiği göz önüne alındığında, düşük tutma verimlerine rağmen düşük işletme maliyetleri bir avantaj olarak düşünülebilir. Bu bağlamda 1, 2 ve 3 nolu paletlerin doğrudan performansı olumsuz etkilediği sonucunu çıkarmak yanlış olacaktır.

4 nolu palet tasarımı, giriş kanalı yüksekliği kadar alçalarak kanalın tabanı ile birleşmektedir. Helezonik tavan olarak da isimlendirilen bu paletin performansa etkisi, diğer paletlerle aynı eğilimdedir. Ancak hem basınç kaybı hem de partikül tutma verimi açısından elde edilen sonuçlar, standart tavanlı siklonların performansı ile daha kıyaslanabilir düzeydedir. Özellikle siklonların tek başına arıtım prosesi olarak kullanılacağı durumlarda maliyet analizleri de dikkate alınarak, helezonik tavan yapısına sahip bir siklon, standart siklona alternatif olarak düşünülebilir.

A ve B grubu siklonlar iki farklı giriş yapısıyla birbirinden ayrılmaktadır. Her iki grupta da farklı çıkış borusu çapları ile üçer adet standart siklon tasarımı mevcuttur. Standart tasarımların yanı sıra her siklonun helezonik tavanlı versiyonu bulunmaktadır. Çalışmalar sonucu dikkat çeken bir diğer sonuç, iki grupta da çıkış borusu çapının artmasıyla tutma veriminde gerçekleşen

değişiklidir. Standart tavanlı siklonlarda çıkış borusu çapının artmasıyla tutma verimlerinin azaldığı, helezonik tavanlı siklonlarda ise arttığı görülmüştür.

Çalışmalarda B, C ve D grupları 10, 13,5 ve 17 m/s; A grubu ise 13,5, 17 ve 20,5 m/s'lik gaz giriş hızlarında denenmiştir. Tüm grupların giriş kesit alanı farklı olduğu için bu hız değerlerini elde etmek için ihtiyaç duyulan debi de farklıdır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Siklon gruplarına göre ihtiyaç duyulan debiler

$V_{(giriş)}$ (m/s)	<i>Her siklon için gereken debi (L/s)</i>			
	A	B	C	D
10	—	84,1	100,9	126,2
13,5	90,8	113,5	136,2	170,3
17	114,4	143,0	171,6	214,5
20,5	137,9	—	—	—

C ve D gruplarında basınç kaybının diğer gruplara göre çok daha yüksek olduğu saptanmıştır. Tabloda görüldüğü üzere aynı gaz giriş hızı için bu siklonlarda gereken debi çok yüksektir. Debideki artışın neticesinde basınç kaybı da artmaktadır.

Yine C ve D grubu siklonlarda verim yüzdeleri de yüksektir. Çalışmada esas alınan standart tasarım, Stairmand yüksek verimli siklon geometrisidir. C ve D grubunda giriş kesit alanının büyümesiyle daha yüksek hacimli siklonlar ortaya çıkmıştır. Tüm deneylerde aynı süre ve miktarda toz dozajı yapılmıştır. C ve D grubunda debinin de artmasıyla toz konsantrasyonu düşmüştür. Bu durumda düşük konsantrasyonda verimin artmış olabileceği yorumu yapılabilir.

A3-4 siklonunda partikül tutma verimi, standart tavanlı muadiline göre artış göstermiştir. Tüm gruplar içerisinde benzer yönde bir sonuç alınan başka bir siklon yoktur. Ancak maliyet analizi göz önüne alındığında palet yapısının ekonomik yönden sunduğu katkı, diğer siklon gruplarına göre çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu durumun temel sebebi basınç kaybıdır. A3 grubunda palet yapısının basınç kaybını düşürücü etkisi neredeyse yok denecek kadar azdır. Benzer şekilde B3 grubunda da palet yapısının sağladığı maliyet azaltımı çok düşük düzeydedir. Helezonik tavanlı B3-4 siklonunda partikül tutma

verimi artmamış, ancak basınç kaybı azalmıştır. Hem A3 hem de B3 grubunda palet yapısının benzer oranlarda maliyet azaltımı sağladığı anlaşılmaktadır. Bu sonuçlara göre basınç kaybının maliyet üzerindeki etkisinin, tutma verimine göre çok daha fazla olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Maliyet analizi tablolarına göre siklonlarda giriş hızı arttıkça birim işletme gücü ($\text{kW/m}^3/\text{s}$) artmaktadır. Eğer atıkgaz debisi düşükse, hızı azaltacak daha büyük bir giriş yapısı avantaj olabilir. Bu sebeple mevcut atıkgaz debisi ve hedeflenen verim doğrultusunda standart tasarımlara alternatif olarak farklı giriş yapıları ve helezonik tavan tercih edilebilir.

