

Siklon Tasarımına İlişkin Teorik Çalışma

Numan Yürek

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2018

Theoretical Study of Cyclone Design

Numan Yürek

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

Sept. 2018

Siklon Tasarımına İlişkin Teorik Çalışma

Numan Yürek

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Yaşar Pancar

Eylül 2018

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Numan Yürek'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Siklon Tasarımına İlişkin Teorik Çalışma" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar Pancar

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Yaşar Pancar

Üye : Prof. Dr. Nejat Kıraç

Üye : Doç. Dr. Dilek Turan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, **Prof. Dr. Yaşar Pancar** danışmanlığında hazırlamış olduğum “Siklon Tasarımına İlişkin Teorik Çalışma” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 05.09.2018

Numan Yürek

İmza

ÖZET

Partikül kontrolünü teminen bir siklon sistemi tasarımı için, siklon performansının doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, siklon basınç düşümü, dönüş sayısı ve dolaşım mesafesinin hesaplanması için yeni teorik yöntemler geliştirilmiştir. Akış profili ve siklon boyutları, bir siklon içindeki dolaşım mesafesini belirler. Dönüş sayısı, söz konusu dolaşım mesafesine bağlı olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre basınç düşümü, siklon çapı ile değil, giriş hızına göre farklılık göstermektedir.

Siklon dış girdabındaki partikül hareketi, kuvvet dengesi denklemini oluşturmak için analiz edilmiştir. Barth' ın "statik partikül" teorisine göre, partiküle etki eden kuvvetler dengelendiğinde, siklonun dış girdabındaki kesme noktası ve toplama olasılığı dağılımı modelleri, teorik analizlerde kuvvet dengesi denklemi ile birleştirildiğinde partikül (d_{50} çap ile) toplama olasılığı %50 olmaktadır. Siklonun toplama verimi ve siklonun genel veriminin teorik hesaplamalarıyla, farklı tozlar için farklı siklon kesme noktalarına rastlanmıştır.

Rastlanılan ve teorik kesme noktalarından regresyon uygunluğu yolu ile, 1D3D ve 2D2D siklonları için kesme noktası düzeltme modelleri geliştirilmiştir. Regresyon sonuçları, kesme noktalarının, partikül boyut dağılımının (PBD) geometrik standart sapmasına (GSS) nazaran kütleli medyan çapına (KMÇ) daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Söz konusu araştırmada geliştirilen teorik genel verim modeli, düzeltilmiş d_{50} ve PBD ile siklon toplam veriminin ölçülmesinde kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Basınç düşümü, dönüş sayısı, dolaşım mesafesi, siklon verimi, siklon tasarımı

SUMMARY

To design a cyclone abatement system for particulate control, it is necessary to estimate cyclone performance accurately. In this study, new theoretical methods for computing travel distance, numbers of turns and cyclone pressure drop have been developed. The flow pattern and cyclone dimensions determine the travel distance in a cyclone. The number of turns was calculated based on this travel distance. The results show that cyclone pressure drop varies with the inlet velocity, but not with cyclone diameter.

Particle motion in the cyclone outer vortex was analyzed to establish a force balance differential equation. Barth's "static particle" theory, particle (with diameter of d_{50}) collection probability is 50% when the forces acting on it are balanced, combined with the force balance equation was applied in the theoretical analyses for the models of cyclone cut-point and collection probability distribution in the cyclone outer vortex. Cyclone cut-points for different dusts were traced from measured cyclone overall collection efficiencies and the theoretical model for calculating cyclone overall efficiency.

The cut-point correction models (K) for 1D3D and 2D2D cyclones were developed through regression fit from traced and theoretical cut-points. The regression results indicate that cut-points are more sensitive to mass median diameter (MMD) than to geometric standard deviation (GSD) of particle size distribution (PSD). The theoretical overall efficiency model developed in this research can be used for cyclone total efficiency calculation with the corrected d_{50} and PSD.

Keywords: Pressure drop, number of turns, travel distance, cyclone efficiency, cyclone design

TEŞEKKÜR

Öncelikle, en büyük minnettarlığım, araştırmam boyunca beni yönlendiren, bilgi ve tecrübesini koşulsuzca sunan danışmanım Prof. Dr. Yaşar Pancar içindir. İçtenlikle söylemek isterim ki, bir danışmandan daha fazlasını ifade ediyorsunuz – örnek aldığım bir model ve özel bir arkadaşınız. Sizin rehberliğiniz, destek ve teşvikiniz olmadan, bu araştırmayı başarabilmem mümkün değildi.

Hayat arkadaşım, eşim Leyla Yürek, bana inandığın ve ne zaman ihtiyacım olsa elini uzattığın için teşekkürler. Olumlu tutumun benim için gerçek bir ilham kaynağı oldu. Sevgin ve desteğin, her zaman dünyamı anlamlı ve renkli hale dönüştürdü.

En özel teşekkürlerimi beni yetiştiren ailem – annem, babam, ve abime, tüm “iniş ve çıkışlarımda” göstermiş olduğunuz sessiz destek ve sabır için sizlere iletiyorum. Desteğiniz ve teşvikiniz olmasaydı, kanatlarımı yükseklerle açamazdım.

Henüz bir adı olmayan sevgili kızım, meleğim, gücümün kaynağı olduğun için teşekkürler. Hayatımdaki en büyük lütufsun.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
2.1 Klasik Siklon Tasarımı	5
2.1.1. Verimli dönüş sayısı (N_e)	5
2.1.2. Kesme noktası (d_{50})	6
2.1.3. Kesirsel verim eğrisi (η_j)	7
2.1.4. Genel verim (η_o)	8
2.1.5. Basınç düşümü (ΔP)	8
2.2. Teksas Siklon Tasarım Süreci	9
2.2.1. Basınç düşümü	10
2.3. Kesirsel Verim Eğrisi	10
3. YÖNTEM	11
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	12
4.1 Dönüş Sayısı	12
4.1.1. Dış girdapta akış profili	14
4.1.1.1. <u>Teğetsel hız (V_t)</u>	15
4.1.1.2. <u>Eksenel hız (V_z)</u>	18
4.1.1.3. <u>Radyal hız (V_r)</u>	20
4.1.2. Hava akışı dolaşım mesafesi	21
4.1.2.1. <u>Gövde bölümünde dolaşım mesafesi (L_1)</u>	21
4.1.2.2. <u>Koni bölümünde dolaşım mesafesi (L_2)</u>	21

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.3. Verimli dönüş sayısı.....	23
4.2. Siklonlarda Basınç Düşümü.....	24
4.2.1. Basınç düşümüne ilişkin teorik analizler	24
4.2.1.1. <u>Siklon giriş basınç düşümü (ΔP_c)</u>	25
4.2.1.2. <u>Kinetik enerji kaybı sonucu basınç düşümü (ΔP_k)</u>	25
4.2.1.3. <u>Dış girdapta sürtünme basınç düşümü (ΔP_f)</u>	25
4.2.1.4. <u>Dönel alan nedeniyle basınç düşümü (ΔP_r)</u>	29
4.2.1.5. <u>İç girdap ve çıkış borusunda basınç düşümü (ΔP_o)</u>	30
4.2.1.6. <u>Siklon toplam basınç kaybı (ΔP_{toplam})</u>	30
4.2.1.7. <u>Siklon basınç düşümü öngörüsü</u>	30
4.3. Siklon Toplama Verimi	35
4.3.1. Dış girdapta partikül toplama mekanizması.....	36
4.3.1.1. <u>Dış girdapta partikül hareketleri</u>	37
4.3.1.2. <u>Kuvvet dengesi diferansiyel denklemi</u>	40
4.3.1.3. <u>Dış girdap partikül kritik yörüngesi</u>	41
4.3.1.4. <u>Dış girdap partikül dağılımı</u>	42
4.3.1.5. <u>Dış girdapta partikül toplama olasılık dağılımı</u>	43
4.3.2. Siklon kesme noktası için teorik model (d_{50}).....	44
4.3.3. Siklon genel verimi üzerine teorik model	44
4.3.4. Gözlemlenen kesim noktası	44
4.3.5. Partikül boyut dağılımı için düzeltilen d_{50} modeli.....	46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR DİZİNİ	55
EK AÇIKLAMALAR	57
Ek Açıklamalar – A : Koni Bölümüne Dair Dolaşım Mesafesi Hesapları	58
Ek Açıklamalar – B : Koni Bölümüne Dair Sürtünme Basınç Düşümü Hesapları	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Siklon yapısı: a) bölümleri ve girdap yönleri, b) yıldız besleyici	2
2.2. Tarım işleme endüstrisinde en çok kullanılan siklon tasarımlarının genel ölçüleri: a) 1D3D siklon tasarımı, b) 2D2D siklon tasarımı	3
2.3. 1D2D siklonların genel ölçüleri	4
2.4. Kesirsel verim eğrisi özellikleri	10
3.1 Bulguları elde etmek için izlenen yöntem süreci	11
4.1. Siklon gövde bölümünde teğetsel hız dağılımı	13
4.2. Arayüz (D_o) ve verimli uzunluk (Z_o) boyutları	14
4.3. Hava akışı birim kontrol hacminde (I) kuvvet denge şeması	15
4.4. Siklon koni boyutları	19
4.5. Dış girdaptaki hava akışına dair sanal spiral boru	26
4.6. Dış girdaptaki hava akışı ve partikül yörüngesi	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Verimli dönüş sayısı (N_e)	6
2.2. Genel verim	8
4.1. Hava akışı dolaşım mesafesi ve verimli dönüş sayısı	23
4.2. Sürtünme basınç düşümü hesaplaması için sürtünme faktörleri	27
4.3. $V_{in} = 16$ m/s ile 1D3D için tahmini basınç düşümü	31
4.4. $D_c = 0.2$ m ile 1D3D için tahmini basınç düşümü	31
4.5. $D_c = 0.9$ m ile 1D3D için tahmini basınç düşümü	32
4.6. $V_{in} = 15$ m/s ile 2D2D için tahmini basınç düşümü	32
4.7. $D_c = 0.2$ m ile 2D2D için tahmini basınç düşümü	33
4.8. $D_c = 0.9$ m ile 2D2D için tahmini basınç düşümü	33
4.9. $V_{in} = 12$ m/s ile 1D2D için tahmini basınç düşümü	34
4.10. $D_c = 0.2$ m ile 1D2D için tahmini basınç düşümü	34
4.11. $D_c = 0.9$ m ile 1D2D için tahmini basınç düşümü	35
4.12. 1D3D ve 2D2D siklonlar için PBD ve ölçülmüş verimden izlenen kesme noktaları (d_{50})	45
4.13. Deneysel kesme noktaları ile izlenen kesme noktalarının karşılaştırması	46
4.14. Teorik modelden elde edilen kesme noktaları ve izlenen kesme noktaları karşılaştırması	47
4.15. Farklı tozlar ile 1D3D ve 2D2D siklonlar için kesme noktası düzeltme faktörü	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar (Birim)</u>
a	Partikül ivmesi (m/s^2)
a_r	Partikül radyal ivmesi (m/s^2)
a_t	Partikül teğetel ivmesi (m/s^2)
A_p	Kontrol hacmi I yüzey alanı
A_z	Eksenel yönünde Z koordinatında
C_1	Sabit 1
C_2	Sabit 2
C_3	Sabit 3
C_4	Sabit 4
C_5	Sabit 5 = 1
C_6	Sabit 6 = 1.8
D	Boru çapı
$d_{15.9}$	%15.9 verim ile toplanan partikül çapı
d_{50}	%50 verim ile toplanan partikül çapı (d_{pc})
$d_{84.1}$	%84.1 verim ile toplanan partikül çapı
D_c	Siklon çapı (m)
D_e	Çıkış borusu çapı (m)
D_o	(1) arayüz çapı (m)
d_p	Partikül çapı (μm)
D_s	Dış girdapta eşdeğer akış çapı (m)
D_{s1}	Gövdede eşdeğer akış çapı (m)
D_{s2}	Konide eşdeğer akış çapı (m)
$d\phi$	Kontrol hacmi I'de kapsanan açı
f	Sürtünme basınç kaybı için kesirsel faktörü
F_c	Merkezkaç kuvveti (N)
F_C	Partikül üzerinde rol oynayan merkezkaç kuvveti (N)
F_D	Partikül radyal hareketine karşı sürüklenme kuvveti (N)
F_{DG}	Yerçekimine karşı sürüklenme sürüklenme kuvveti (N)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar (Birim)</u>
F_G	Yerçekimi kuvveti (N)
F_p	Kontrol hacmi yüzeyindeki basınç kuvveti (N)
$F(d)$	Kümülatif partikül ebatı (%)
ΣF	Toplam kuvvet (N)
h	Kontrol hacmi I yüksekliği (m)
H	Siklon giriş borusu yüksekliği (m)
H_c	Siklon giriş borusu yüksekliği (m)
H_v	Giriş hızı düşüsü (m)
K	1-Siklon basınç düşüm sabiti, 2- Kesme noktası düzeltme faktörü
K_{1D3D}	Kesme noktası düzeltme faktörü (1D3D siklon için)
K_{2D2D}	Kesme noktası düzeltme faktörü (2D2D siklon için)
L	Dış girdap hava akışı dolaşım mesafesi (m)
L_1	Gövde bölümü hava akışı dolaşım mesafesi (m)
L_2	Koni bölümü hava akışı dolaşım mesafesi (m)
L_c	Siklon uzunluğu (m)
m_p	Partikül kütlesi (kg)
n	Akış profil faktörü
N_e	Verimli dönüş sayısı
N_{e1}	Gövde bölümü verimli dönüş sayısı
N_{e2}	Koni bölümü verimli dönüş sayısı
P	Basınç (Pa)
$P(d)$	Partikül toplama olasılık dağılımı
ΔP	Siklon basınç düşümü (Pa)
ΔP_f	Dış girdap sürtünme basınç düşümü (Pa)
ΔP_{f1}	Dış girdap gövde bölümü sürtünme basınç düşümü (Pa)
ΔP_{f2}	Dış girdap koni bölümü sürtünme basınç düşümü (Pa)
ΔP_e	Siklon giriş basınç düşümü (Pa)
ΔP_k	Kinetik basınç düşümü (Pa)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar (Birim)</u>
ΔP_o	İç girdap ve çıkış borusu basınç kaybı (Pa)
ΔP_r	Dönel basınç kaybı (Pa)
Q	Sistemdeki hava akış oranı (m^3/s)
Q_{in}	Giriş hava akış oranı (m^3/s)
Q_s	Standart hava akış oranı (m^3/s)
r	Dış girdap alanında radyal konum (m)
R	Siklon yarı çapı (m)
\vec{R}	Yarıçap birim vektörü
Re	Reynolds sayısı
r_o	Ara yüzey yarı çapı (m)
$r_p(z)$	Partikül radyal yörüngesi
\vec{T}	Teğetsel birim vektörü
t_1	Gövdede hava akış dolaşım zamanı (s)
t_2	Konide hava akış dolaşım zamanı (s)
V	Boruda sıvı hızı (m/s)
V_1	Gövde bölümünde toplam ortalama gaz hızı (m/s)
V_2	Koni bölümünde toplam ortalama gaz hızı (m/s)
V_i	Gaz giriş hızı (m/s)
V_{gr}	Gaz radyal hızı (m/s)
V_{in}	Siklon giriş hızı (m/s)
\vec{V}_p	Partikül hız vektörü (m/s)
V_{pr}	Partikül radyal hızı (m/s)
V_{pz}	Partikül aksenal hızı (m/s)
V_{r2}	Koni bölümünde gaz radyal hızı (m/s)
V_{r21}	1D2D koni bölümü 1.alanda gaz radyal hızı (m/s)
V_{r22}	1D2D koni bölümü 2.alanda gaz radyal hızı (m/s)
V_{s1}	Gövde bölümünde hava akış hızı (m/s)
V_{s2}	Koni bölümünde hava akış hızı (m/s)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar (Birim)</u>
V_t	Gaz teğetsel hızı (m/s)
V_{t1}	Gövde bölümünde gaz teğetsel hızı (m/s)
V_{t2}	Koni bölümünde gaz teğetsel hızı (m/s)
V_{TS}	Partikül terminal kurulum hızı (m/s)
V_{z1}	Gövdede gaz eksenel hız (m/s)
V_{z2}	Konide gaz eksenel hız (m/s)
V_{z21}	1D2D koni bölümü alan 1'de gaz eksenel hız (m/s)
V_{z22}	1D2D koni bölümü alan 2'de gaz eksenel hız (m/s)
V_{Pi}	Giriş hız basıncı (N/m^2 ya da Pa)
V_{Pin}	Siklon giriş hız basıncı (N/m^2 veya Pa)
V_{Po}	Çıkış hız basıncı (N/m^2 veya Pa)
V_{Pout}	Siklon çıkış hız basıncı (N/m^2 veya Pa)
V_{Ps}	Dış girdapta t zamanında hava akış hızı basıncı (Pa)
V_{Ps1}	Dış girdap gövde bölümünde t zamanında hava akış hızı basıncı (Pa)
V_{Ps2}	Dış girdap koni bölümünde t zamanında hava akış hızı basıncı (Pa)
W	Siklon giriş borusu genişliği (m)
Z	Dış girdap eksenel pozisyonu (m)
Z_1	Gövde yüksekliği (m)
Z_c	Siklon koni uzunluğu (m)
Z_o	Verimli uzunluk (m)
Z_{o2}	Koni bölümü siklon verimli uzunluğu (m)
Z_p	Partikül eksen konumu (m)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Yunan harfleri