Paletli siklonlar genel itibariyle standart tavanlı muadillerine göre daha düşük partikül tutma verimlerine sahiptir. Aynı zamanda model sonuçlarına göre helezonik tavanlı siklonların iç vorteks yapılarında çoğunlukla dalgalanma gözlenmiştir. Buradan dış vorteks yapısının da bozuk olduğu anlaşılmaktadır. Bir siklon içerisinde partiküllerin tutulması için etken mekanizma merkezkaç kuvvetidir. Dış vorteks yapısı merkezkaç kuvvetinin şiddetini belirleyen etkin yarıçapın oluşumunda; iç vorteks yapısı ise verimi düşüren geri karışım ve kısa devre durumlarının gerçekleşmesinde doğrudan etkilidir. Bu bilgiler ışığında helezonik palet yapısının vorteks akımını olumsuz etkileyerek partikül tutma verimini düşürdüğü sonucuna varılabilir.

A3 grubu siklonlar helezonik tavanın tutma verimine etkisi konusunda istisna olarak görünmektedir. Ancak B3 grubuna da bakıldığında, standart tavanlı siklon ile helezonik tavanlı siklon arasında % 2–3 civarı verim farkı vardır. Bu fark, B1 ve B3 gruplarına göre çok daha düşük seviyelerdedir. Bu noktadan hareketle rampa yapısının olumsuz etkisinin yanında çıkış borusu çapının artması ise verime pozitif etki etmektedir. Ancak bu etki, A3 grubundaki verim artışını tek başına açıklayamamaktadır. A ve B grupları arasındaki en önemli fark giriş yüksekliğidir. Giriş yüksekliği, akımın tur sayısı parametresini doğrudan etkilemektedir. Buradaki tur ifadesi, gaz akımının siklon gövdesi boyunca yaptığı dairesel harekettir. Bu dairesel hareket sayesinde oluşan merkezkaç kuvveti ile partiküller siklon duvarına sürüklenmektedir. Tur sayısı ne kadar yüksek olursa tutulma da o kadar fazla olacaktır. Sonuç olarak A3 grubu siklonlarda helezonik

tavanın verime olumlu etkisi, giriş yüksekliği ve çıkış borusu çapı parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi ile daha iyi açıklanabilir.

Çıkış borusu çapından bağımsız değerlendirme yapıldığında, genel olarak standart tavanlı siklonlarda verimin yüksek olması yine tur sayısı ile açıklanabilir. Palet yapısının, akımı doğrudan aşağı yönlü harekete zorlayarak tur sayısının azalmasına neden olması oldukça muhtemeldir. Bu yaklaşım, siklonların tanjant hız haritaları ile desteklenebilir. Nitekim tüm siklon gruplarında, standart tavanlı siklonların gövdelerinde daha büyük tanjant hız değerleri gözlenmiştir. Bu durum da daha fazla merkezkaç kuvveti oluşturmaktadır.

Elde edilen bulgular neticesinde, siklon seçimi yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli parametre atıkgaz debisidir. Tasarlanan ve deneysel uygulaması yapılan palet tasarımlarının siklon fayda/maliyet oranına önemli derecede etki ettiği görülmüştür. Bu sebeple üretim aşamasında yapılacak ufak bir değişimle standart tasarımların yerine helezonik tavanlı siklon tasarımları rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca giriş yapısı ve çıkış borusu boyutlarının da siklon performansına etkisi açıkça ortaya konmuştur.

Model sonuçları, deneysel verilerle oldukça uyumludur. Bu sonuçların elde edilmesindeki önemli etkenlerden biri de kalibrasyon çalışmalarıdır. Elde edilen deneysel veriler, model kurulumunda kalibrasyon amaçlı kullanılmıştır. Bu çalışmanın modelleme aşamasının diğer modelleme çalışmalarından en önemli farkı da budur. Fiziksel ve diğer ortam varsayımlarının yanında gerçek deney sonuçları da model altyapısının kurulumunda kullanılmıştır.

Modelleme çalışmaları kapsamında hız parametresi de çalışılmıştır. Siklonlarda toplam hızın yanı sıra tanjant ve eksenel hız bileşenleri de modellenmiş ve hem görsel hem de sayısal değerler elde edilmiştir. Model çalışması basınç kaybı sonuçları ile kalibre edilmiştir. Ancak akışkanların kapalı ortamda basınç ve hız parametreleri arasında doğrudan ilişki vardır. Hız modellerinin de basınç kaybı modelleri gibi güvenilir olması, bu şekilde açıklanabilir. Tüm siklonlar için hız haritaları incelendiğinde büyük bir iş yükünün HAD modellemesi ile ne kadar kolay hale geldiği de görülmektedir.

Çalışma kapsamında yapılan deneysel ve model çalışmalarından elde edilen sonuçlar, fayda/maliyet oranı açısından optimize edilmiş olup en yüksek performansı sağlayan siklon modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Konuyla ilgili akademik çalışmaların ülkemizde ve dünyada artarak devam etmesi, son yıllarda konuya dair artan ilgi de gözetilerek, oldukça mümkün görünmektedir. Bu konuda palet yapılarının gövde ve koni yüksekliği ile birlikte performansa etkisi muhtemel araştırma konularından biri olabilir. Mevcut çalışmada bu geometrik parametreler Stairmand yüksek verimli siklon tasarımı baz alınarak sabit tutulmuştur. Ayrıca helezonik tavan yapısının birden fazla tur atarak gövde boyunca alçalması da gelecekte deneysel ve nümerik olarak araştırma konusu olabilir.

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, laboratuvar ölçekli bir siklon modeline aittir. Yapılan maliyet analizleri de yalnızca bu siklon düzeneğinde gerçekleşen güç tüketimlerini hesaba katmaktadır. Endüstriye ölçekte ise siklonlar, proses akım şeması içerisinde belli bir konumda yer almaktadır. Yani sistemin diğer bölgelerindeki basınç kayıplarının da göz önünde bulundurulması gerektiği unutulmamalıdır. Dolayısıyla bu tip bir uygulamanın gerçek ölçeğe aktarımı konusunda siklonları içerisinde bulundukları prosesle birlikte değerlendirmenin daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında türbülans modeli olarak Reynold Stress Model (RSM) kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak kıyaslamak adına farklı bir türbülans modeli kullanılmamıştır. Bu kapsamda farklı türbülans modelleri ile yapılacak çalışmalar da, ileride yapılacak araştırmaların konusu olmaya aday olabilir.

- Abramesko, V. ve Tartakovsky, L. (2017). "Ultrafine particle air pollution inside diesel-propelled passenger trains". *Environmental Pollution*, 226, 288-296.
- Alexander, R. M. (1949). "Fundamentals of cyclone design and operation", *Proceedings of Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 152, 203-238.
- APTI 413, (1999). "Student manual for control of particulate matter emissions" (5. bs.). <http://www.4cleanair.org/APTI/413Combined.pdf>. adresinden 6 Aralık 2015 tarihinde erişildi.
- Abdul-Wahab, S., Failaka, M. F., Ahmadi, L., Elkamel, A. ve Yetilmezsoy, K. (2014). "Nonlinear programming optimization of series and parallel cyclone arrangement of NPK fertilizer plants", *Powder Technology*, 264, 203-215.
- Arkouli, M., Ulke, A. G., Endlicher, W., Baumbach, G., Schults, E., Vogt, U., Müller, M., Dawidowski, L., Faggi, A., Wolf-Benning, U. ve Scheffknecht, G. (2010). "Distribution and temporal behavior of particulate matter over the urban area of Buenos Aires", *Atmospheric Pollution Research*, 1, 1-8.
- Asnaghi, A., Svennberg, U. ve Bensow, R. E. (2019). "Evaluation of curvature correction methods for tip vortex prediction in SST $k - \omega$ turbulence model framework". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 75, 135-152.
- Avcı, A. ve Karagöz, I. (2003). "Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators". *Aerosol Science*, 34, 937-955.
- Avcı, A., Karagöz, I. ve Sürmen, A. (2013). "Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators". *Powder Technology*, 235, 460-466.
- Azadi, M., Azadi, M. ve Mohebbi, A., (2010). "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters". *Journal of Hazardous Materials*, 182, 835-841.
- Bai, X., Liu, Y., Wang, S., Liu, C., Liu, F., Su, G., P, X., Yuan, C., Jiang, Y. ve Yan, B. (2018). "Ultrafine particle libraries for exploring mechanisms of PM_{2.5}-induced toxicity in human cells". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157, 380-387.
- Balmes, J. R., Earnest, G., Katz, P. P., Yelin, E. H., Eisner, M. D., Chen, H., Trupin, L., Lurmann, F. ve Blanc, P. D. (2009). "Exposure to traffic: Lung function and health status in adults with asthma". *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 123(3), 626-631.
- Barth, W. (1956). "Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations". *Brennst-Warme-Kraft*, 8, 1-9.
- Baures, E., Blanchard, O., Mercier, F., Suget, E., Cann, P., Rivier, A., Gangneux, J. P. ve Florentin, A. (2018). "Indoor air quality in two French hospitals: Measurement of chemical and microbiological contaminants". *Science of Total Environment*, 642, 168-179.