η_o	Genel toplama verim (%)
η_j	J. partikül boyut sıralamasında toplama verim (%)
θ	Siklon koni açısı
μ	Gaz akma direnci (kg/m-s)
ρ	Sıvı yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_g	Gaz yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_p	Partikül yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_s	Standart hava yoğunluğu (kg/m ³)
τ	Partikül dinlenme süresi (s)
ω	Açısal hız

Kısaltmalar

AEÇ	Aerodinamik eşdeğer çap
EKÇ	Eşdeğer küresel çap
KVE	Kesirsel verim eğrisi
GSS	Geometrik standart sapma
KMÇ	Kütle medyan çapı
PM	Partikül maddesi
PBD	Partikül boyut dağılımı
cm	Santimetre
kg	Kilogram
m	Metre
m ²	Metre kare
m ³	Metre küp
N	Newton
Pa	Pascal
s	Saniye

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüze kadar, siklon tasarımı alanında çok araştırmalar yapılmıştır. Mekanik ayırıştırma metotlarından biri olarak kullanılan siklonlar, katı-sıvı, katı-gaz, karışmaz sıvı ve sıvı-gaz heterojen karışımları ve farklı boyutlardaki katıları birbirinden ayırmak için kullanılır. Bunların yanı sıra siklonlar endüstride en çok kullanılan toz tutma aparatları olarak bilinirler ve işletme ve yatırım masrafları düşünöldüğünde, en düşük maliyetli olan sistemler olarak tanınırlar.

İletilen malzeme siklonda merkezkaç kuvvetin yardımıyla hava akımından ayırşarak siklonda toplanır. Merkezkaç kuvveti spiral akımla ortaya çıkar. Bilindiğı üzere bir kaptan boşalan her türlü sıvı daima girdap depresyonu oluşturma eğilimindedir. Potansiyel girdap içerisinde, diğerk akımların aksine uçuşmakta olan elementler birbirine engel olmazlar. Bu nedenle akışkanın ve iletilen malzemenin siklona teğetsel olarak girmesi ile kararlı bir spiral akım meydana gelir.

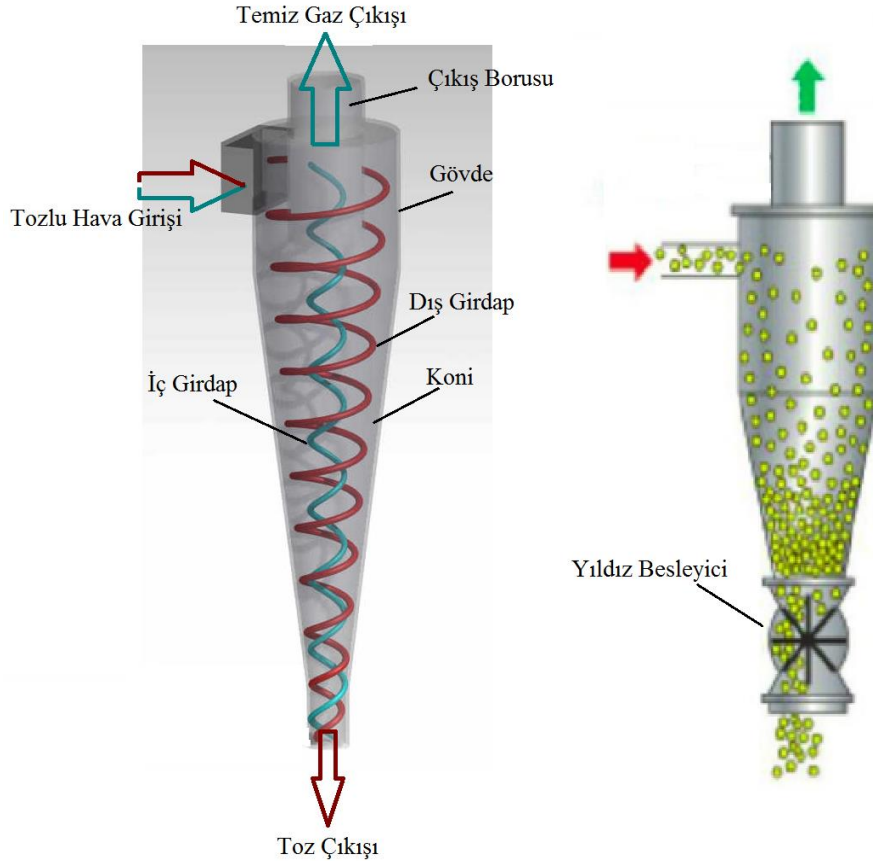
Sıvılar için tasarlanan siklonlara hidrosiklonlar, hidrolik siklonlar veya hidrolik kolonlar da denir. Siklonlarda kullanılan basit ayırşma prensibi doğrudan santrifüj sedimentasyonudur. Bu işlemdede askıdaki partiköller, santrifüj ivmelenmeye tabi olur ve bu ivmelenme partiköllerin sıvıdan ayırşmasını sağlar. Siklonlarda santrifüjlerde olduğı gibi hareketli parça yoktur ve gerekli girdap hareketi sıvı tarafından üretilmektedir.

Söz konusu araştırmanın amacı, teorik veriler ile mühendislik tasarımını kolaylaştırmak için bir siklonun tasarımına dair elverişli bir bilimsel tanım geliştirmektir. Amaç, aşağıdaki modellerin geliştirilmesi suretiyle gerçekteştirilmiştir:

- Dönüş sayısı için matematiksel model.
- Siklon basınç düşümü tahminlemesi için teorik model.
- Siklon toplama verimi tahminlemesi için teorik model.

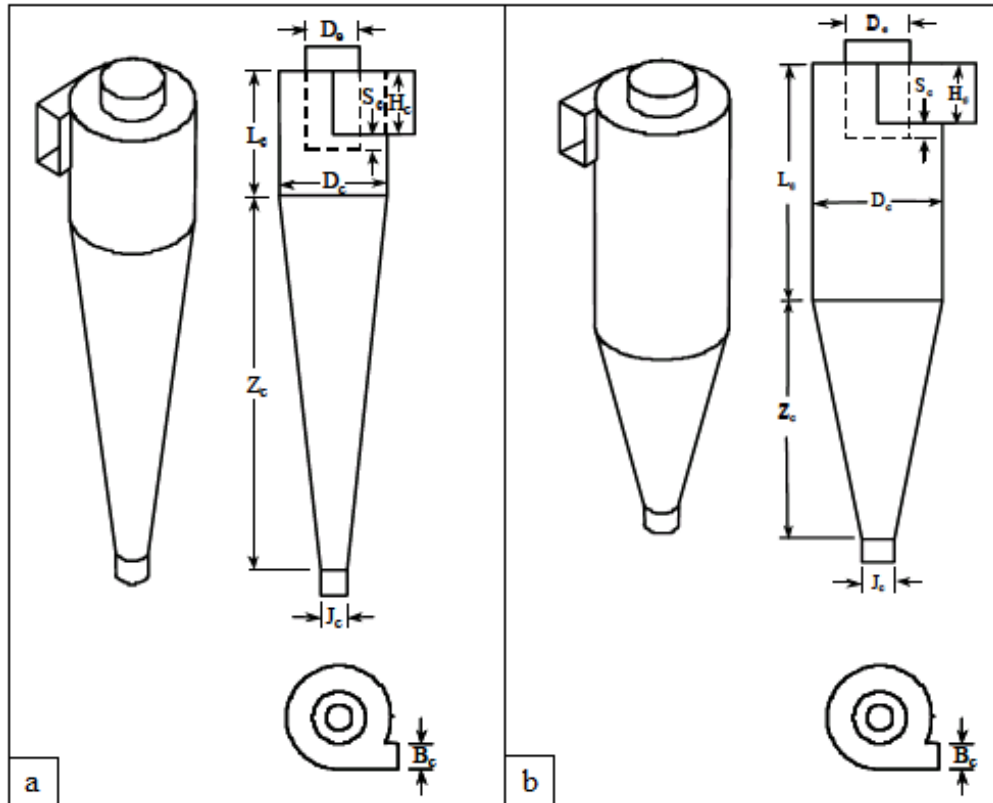
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Siklonlar, partiküller içeren bir akışkandan, partiküllerin ayrıştırılmasını sağlayan düşük maliyet ve düşük bakım gerektiren sistemlerdir. Genel olarak, bir siklon, gövde olarak adlandırılan üst silindirik kısım ve koni olarak adlandırılan alt konik kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.1a). Hava akışı, gövdenin üst kısmından teğetsel olarak girer ve bir dış girdap oluşturarak koninin içinde aşağı doğru ilerler. Dış girdapta artan hava hızı, partiküller üzerinde merkezkaç bir kuvvet oluşturarak partikülleri hava akışından ayırır. Hava akışı koninin tabanında bulunan yıldız besleyici (Şekil 2.1b) yakınlarna ulaştığı zaman, yönünü değiştirir ve bir iç girdap oluşturarak temiz hava olarak üstten dışarı çıkar. Partiküller ise genelde siklonun tabanına bağlı olan toz toplama haznesine düşerek burada birikir ve ayrışma bu şekilde gerçekleşir.