- Billings, C. E. ve Wilder, J. (1970). "Handbook of fabric filter technology". *ABD: US Public Health Service*.
- Brar, L. S. (2018). "Application of response surface methodology to optimize the performance of cyclone separator using mathematical models and CFD simulation". *Materials Today: Proceedings*, 5, 20426-20436.
- Brar, L. S. ve Elsayed, K. (2018). Analysis and optimization of cyclone separators with eccentric vortex finders using large eddy simulation and artificial neural network, *Separation and Purification Technology*, 207, 269-283.
- Brar, L. S., Sharma, R. P. ve Dwivedi, R. (2014). "Effect of vortex finder diameter on flow field and collection efficiency of cyclone separators". *Particle Science and Technology*, 33, 34-40.
- Brar, L. S., Sharma, R. P. ve Elsayed, K. (2015). "The effect of cyclone length on the performance of Stairmand high efficiency cyclone". *Powder Technology*, 286, 668-677.
- Brewer, R. ve Belzer, W. (2001). "Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake, British Columbia, Canada". *Atmospheric Environment*, 35, 5223-5233.
- Buonanno, G., Anastasi, P., Di Lorio, F. ve Viola, A. (2010). "Ultrafine particle apportionment and exposure assessment in respect of linear and point sources". *Atmospheric Pollution Research*, 1, 36-43.
- Calvert, S., Goldschmid, J., Leith, D. ve Mehta, D. (1972). "Scrubber Handbook". *Virginia: NTIS*.
- Calvert, S. (1977). "How to choose a particulate scrubber". *Chemical Engineering*, 54-68.
- Canha, N., Almeida, S. M., Freitas, M. C., Trancoso, M., Sousa, A., Mouro, F. ve Wolterbeek, H. T. (2014). "Particulate matter analysis in indoor environments of urban and rural primary schools using passive sampling methodology". *Atmospheric Environment*, 83, 21-34.
- Casal, J. ve Martinez-Benet, J. M. (1983). "A better way to calculate cyclone pressure drop". *Chemical Engineering*, 99, 100-111.
- Chen, J. ve Shi, M., (2007). "A universal model to calculate cyclone pressure drop". *Powder Technology*, 171, 184-191.
- Cheng, Y. S. (2003). "Aerosol deposition in the extrathoracic region". *Aerosol Science and Technology*, 37, 659-671.
- Christoph, H., Robert, G., Urs, B., Martin, G., Christian, M. ve Heinz, V. (2005). "Chemical Characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural Switzerland". *Atmospheric Environment*, 39, 637-651.
- Chu, K. W., Chen, J., Wang, B., Yu, A. B., Vince, A., Barnett, G. D. ve Barnett, P. J. (2017). "Understands solids loading effects in a dense medium cyclone: Effect of particle size by a CFD-DEM method". *Powder Technology*, 320, 594-609.

- Chuah, T. G., Gimbun, J. ve Choong, T. S. Y. (2006). "A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics". *Powder Technology*, 162, 126-132.
- Ci, H. ve Sun, G. (2015). "Effect of wall roughness on the flow field and vortex length of cyclone". *Procedia Engineering*, 102, 1316-1325.
- Comas, M., Comas, J., Chetrit, C. ve Casal, J. (1991). "Cyclone pressure drop and efficiency with and without an inlet vane". *Powder Technology*, 66(2), 143-148.
- Cortes, C. ve Gil, A. (2007). "Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators". *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 409-452.
- Cotas, C., Silva, R., Garcia, F., Faia, P., Asendrych, D. ve Rasteiro, G. (2015). "Application of different low-Reynolds k- ϵ turbulence models to model the flow of concentrated pulp suspensions in pipes". *Procedia Engineering*, 102, 1326-1335.
- Davies, C. N. (1973). "Air filtration". *Londra: Academic Press Inc.*
- Demir, S. (2014). "A practical model for estimating pressure drop in cyclone separators: An experimental study". *Powder Technology*, 268, 329-338.
- Demir, S., Karadeniz, A. ve Aksel, M. (2016). "Effects of cylindrical and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones". *Powder Technology*, 295, 209-217.
- Demir, S., Karadeniz, A., Civelek Yörüklü H. ve Manav Demir, N. (2017). "An MS Excel tool for parameter estimation by multivariate nonlinear regression in environmental engineering education". *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35(2), 265-273.
- Demir, S., Karadeniz, A., Manav Demir, N. ve Duman, S. (2018). "Excel VBA-Based Solution to Pipe Flow Measurement Problem". *Spreadsheets in Education (eJSiE)*, 10 (3), Article 1.
- Dockery, D. W., Cunningham, J., Damokosh, A. I., Neas, L. M., Spengler, J. D., Koutrakis, P., Ware, J. H, Raizenne, M. ve Speizer, F. E. (1996a). "Health effects of acid aerosols on North American children: Respiratory symptoms". *Environmental Health Perspectives*, 104, 500-505.
- Dockery, D. W. ve Pope, C. A. (1996b). "Epidemiology of acute health effects: Summary of time-series studies, Particles in our Air: Concentrations and Health Effects". Editör: Wilson, R., Spengler, J. Cambridge, MA: *Harvard University Press*.
- Elsayed, K. ve Lacor, C. (2010). "Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations". *Chemical Engineering Science*, 65, 6048-6058.
- Elsayed, K. ve Lacor, C. (2011a). "The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance". *Applied Mathematical Modeling*, 35, 1952-1968.

- Elsayed, K. ve Lacor, C., (2011b). "Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters". *Computers & Fluids*, 51, 48-59.
- Elsayed, K. ve Lacor, C., (2011c). "Modeling, analysis and optimization of aircyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches". *Powder Technology*, 212, 115-133.
- Elsayed, K. ve Lacor, C. (2012). "The effect of dust outlet geometry on the performance and hydrodynamics of gas cyclones". *Computers & Fluids*, 68, 134-147.
- Elsayed, K. ve Lacor, C. (2013a). "The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES". *Computers & Fluids*, 71, 224-239.
- Elsayed, K. ve Lacor, C. (2013b). "CFD modeling and multi-objective optimization of cyclone geometry using desirability function, artificial neural networks and genetic algorithms". *Applied Mathematical Modeling*, 37, 5680-5704.
- Faulkner, W. B. ve Shaw B. W. (2006). "Efficiency and Pressure Drop of Cyclones Across a Range of Inlet Velocities". *Applied Engineering in Agriculture*, 22 (1), 155-161.
- First, M. W. (1950). "Fundamental factors in the design of cyclone dust collectors". (Doktora tezi). *Harvard University*.
- Funk, P. A., Elsayed, K., Yeater, K. M., Holt, G. A. ve Whitelock, D. P. (2015). "Could cyclone performance improve with reduced inlet velocity". *Powder Technology*, 280, 211-218.
- Gao, Z., Wang, J., Liu, Z., Wie, Y., Wang, J. ve Mao, Y. (2020). "Effects of different inlet structures on the flow field of cyclone separators". *Powder Technology*, 372, 519-531.
- Gimbun, J., Chuah, T. G., Choong, T. S. Y. ve Fakhru'l-Razi, A., (2005a). "Prediction of the effects of cone-tip diameter on the cyclone performance". *Aerosol Science*, 36, 1056-1065.
- Gimbun, J., Chuah, T. G., Fakhru'l-Razi, A. ve Choong, T. S. Y. (2005b). "The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study". *Chemical Engineering and Processing*, 44, 7-12.
- Güney, B. ve Aladağ, A. (2021). "Dizel Yakıtlı Taşıtlardan Salınan Partikül Emisyonlarının Mikroyapı ve Kimyasal Karakterizasyonu". *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1); 287-298.
- Gong, G., Yang, Z. ve Zhu, S. (2012). "Numerical Investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator". *Applied Mathematical Modelling*, 36, 3916-3930.
- Habre, R., Zhou, H., Eckel, S., Enebish, T., Fruin, S., Bastain, T., Rappaport, E. ve Gilliland, F. (2018). "Short-term effects of airport-associated ultrafine

- particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma”. *Environment International*, 118, 48-59.
- Haig, C. W., Hursthouse, A., Sykes, D. ve Mcilwain, S. (2016). “The rapid development of small scale cyclones – numerical modelling versus empirical models”. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 6082-6104.
- Hamdy, O., Bassily, M. A., El-Batsh, H. M. ve Mekhail, T. A. (2017). “Numerical study of the effect changing the cyclone cone length on the gas flow field”. *Applied Mathematical Modelling*, 46, 81-97.
- Herrick, T. J. ve Davis, W. T. (2000). “Cyclones and Inertial Separators”. Editör: Davis, W.T. *New York: John Wiley & Sons*.
- Hoffmann, A. C., van Santen, A. ve Allen, R. W. K. (1992). “Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones”. *Powder Technology*, 70, 83-91.
- Hoffmann, A. C, de Groot, M., Peng, W., Dries, H. W. A. ve Kater, J. (2001). “Advantages and risks in increasing cyclone separator length”. *AIChE Journal*, 47(11), 2452-2460.
- Hoffmann, A. C. ve Stein L. E. (2008). “Gas Cyclones and Swirl Tubes : Principles, Design and Operation” (2. bs.). *Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Huang, A., Maeda, N., Shibata, D., Fukasawa, T., Yoshida, H., Kuo, H. ve Fukui, K. (2017). “Influence of laminarizer at the inlet on the classification performance of a cyclone separator”. *Separation and Purification Technology*, 174, 408-416.
- Huang, A., Ito, K., Fukasawa, T., Fukui, K. ve Kuo, H. (2018). “Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator”. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 90, 61-67.
- Huang, A., Ito, K., Fukasawa, T., Yoshida, H., Kuo, H. P. ve Fukui, K. (2018). “Classification performance analysis of a novel cyclone with a slit on the conical part by CFD simulation”. *Separation and Purification Technology*, 190, 25-32.
- Ichinose, T. ve Sagai, M. (1992). “Combined exposure to NO₂, O₃ and H₂SO₄-aerosol and lung tumor formation in rats”. *Toxicology*, 74, 173-184.
- Jaworek, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., Marchewicz, A., Czech, T. ve Sliwinski, L. (2019). “Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review”. *Separation and Purification Technology*, 213, 283-302.
- Jewell, R. B. ve Rathbone, R. F. (2009). “Optical Properties of Coal Combustion Byproducts for Particle-Size Analysis by Laser Diffraction”. *Coal Combustion and Gasification Products*, 1, 1-7.
- Juengcharoensukying, J., Poochinda, K. ve Chalermssinsuwan, B. (2017). “Effects of cyclone vortex finder and inlet angle on solid separation using CFD simulation”. *Energy Procedia*, 138, 1116-1121.

- Kepa, A. (2010). "Division of outlet flow in a cyclone vortex finder – The CFD calculations". *Separation and Purification Technology*, 75, 127-131.
- Karagöz, İ. ve Avcı, A. (2003). Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators, *Journal of Aerosol Science*, 34, 937-955.
- Kreyling, W. G., Semmler-Behnke, M. ve Moller, W. (2006). "Health implications of nanoparticles". *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 543-562.
- Kumar, V. ve Jha, K. (2019). "Multi-objective shape optimization of vortex finders in cyclone separators using response surface methodology and genetic algorithms". *Separation and Purification Technology*, 215, 25-31.
- Leiva, G. M. A., Santibanez, D. A., Ibarra, E. S., Matus, C. P. ve Sequel, R. (2013). "A five-year study of particulate matter (PM_{2.5}) and cerebrovascular diseases". *Environmental Pollution*, 181, 1-6.
- Li, Y., Qin, G., Xiong, Z., Ji, Y. ve Fan, L. (2019). "The effect of particle humidity on separation efficiency for an axial cyclone separator". *Advanced Powder Technology*, 30(4), 724-731.
- Licht, W. (1988). "Air pollution control engineering: Basic calculations for particulate collection" (2. bs.). *New York: Marcel Dekker Inc.*
- Lim, K. S., Kim, H. S. ve Lee, K. W. (2004). "Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes". *Journal of Aerosol Science*, 35, 743-754.
- Lin, M., Chen, Y., Burnett, R. T., Villeneuve, P. J. ve Krewski, D. (2002). "The influence of ambient coarse particulate matter on asthma hospitalization in children: Case-crossover and time series analyses". *Environmental Health Perspectives*, 110(6), 575-581.
- Liu, S. K., Cai, S., Chen, Y., Xiao, B., Chen, P. ve Xiang, X. D. (2016). "The effect of pollution haze on pulmonary function". *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), 41-56.
- Mann, J. K., Balmes, J. R., Bruckner, T. A., Mortimer, K. M., Margolis, H. G., Pratt, B., Hammond, S. K., Lurmann, F. W. ve Tager, I. B. (2010). "Short-term effects of air pollution on wheeze in asthmatic children in Fresno, California". *Environmental Health Perspectives*, 118(10), 1497-1502.
- Misiulia, D., Andersson, A. G. ve Lundström, T. S. (2017b). "Effects of the inlet angle on the collection efficiency of a cyclone with helical-roof inlet". *Powder Technology*, 305, 48-55.
- Misiulia, D., Elsayed K. ve Andersson, A., G. (2017a). "Geometry optimization of a deswirlor for cyclone separator in terms of pressure drop using CFD and artificial neural network". *Separation and Purification Technology*, 185, 10-23.
- Modabberifar, M., Nazaripoor, H. ve Safikhani, H. (2021). "Modelling and numerical simulation of flow field in three types of standard new design cyclone separators". *Advanced Powder Technology*, 32(11), 4295-4302.