Şekil 2.1. Siklon yapısı: a) bölümleri ve girdap yönleri, b) yıldız besleyici (Anonim, 2015)

Tarım endüstrisinde, 2D2D (Shepherd ve Lapple, 1939) ve 1D3D (Parnell ve Davis, 1979) siklon tasarımları, partikül madde kontrolü için en çok kullanılan ayırıştırma araçlarıdır. Siklon tasarımlarında D , siklonun gövde çapına işaret etmektedir. D 'nin önünde yer alan sayılar, sırasıyla, gövde ve koni bölümlerinin uzunluklarını ifade eder. Bir 1D3D siklon, gövde çapının üç katı uzunlukta bir koni ve kendi çapına eşit uzunlukta bir silindirik gövdeden oluşur. Buna göre 2D2D siklonlar gövde çapının iki katı uzunlukta bir silindirik gövdeden ve aynı boyutta bir konik alt kısımdan oluşur. İki siklon tasarımına ilişkin şekiller, Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Önceki araştırma (Wang, 2000) göstermektedir ki; diğer siklon tasarımları ile kıyaslandığında, 1D3D ve 2D2D ince toz için en etkili siklon toplayıcılarıdır (100 μm altında partikül çapı).



$$\begin{aligned} B_c &= D_c/4 \\ D_c &= D_c/2 \\ H_c &= D_c/2 \\ Z_c &= 3*D_c \end{aligned}$$

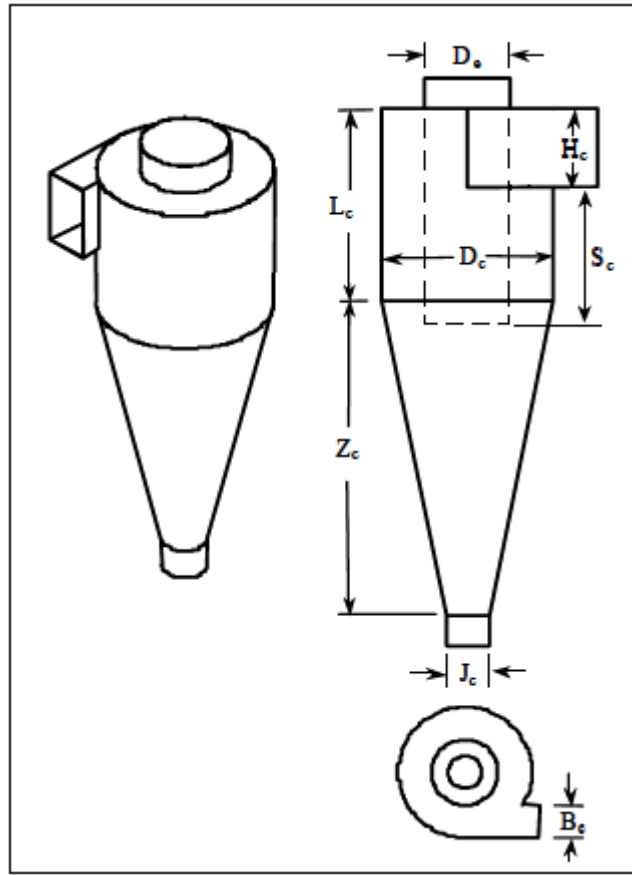
$$\begin{aligned} J_c &= D_c/4 \\ S_c &= D_c/8 \\ L_c &= 1*D_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_c &= D_c/4 \\ D_c &= D_c/2 \\ H_c &= D_c/2 \\ Z_c &= 2*D_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_c &= D_c/4 \\ S_c &= D_c/8 \\ L_c &= 2*D_c \end{aligned}$$

Şekil 2.2 Tarım işleme endüstrisinde en çok kullanılan siklon tasarımlarının genel ölçüleri: a) 1D3D siklon tasarımı, b) 2D2D siklon tasarımı (Wang, 2000)

Mihalski vd. (1993), sisteme giriş yapan hava akımındaki partikül maddelerin (PM) iplik lifi içerdiği durumlarda, 1D3D ve 2D2D siklon tasarımlarının atık çıkışı yakınlarında dönen tiftik yumaklarının oluştuğunu gözlemlemiştir. Mihalski, bu yumakların normalde atık çıkışından çıkması beklenen ince PM' lerin, temiz hava akışına karışıp siklonu üst çıkış noktasından terk etmesine neden olduğunu ortaya koymuştur. Bunun üzerine Simpson ve Parnell (1995), pamuk işleme sektörüne dönen tiftik problemini çözmek için 1D2D adında yeni bir düşük basınçlı siklon modelini sunmuştur. Bu sayede 1D2D siklonlarının, yüksek lif içerikli akışlar için, 1D3D ve 2D2D siklon tasarımlarına göre daha iyi bir tasarım olduğu görülmektedir. Şekil 2.3' te 1D2D siklon tasarımı gösterilmiştir.



$$\begin{aligned}
 B_c &= D_c/4 & J_c &= D_c/2 \\
 D_e &= D_c/1.6 & S_c &= 5D_c/8 \\
 H_c &= D_c/2 & L_c &= 1 * D_c \\
 Z_c &= 2 * D_c
 \end{aligned}$$

Şekil 2.3. 1D2D siklonların genel ölçüleri (Wang, 2000)

2.1 Klasik Siklon Tasarımı

Bu tasarım, 1950' lerin başında Lapple tarafından geliştirilmiştir. Lapple Modeli olarak da bilinen bu tasarım, bazı mühendisler tarafından standart bir metot olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte bu tasarım prosedürüyle ilgili bir takım problemler vardır. Öncelikle, Lapple Modeli, siklon boyutlarının geliştirilmesinde siklon giriş hızını dikkate almamaktadır. Parnell (1996) tarafından, optimum siklon performansı için farklı siklon tasarımlarında "ideal" bir giriş hızının olduğu belirtilmiştir. İkinci olarak, Lapple Modeli farklı tip siklonlar için doğru dönüş sayısını öngörememektedir. Klasik siklon tasarımı süreci ile ortaya koyulan hatalı kesirsel verim eğrisi nedeniyle, ön görülen toplam verim doğru sonuç vermemektedir (Kaspar, 1993).

Klasik siklon tasarımı sürecini kullanmak için, tasarım mühendisinin; (1) akış koşulları, (2) partikül madde (PM) yoğunluğu ile partikül boyutu dağılımı (PBD) ve (3) tasarlanacak siklonun tipi (yüksek verim, konvansiyonel ya da yüksek üretim) bilgilerine sahip olduğu varsayılır. PBD, PM' nin kütesinin eş değer aerodinamik çapına oranı şeklinde olmalıdır. Siklon tipi, siklonun gövde çapının (D) bir fonksiyonu olarak tüm temel ölçülerini sağlayacaktır. Verilen bu bilgilerle klasik siklon tasarımı süreci aşağıdaki başlıklarla anlatıldığı gibidir.

2.1.1. Verimli dönüş sayısı (N_e)

Klasik siklon tasarımı sürecinin ilk adımı, verimli dönüş sayısını hesaplamaktır. Bir siklonda verimli dönüş sayısı, havanın dönerek siklon dış girdabından geçtiği devir sayısıdır. Dönüş sayısı daha yüksek olan hava akımlarında, daha fazla verim elde edilir. Lapple modeli için N_e hesabı aşağıdaki gibidir;

$$N_e = \frac{1}{H_c} \left(L_c + \frac{Z_c}{2} \right) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)' e göre, 4 siklon tasarımı için öngörülen dönüş sayısı hesaplanmış ve Çizelge 2.1'de listelenmiştir. Çizelge 2.1' deki, 1D2D, 2D2D, ve 1D3D siklonları, Şekil 2.2 ve 2.3'te gösterilen siklon tasarımlardır. Söz konusu üç siklon tasarımı, 2D2D

siklonunda belirtilen aynı giriş ölçülerine (H_c ve B_c) sahiptir. 1D3Dt siklonu ise, giriş ölçüleri dışında Şekil 2.2' de yer alan 1D3D siklonlar ile aynı tasarıma sahip, geleneksel bir 1D3D siklon tasarımıdır. 1D3Dt siklonu, gövde çapına eşit bir giriş yüksekliğine sahiptir. ($H_c = D_c$) ve gövde çapının 1/8 giriş enindedir ($B_c = D_c/8$). Çizelge 2.1, tahmini ve gözlemlenen N_e karşılaştırmasını vermektedir. Lapple modelinin N_e için, 2D2D siklon tasarımında mükemmel bir dönüş sayısı öngördüğü görülmektedir. Bununla birlikte, bu model (Denklem 2.1), 2D2D tasarımı dışındaki siklon tasarımları için doğru bir N_e öngörüsü gerçekleştirememektedir. Söz konusu gözlem, verimli dönüş sayısının doğru hesaplanmasında, Lapple modelinin sınırlı olduğunu göstermektedir. N_e modeli, yalnızca, aslen Shepherd ve Lapple (1939) tarafından geliştirilen 2D2D siklon tasarımları için geçerlidir.

Çizelge 2.1 Verimli dönüş sayısı (N_e) (Wang, 2000)

Siklon	Lapple	Gözlenen
1D2D	4	N/A
2D2D	6	6
1D3D	5	6
1D3Dt	2.5	6

2.1.2. Kesme noktası (d_{50})

Klasik siklon tasarımı sürecine ilişkin ikinci adım, kesme noktası çapının hesaplanmasıdır. Bir siklonun kesme noktası, %50 verim ile toplanan partikülün aerodinamik eşdeğer çapıdır (AEC). Kesme noktası arttıkça, partikül toplama verimliliği düşmektedir. Lapple modelinde kesme noktası (d_{50}), güç dengesi teorisine dayalı olarak geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibidir;

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Söz konusu kesme noktası modelinin geliştirilme sürecinde, partikül terminal hızının, karşı sürüklenme kuvvetinin merkezkaç kuvvetine eşitlendiği zaman elde edildiği varsayılmakta ve her bir partikülde yer alan sürüklenme kuvveti, Stokes kanunu tarafından belirlenmektedir.

Sonuç olarak, Lapple modelinde belirlenen kesme noktası (d_{pc} , ya da d_{50}) (Denklem 2.2), eşdeğer bir küresel çaptır (EKÇ) veya bir diğer ifade ile, Stokes çapıdır. Aşağıda yer alan denklem, küresel partiküller için EKÇ' nin AEC' ye çevrilmesi için kullanılabilir;

$$AEC = EKÇ \sqrt{\rho_p} \quad (2.3)$$

$\rho_p \gg \rho_g$ iken, $(\rho_p - \rho_g) \approx \rho_p$ dir. Denklem (2.2) ve (2.3)'e birlikte bakıldığında formül şu şekilde düşünülebilir;

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4), AEC' de kesme noktası için Lapple modelidir. Bu model, kesme noktasının PM giriş özelliklerinden tamamen bağımsız olduğunu gösterir. Ancak, Wang vd. (2000) siklon kesirsel verim eğrisinin, partikül boyut dağılımından önemli derecede etkilendiğini ortaya koymuştur. PBD' nin değişimine bağlı olarak değiştiği ve Lapple modeli için, partiküllerinin karakteristiğine göre değiştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

2.1.3. Kesirsel verim eğrisi (η_j)

Klasik siklon tasarımının üçüncü adımı kesirsel verimin belirlenmesidir. Kesme noktasına bağlı olarak, herhangi büyüklükte bir partikülün toplama veriminin tahmini için Lapple, deneysel bir model geliştirmiştir (Denklem 2.5). Bu aynı zamanda kesirsel verim eğrisi olarak da bilinir.

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(d_{pc} \sqrt{d_{pj}} \right)^2} \quad (2.5)$$

2.1.4. Genel verim (η_0)

Eğer giriş maddesinin boyutsal dağılımı bilinirse, siklon kesirsel verimine dayalı olarak bir siklonun genel toplama verimi hesaplanabilir. Bir siklonun genel toplama verimi, farklı boyutsal dağılımların toplama verimlerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Şu şekilde ifade edilebilir;

$$\eta_0 = \sum \eta_j m_j \quad (2.6)$$

Çizelge 2.2' de Lapple modeli ile hesaplanmış ve Wang ve arkadaşları tarafından deneysel olarak ölçülen siklon genel verimleri görülmektedir. Çizelge 2.2' deki bu karşılaştırma, Lappel modelinin siklon toplama verimini tam olarak doğru öngöremediğini göstermektedir. Sonuç olarak, Lapple modelinin kesirsel verim eğrisi hesabında (Denklem 2.5) kesin sonuç vermesi için düzeltilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.2. Genel verim (Wang, 2000)

Siklon	Lapple Modeli	Ölçülen (Wang vd. 2000)
1D2D	% 78.9	% 95
2D2D	% 86.6	% 96
1D3D	% 85.2	% 97

2.1.5. Basınç düşümü (ΔP)

Siklon tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer önemli parametre ise siklon basınç düşümüdür. Lapple yaklaşımına göre basınç düşümü hesaplaması iki aşamadan oluşur. İlk aşama, Denklem (2.7) yardımıyla giriş hızı düşüsündeki (H_v) basınç düşümünü hesaplamaktır. İkinci olarak da Denklem (2.8) yardımıyla giriş hızı düşüsünü statik basınç düşümüne (ΔP) çevirmektir.

$$H_v = K \frac{HW}{D_e^2} \quad (2.7)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g V_i^2 H_v \quad (2.8)$$

Ancak bu yaklaşım ile ilgili bir problem bulunmaktadır. “Lapple basınç düşümü denklemi, basınç düşümünü etkileyen dikey boyutları dikkate almamaktadır” (Leith ve Mehta, 1973). Bu durumda; siklon giriş-çıkış boyutları ve partikül giriş hızı aynı olan siklonların, uzun ya da kısa olmasına bakılmaksızın basınç düşüşleri aynı olacağı konusunda yanıltıcı olabilir. Aynı zamanda siklon veriminin, dikey boyutların artmasıyla artacağı düşünülmektedir. Lapple basınç düşümü modelindeki kusur ile, siklon basınç düşüşünden bağımsız olarak, siklon boyu ne kadar uzun olursa o kadar verimli olacağından siklon basınç düşüşünü tahmin edebilmek için yeni bir bilimsel yaklaşıma gerek duyulmaktadır.

2.2. Teksas Siklon Tasarım Süreci

Parnell (1996), klasik siklon tasarımı sürecini kullanarak siklonların tasarlanmasına ilişkin problemleri ele almış ve alternatif olarak Teksas siklon tasarımı sürecini ortaya koymuştur. Siklon tasarımına ilişkin bu yaklaşım, ilk olarak, farklı siklon tasarımları için en uygun giriş hızlarını belirlemiştir. 1D3D, 2D2D, ve 1D2D tasarımları için siklon giriş hızları, sırasıyla şu şekildedir; 16 m/s \pm 2 m/s, 15 m/s \pm 2 m/s, ve 12 m/s \pm 2 m/s. Söz konusu tasarım süreci, bir mühendise, istenilen siklon türüne özgü bir siklon giriş hızını kullanarak siklon tasarımına imkan tanımaktadır. Tasarım giriş hızlarının bilinmesi sayesinde, bir siklona ilişkin boyutlar kolayca belirlenebilecektir.

$$D_c = \sqrt{\frac{8Q}{V_i}} \quad (2.9)$$

2.2.1. Basınç düşümü

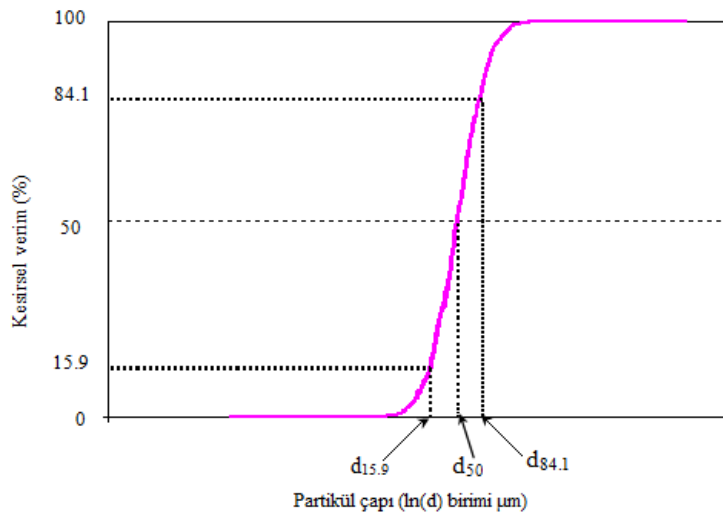
Texas siklon tasarım süreci, ayrıca, siklon basınç düşüm hesaplaması için, deneysel bir modeldir (Denklem 2.10). Söz konusu modelde, K , boyutsuz bir deneysel sabittir ve 1D3D, 2D2D ve 1D2D siklonları için, sırasıyla, 5.1, 4.7 ve 3.4'tür.

$$\Delta P = (P_0 + P_i)VK \quad (2.10)$$

Bu tasarım süreci, klasik siklon tasarımı prosedürü ile kıyaslandığında, daha basittir ve basınç düşümü öngörüsünde daha doğru sonuçlar sağlayabilir. Ancak Texas tasarım süreci, kesme noktası hesaplamasıyla kesirsel verim eğrisi hesaplamasını birleştirmemesi nedeniyle, siklon verimi ve emisyon yoğunluğu öngörüsünde kullanılamamaktadır.