- Morawska, L., Thomas, S., Gilbert, D., Greenaway, C. ve Rijnders, E. (1999). "A study of the horizontal and vertical profile of submicrometer particles in relation to a busy road" *Atmospheric Environment*, 33(8), 1261-1274.
- Muschelknautz, E. (1972). "Die berechnung von zyklonabscheidern für gase". *Chemie Ingenieur Technik*, 44(1-2), 63-71.
- Nitta, H., Sato, T., Nakai, S., Maeda, K., Aoki, S. ve Ono, M. (1993). "Respiratory health associated with exposure to automobile exhaust. I. Results of crosssectional studies in 1979, 1982, 1983". *Archives of Environmental Health*, 48, 53-58.
- Ormstad, H. (2000). "Suspended particulate matter in indoor air: Asjuvants and allergen carriers". *Toxicology*, 152, 53-68.
- Özbeyaz, A., Tufaner, F. ve Demirci, Y. (2016), "Partikül madde ile ilişkili görüntüleri kullanarak hava kirliliği tahminine ait bir model tasarımı". *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, October 26-28, pp. 969-975.
- Parvaz, F., Hosseini, S. H., Ahmadi, G. ve Elsayed, K. (2017). "Impacts of the vortex finder eccentricity on the flow pattern and performance of a gas cyclone". *Separation and Purification Technology*, 187, 1-13.
- Parvaz, F., Hosseini, S. H., Elsayed, K. ve Ahmadi, G. (2018). "Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators". *Separation and Purification Technology*, 201, 223-237.
- Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X. ve Wang, B. (2017). "The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator". *Powder Technology*, 313, 135-144.
- Peng, W., Hoffmann, A. C., Dries, H. W. A., Regelink, M.A. ve Stein, L.E. (2005). "Experimental study of the vortex end in centrifugal separators: The natura of the vortex end". *Chemical Engineering Science*, 60, 6919-6928.
- Pisarev, G. I. ve Hoffmann, A. C. (2012). "Effect of the 'end of the vortex' phenomenon on the particle motion and separation in a swirl tube separator". *Powder Technology*, 222, 101-107.
- Pisarev, G. I., Hoffmann, A. C., Peng, W. ve Dijkstra, H. A. (2011). "Large Eddy Simulation of the vortex end in reverse-flow centrifugal separators". *Applied Mathematics and Computation*, 217, 5016-5022.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewaki, D., Ito, K. ve Thurston, G. D. (2002). "Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution". *Journal of the American Medical Association*, 187(9), 1132-1141.
- Qian, F., Zhang, J. ve Zhang, M. (2006). "Effects of prolonged vertical tube on the separation performance of a cyclone". *Journal of Hazardous Materials*, B136, 822-829.

- Rizza, V., Stabile, L., Vistocco, D., Russi, A., Pardi, S. ve Buonanno, G. (2019). "Effects of exposure to ultrafine particles on heart rate in a healthy population". *Science of Total Environment*, 650, 2403-2410.
- Robinson, M. (1971). "Air pollution control – Part I". Editör :Strauss, W. *New York: Wiley Interscience*.
- Safikhani, H. (2016). "Modeling and multi-objective Pareto optimization of new cyclone separators using SFD, ANNs and NSGA II algorithm". *Advanced Powder Technology*, 27, 2277-2284.
- Safikhani, H., Zamani, J. ve Musa, M. (2018). "Numerical study of flow field in new design cyclone separators with one, two and three tangential inlets". *Advanced Powder Technology*, 29, 611-622.
- Sedrez, T. A., Decker, R. K., Silva, M. K. Noriler, D. ve Meier, H. F. (2017). "Experiments and CFD-based erosion modeling for gas-solids flow in cyclones". *Powder Technology*, 311, 120-131.
- Shepherd, C. B. ve Lapple, C. E. (1939). "Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors". *Industrial Engineering and Chemical Research*, 31, 972-984.
- Shukla, S. K., Shukla, P. ve Ghosh, P. (2013). "The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators". *Applied Mathematical Modeling*, 37, 5774-5789.
- Siadat, M., Kheradmand, S. ve Ghadiri, F. (2017). "Improvement of the cyclone separation with a magnetic field". *Journal of Aerosol Science*, 114, 219-232.
- Singh, P., Couckuyt, I., Elsayed, K., Deschrijver, D. ve Dhaene, T. (2015). "Shape optimization of a cyclone separator using multi-objective surrogate-based optimization". *Applied Mathematical Modeling*, 40 (5-6), 4248-4259.
- Slezakova, K., Fernandes, E. O. ve Pereira, M. C. (2019). "Assessment of ultrafine particle in primary schools: Emphasis on different indoor microenvironments". *Environmental Pollution*, 246, 885-895.
- Stairmand, C. J. (1949). "Pressure drop in cyclone separators". *Engineering London*, 16B, 409-411.
- Theodore, L. (2008). "Air pollution control equipment calculations". *ABD: John Wiley & Sons*.
- Wakizono, Y., Maeda, T., Fukui, K. ve Yoshida, H. (2015). "Effect of ring shape attached on upper outlet pipe on fine particle classification of gas-cyclone". *Separation and Purification Technology*, 141, 84-93.
- Wang, L., Buser, M. D., Parnell, C. B. ve Shaw B. W. (2003). "Effect of Air Density on cyclone Performance and System Design". *Transactions of ASAE* 46 (4), 1193-1201.
- Wang, S., Li, H., Wang, R., Wang, X., Tian, R. ve Sun, Q. (2019). "Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM". *Advanced Powder Technology*, 30, 227-239.