2.3. Kesirsel Verim Eğrisi

Kesirsel verim eğrisi (KVE), verim yüzdesini, partikül çapı ile ilişkilendirerek, partikül boyut dağılımı (PBD) ve giriş-çıkış yoğunluklarını kapsayan test verileri elde edilmesini sağlamaktadır. Siklonun KVE'si, kesme noktası (d_{50}) ve siklonun KVE eğimi ile şekillenir (Şekil 2.4). Yukarıda belirtildiği üzere, bir siklona ilişkin kesme noktası, %50 verimlilik ile toplanan partikülün AEC'dir. KVE eğimi aşağıdaki şekilde hesaplanır;

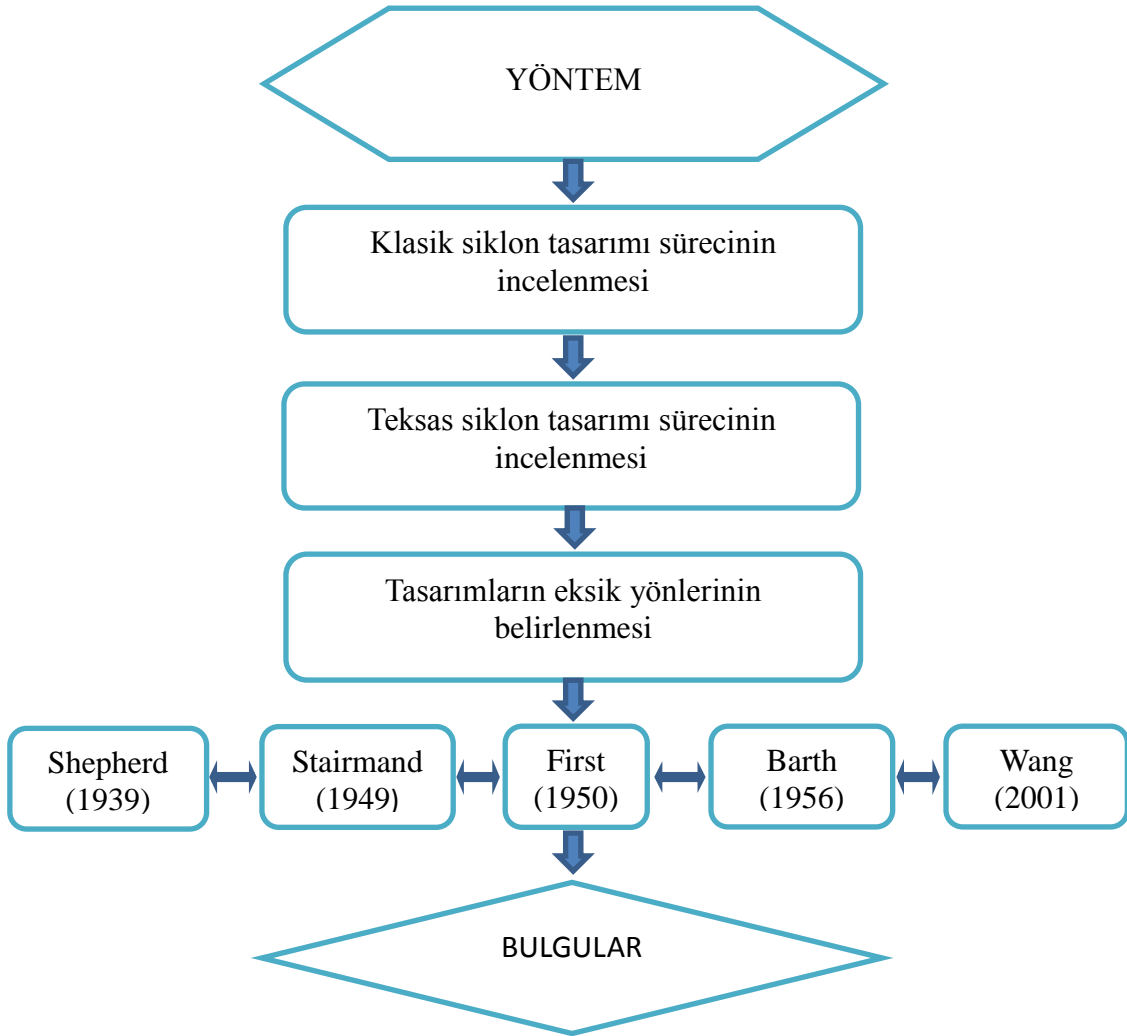


$$Eğim = \frac{d_{84.1}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{15.9}} \quad (2.11)$$

Şekil 2.4. Kesirsel verim eğrisi özellikleri (Wang, 2000)

3. YÖNTEM

İlk olarak, Lapple (1950) tarafından geliştirilen klasik siklon tasarımı süreci ele alınmıştır. Lapple modelindeki kusurlar nedeniyle, Parnell (1996) tarafından alternatif olarak geliştirilen Texas siklon tasarımı süreci incelenmiştir. Bu tasarımların eksik yönleri belirlenmiştir. Daha sonra Shepherd, Stairmand, First, Barth ve Wang gibi araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar ve deneyler incelenerek, siklon tasarımı için gerekli olan; dönüş sayısı, basınç düşümü ve siklon toplama verimi başlıklarında yeni teorik modeller geliştirilmiştir.



Şekil 3.1 Bulguları elde etmek için izlenen yöntem süreci

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir siklon tasarımı için gerek duyulacak teorik analizler, modellemeler ve geliştirilen yeni denklemler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Teğetsel, radyal ve aksenal hızlar ile dış girdaptaki akış profili belirlendikten sonra, gövde ve koni bölümündeki hava akışı dolaşım mesafesinin hesaplanmasıyla dönüş sayısı hesaplanmıştır. Dönüş sayısının siklon çapına ve giriş hızına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Daha sonra siklonlarda basınç düşümüne ilişkin teorik analizler yapılarak siklon basınç düşümü öngörüsü elde edilmiştir. Buna göre siklon basınç düşümünün çaptan bağımsız olduğu ancak siklon uzunluğunun bir fonksiyonu olduğu görülmüştür. Partikül toplamanın nasıl olduğunu analiz etmek için, dış girdap incelenmiştir. Buradaki partikül hareketleri, kuvvet dengesi denklemi ve partikül kritik yörüngesi incelenerek, partikül dağılımı ve partikül toplama olasılığı dağılımı elde edilmiştir. Siklon toplama verimi hesaplamalarında kullanılmak üzere, kesme noktası ve genel verim modeli belirlenmiştir. Düzeltilmiş d_{50} ile PBD' nin siklon toplama veriminin hesaplamalarında kullanılabileceğinden, toplama verim hesaplamasında kesirsel verim eğrisine ihtiyaç kalmaz.

4.1 Dönüş Sayısı

Siklonlarda sıvının akış profiline ilişkin bilgiler, dönüş sayısı, basınç düşümü ve partikül toplama veriminin, teorik olarak öngörülebilmesi için önem arz etmektedir. Bir siklon içindeki değişken akış profilinin (hız profili) belirlenmesi için birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Shepherd ve Lapple (1939), ana akış profilinin, çıkış borusuna doğru yükselerek hareket eden daha küçük yarıçapta bir iç girdaptan ve siklon girişinden aşağıya doğru hareket eden bir dış girdaptan oluştuğunu ortaya koymuştur. Dış girdaptan iç girdaba sıvı transferi, gözle görülür bir şekilde temiz çıkış borusunun tabanından başlar ve koni bölümünde aşağıya doğru siklon tabanında toz çıkışına yakın bir noktaya kadar devam eder. Ter Linden (1949), 36 cm' lik bir siklonda akış profiline ilişkin detayları ölçmüştür.

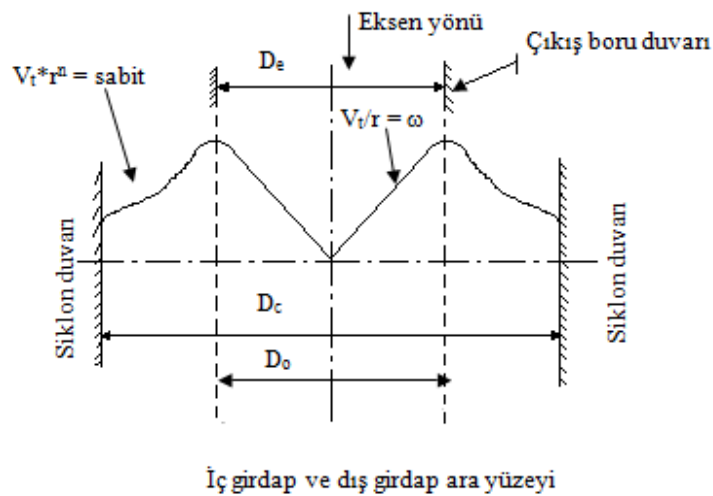
İç girdabın dış limitini ve dış girdabın iç limitini belirten yarıçapın yaklaşık olarak temiz çıkış borusunun yarıçapına eşit olduğu, şerit ve pitot borusu gözlemlenmeleri sayesinde ortaya konulmuştur. İç girdap ve dış girdap ara yüzeyinin, siklonun gövde kısmındaki çıkış borusundan kısmen düşük bir yarıçapta oluştuğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, ara yüzey çapının, siklon çıkış borusu çapıyla aynı olduğu varsayılmıştır ($D_o = D_e$).

Bir siklondaki hız profili, üç hız bileşeni ile sınıflandırılabilir (teğetsel, aksel ve radyal hız). Teğetsel hız, en etken hız bileşenidir. Shepherd ve Lapple (1939), Ter Linden (1949) ve First (1950) araştırma sonuçları (Şekil 4.1), siklonun dairesel kısmında (aynı kesit alanında) yer alan teğetsel hızın, aşağıdaki şekilde belirlenebileceğini göstermiştir;

$$V_t * r^n = C_1 \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)' de belirtilen "n" akış profili faktörüdür ve dış girdapta 0.5~0.8; iç girdap ve dış girdap sınırında 0 değerindedir. Teğetsel hız, dış girdap yarıçapının (r) düşmesi ile artmaktadır. İç girdap ve dış girdap sınırında ($r = D_o/2$) maksimum düzeydedir. İç girdapta ise teğetsel hız, yarıçapın düşmesi nedeniyle düşmektedir. Teğetsel hız ve yarıçapın ilişkisi Denklem (4.2)' deki gibidir;

$$\frac{V_t}{r} = \omega = C_2 \quad (4.2)$$



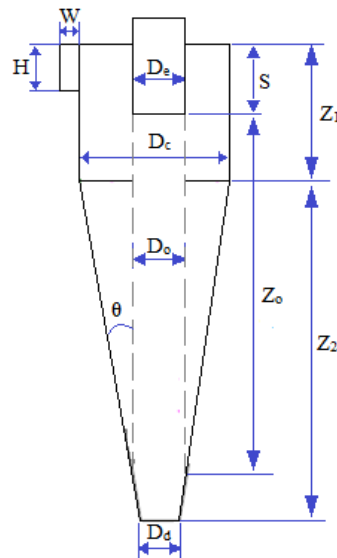
Şekil 4.1. Siklon gövde bölümünde teğetsel hız dağılımı (Wang, 2000)

4.1.1. Dış girdapta akış profili

Aşağıda yer alan varsayımlar, akış profili çalışması için gerçekleştirilmiştir:

- Gövde bölümünde hava akış oranı sabittir ve iki adet hız bileşeni mevcuttur. Bunlar; teğetsel hız (V_t) ve aksel hızdır (V_z).
- Koni bölümünde ise hava akışı, hacimdeki daralmaya bağlı olarak sıkışmaktadır.

Sonuç olarak hava, ara yüzey sayesinde (D_o), dış girdaptan iç girdaba sızmaktadır. Hava sızıntısı (hava akış oranı), koni duvarları ve girdap ara yüzey kesişimine, koni bölümünün üzerinden çıkan doğrusal bir modeldir. Bu varsayım, toz toplama için verimli bir uzunluk sağlamaktadır (Z_o , Şekil 4.2). Bu siklon verim uzunluğu, dış girdap ve iç girdabın ara yüzünün boyutuyla belirlenmektedir (D_o , Şekil 4.2). Siklon verim uzunluğunun siklon tabanına ulaşması gerekmez (Leith ve Mehta, 1973). Siklon verim uzunluğunun, siklon fiziksel uzunluğundan kısa olması halinde, girdap tabanı ve siklon tabanı arasındaki alan, partikül toplama için kullanılmayacaktır. Diğer taraftan, verim uzunluğunun, siklon fiziksel uzunluğundan fazla olması durumunda, girdap, siklonun tabanına doğru uzanacak ve partiküllerin tekrar akış içine karışmasına yol açar. Koni kısmında, üç adet hız bileşeni bulunmaktadır. Bunlar; teğetsel hız (V_t), eksensel hız (V_z) ve radyal hızdır (V_r). Bu bölümde hava akışı için radyal bir ivme bulunmadığından, radyal hızı sabittir.



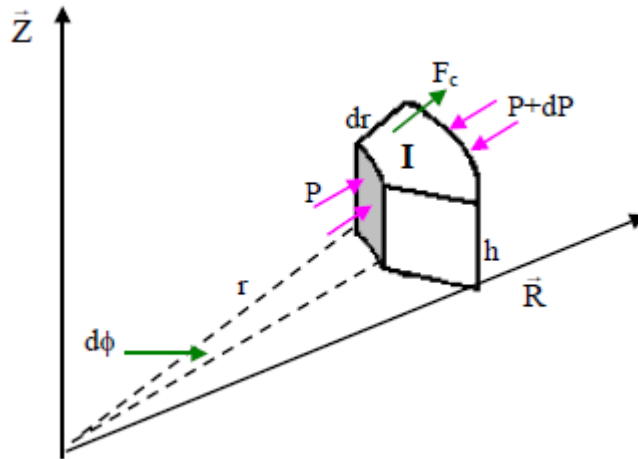
Şekil 4.2. Arayüz (D_o) ve verimli uzunluk (Z_o) boyutları

4.1.1.1. Teğetsel hız (V_t)

Hava akışına uygulanan merkezkaç kuvveti belirleyen baskın hız bileşeni olmasına rağmen, teğetsel hızın belirlenmesi için teorik bir modelin geliştirilmesi gerekmektedir. Teğetsel hız için teorik analizler, hava akımının birim kontrol hacminde (I) bulunan kuvvet analizi ile başlamaktadır (Şekil 4.3).

İlk olarak kontrol hacmi ($h \cdot r \cdot dr \cdot d\phi$) hesaplanır. Daha sonra kontrol hacminde rol oynayan merkezkaç kuvvet şu şekilde belirlenir;

$$F_c = \rho \cdot h \cdot r \cdot d\Phi \cdot dr \cdot \frac{V_t^2}{r} \quad (4.3)$$



Şekil 4.3. Hava akışı birim kontrol hacminde (I) kuvvet denge şeması (Wang, 2002)

Kontrol hacmi yüzeylerinde rol oynayan basınç kuvvetleri aşağıdaki şekildedir;

$$F_p = P \cdot A_p = P \cdot h \cdot r \cdot d\Phi \quad (4.4)$$

$$F_{p+dP} = (P + dP) A_{p+dP} = (P + dP)(r + dr)h \cdot d\Phi$$

$$\approx (P + dP) \cdot h \cdot r \cdot d\Phi \quad (4.5)$$

Hava akışı için herhangi bir radyal ivme bulunmadığı varsayımına dayanarak, partikül momentinin korunumu amacıyla, aşağıdaki şekilde sıvı için kuvvet denge denklemi ($F_c + F_p - F_{p+dp} = 0$) elde edilir;

$$\rho * r * h * d\Phi * dr * \frac{V_t^2}{r} + P * r * h * d\Phi - (P + dP) * r * h * d\Phi = 0 \quad (4.6)$$