- Wark, K., Warner, C. F. ve Davis, W. T. (1998). "Air Pollution: Its Origin and Control" (3. bs.). ABD: Addison-Wesley Longman Inc.
- Wasilewski, M., Anweiler, S. ve Masiukiewicz, M. (2018). "Characterization of multiphase gas solid flow and accuracy of turbulence models for lower stage cyclones used in suspension preheaters". *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(7), 1618-1629.
- Wasilewski, M. ve Brar, L. S. (2019). "Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators". *Separation and Purification Technology*, 213, 19-33.
- Wei, Q., Sun, G. ve Gao, C. (2020). "Numerical analysis of axial gas flow in cyclone separators with different wortex finder diameters and inlet dimensions". *Powder Technology*, 269, 321-333.
- Wilson, W. E. ve Suh, H. H. (1997). "Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies". *Journal of the Air and Waste Management Association*, 47(12), 1239-1249.
- Xiang, R. B. ve Lee, K. W. (2005). Numerical study of flow field in cyclones of different height, *Chemical Engineering and Processing*, 44, 877-883.
- Xie, B., Li, S., Jin, H., Hu, S., Wang, F. ve Zhou, F. (2018). "Analysis of the performance of a novel dust collector combining cyclone separator cartridge filter". *Powder Technology*, 339, 695-701.
- Yang, J., Sun, G. ve Zhan, M. (2015). Prediction of the maximum-efficiency inlet velocity in cyclones, *Powder Technology*, 286, 124-131.
- Yao, Y., Huang, W., Wu, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Yang, H. ve Lyu, J. (2021). "Effects of the inlet duct length on the flow field and performance of a cyclone separator with a contracted inlet duct". *Powder Technology*, 393, 12-22.
- Yetilmezsoy, K. (2005). "Optimisation using prediction models: air cyclones' body diameter/pressure drop". *Filtration & Seperation*, 42(10), 32-35.
- Yetilmezsoy, K. (2006). "Determination of optimum body diameter of air cyclones using a new empirical model and a neural network approach". *Environmental Engineering Science*, 23(4), 680-690.
- Zencirci, S. A. ve Işıklı, B. (2017). "Hava Kirliliği". *Türk Dünyası Uygulama Ve Araştırma Merkezi Halk Sağlığı Dergisi*, 2(2), 24-36.
- Zhang, G., Chen, G. ve Yan, X. (2018). "Evaluation and improvement of particle collection efficiency and pressure drop of cyclones by redistribution of dustbins". *Chemical Engineering Research and Design*, 139, 52-61.
- Zhao, B. ve Su, Y. (2018). "Particle size cut performance of aerodynamic cyclone separators: Generalized modeling and characterization by correlating global cyclone dimensions". *Journal of Aerosol Science*, 120, 1-11.
- Zhao, B. ve Zhang, J. (2006). "Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double

configuration". *Chemical Engineering Research and Design*, 84(A12), 1158-1165.

Zhou, F., Sun, G., Han, X., Zhang, Y. ve Bi, W. (2018). "Experimental and CFD study on effects of spiral guide vanes on cyclone performance". *Advanced Powder Technology*, 29, 3394-3403.

Zhou, H., Hu, Z., Zhang, Q., Wang, Q. ve Lv, X. (2019). "Numerical study on gas-solid flow characteristics of ultra-light particles in a cyclone separator". *Powder Technology*, 344, 784-796.

Makale

1. Karadeniz, A. ve Demir, S. (2021). “Experimental Investigation of the Effects of Helical Roof on the Performance of Stairmand High Efficiency Cyclone”. *International Journal of Chemical Engineering*, 21, Article ID 7207994.