Sıvının siklon dış girdabında, döngüsüz akışa sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bir başka deyişle, sıvı hareketi, aerodinamik bir şekilde gerçekleşmektedir. Bernoulli denklemi, aerodinamik şekil boyunca basınç düşümünün belirlenmesinde kullanılabilir.

$$P + \frac{V_t^2}{2} \rho = C_3 \quad (4.7)$$

Denklem (4.7)' nin r' ye göre türevi alınır;

$$\frac{dP}{dr} + \rho * V_t * \frac{dV_t}{dr} = 0 \quad (4.8)$$

Sonra Denklem (4.6) ve (4.8)' i birleştirip, aşağıdaki ilişki kurulabilir;

$$\frac{dV_t}{V_t} + \frac{dr}{r} = 0 \quad (4.9)$$

Elde edilen Denklem (4.9)' un çözümü de şu şekilde olacaktır;

$$V_t * r = C_4 \quad (4.10)$$

Bu, dairesel yönde teğetsel hız dağılımı için teorik bir model oluşturmaktadır. Siklon gövdesinde, teğetsel hızın (V_{t1}), siklon duvarı boyunca iç hız ile aynı olduğu varsayılmaktadır. Aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$V_{t1} = V_{in} \quad (4.11)$$

Bununla birlikte, koni bölümünde, siklon duvarı boyunca teğetsel hız (V_{t2}), $V_{t2} * r = V_{in} * R = \text{sabit}$; olarak Denklem (4.10)'daki modeli izlemektedir. Dolayısıyla Denklem (4.12) şu şekilde elde edilir;

$$V_{t2} = \frac{R}{r} V_{in} = \frac{R * V_{in}}{r_0 + Z * \tan \theta} \quad (4.12)$$

1D3D için $\tan \theta = 1/8$ iken, 2D2D için $\tan \theta = 3/16$ ve 1D2D için $\tan \theta = 1/8$ (θ tanımı için Şekil 4.2'ye bakınız) olarak bulunur. Daha sonra üç siklon tasarımı için Denklem (4.13)'teki bağıntılar elde edilir.

$$V_{t2} = \frac{4D_c * V_{in}}{Z + 2D_c} \quad (1D3D \text{ için})$$

$$V_{t2} = \frac{8D_c * V_{in}}{3Z + 4D_c} \quad (2D2D \text{ için}) \quad (4.13)$$

$$V_{t2} = \frac{8D_c * V_{in}}{2Z + 5D_c} \quad (1D2D \text{ için})$$

4.1.1.2. Eksenel hız (V_z)

Gövde bölümünde (V_{z1}): Siklon gövdesinde, hava akış oranının dış girdapta sabit olduğu varsayılmaktadır. Sonuç olarak, eksenel hız (V_{z1}) aşağıdaki analiz itibariyle sabit akış oranı için belirlenebilmektedir;

$$V_{z1} \left(\frac{\pi(D_c^2 - D_e^2)}{4} \right) = V_{in} \frac{D_c^2}{8} \quad (4.14)$$

1D3D, 2D2D ve 1D2D siklonları için D_e boyutu kullanılacaktır (Şekil 2.2 ve 2.3' e bakınız). Daha sonra üç farklı siklon tipi için aşağıdaki denklem elde edilir;

$$V_{z1} = \frac{2V_{in}}{3\pi} \quad (1D3D \text{ ve } 2D2D \text{ için}) \quad (4.15)$$

$$V_{z1} = \frac{8V_{in}}{13\pi} \quad (2D2D \text{ için})$$

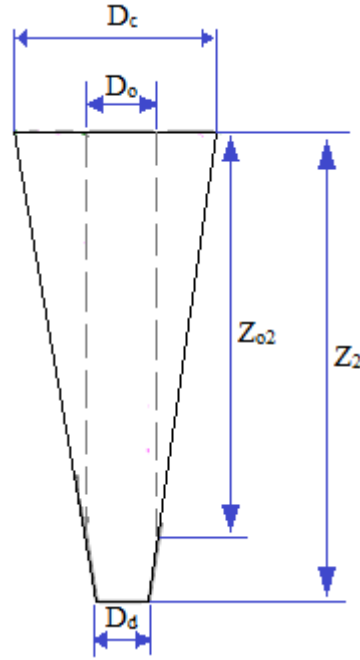
Koni bölümünde (V_{z2}): Yukarıda varsayıldığı üzere, bir siklonun koni bölümünde, hava akışı, dış girdaptan aşağıdaki şekilde doğrusal bir model izleyen iç girdaba sızmaktadır;

$$Q_z = Q_{in} \frac{Z}{Z_{o2}} \quad (4.16)$$

Dolayısıyla, koni bölümünde eksenel hız, aşağıdaki şekilde belirlenebilir;

$$V_{z2} = -\frac{Q_z}{A_z} = \frac{-Q_{in}}{\pi(R-r_0)} * \frac{1}{\frac{(R-r_0)}{Z_{o2}} * Z + 2r_0} \quad (4.17)$$

Şekil 4.4' te, koni bölümünde aksenal hız hesaplaması için gerekli olan ölçüleri göstermektedir. Z_{o2} koni bölümündeki verim uzunluğudur. Bu, ara yüzey çapı ve siklon tasarımı için belirlenmektedir. Farklı tasarımlar için Z_{o2} boyutları: $Z_{o2} = 2D_c$ (1D3D için), $Z_{o2} = 4D_c/3$ (2D2D için) ve $Z_{o2} = 3D_c/2$ (1D2D için)



Şekil 4.4. Siklon koni boyutları

Z_{o2} ölçüsü ile Denklem (4.17) kullanılarak, 1D3D, 2D2D ve 1D2D tasarımlar için aksenal hızlar,

$$V_{z2} = -\frac{4D_c * V_{in}}{(Z + 4D_c)\pi} \quad (1D3D \text{ için})$$

(4.18)

$$V_{z2} = -\frac{8D_c * V_{in}}{(3Z + 8D_c)\pi} \quad (2D2D \text{ için})$$

şeklindedir.

1D2D siklon tasarım için, çıkış borusu, $D_c/8$ ölçüsünde siklonun koni bölümüne uzanır (Bknz. Şekil 2.3). Bu durumda koni bölümü, hesaplamalar için iki alana bölünebilir. 1. Alan koninin üst bölümünden çıkış borusu tabanına kadardır. Bu alanda dış girdaptan iç girdaba herhangi bir hava sızıntısı bulunmamaktadır. Sonuç olarak, söz konusu alanda aksel hız (V_{z21}), aşağıdaki gibi gövde bölümündeki ile aynıdır;

$$V_{z21} = -\frac{8V_{in}}{13\pi} \quad (4.19)$$

2. Alanda ise, çıkış borusu tabanından koni tabanına kadardır. Hava, Denklem (4.16) ve (4.17)' de tanımlandığı şekilde doğrusal bir kalıp takip etmek suretiyle, dış girdaptan iç girdaba sızır. Bu alanda, aksel hız (V_{z22}) aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$V_{z22} = -\frac{16D_c * V_{in}}{(3Z + 15D_c)\pi} \quad (4.20)$$

4.1.1.3. Radial hız (V_r)

Radial hızın, gövde bölümünde sıfır olduğu kabul edilmektedir. Bir siklonun koni bölümünde, radial hız, $V_{r2} = V_{z2} * \tan \theta$ dır. Böylece,

$$\begin{aligned} V_{r2} &= \frac{D_c * V_{in}}{(2Z + 8D_c)\pi} && (1D3D \text{ için}) \\ V_{r2} &= \frac{3D_c * V_{in}}{(6Z + 16D_c)\pi} && (2D2D \text{ için}) \\ V_{r2} &= \frac{V_{in}}{13\pi} && (1D2D \text{ için alan 1'de}) \\ V_{r2} &= \frac{2D_c * V_{in}}{(3Z + 15D_c)\pi} && (1D2D \text{ için alan 2'de}) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Denklem (4.21) üç farklı siklon tipi için elde edilebilir.

4.1.2. Hava akışı dolaşım mesafesi

4.1.2.1. Gövde bölümünde dolaşım mesafesi (L_1)

Gövde bölümünde, hava akışı dolaşım mesafesinin hesaplanabilmesi için öncelikle, hava akışına ilişkin toplam ortalama hızın (V_1) belirlenmesi gerekmektedir. Gövde bölümünde yalnızca iki adet hız bileşeni bulunmaktadır ve toplam ortalama hıza Denklem (4.22)' deki gibi ulaşılabilir.

$$V_1 = \sqrt{V_{t1}^2 + V_{z1}^2} \quad (4.22)$$

V_{t1} ve V_{z1} Denklem (4.12) ve (4.15) itibariyle belirlenmektedir. Daha sonra, dolaşım mesafesi, aşağıdaki gibi ortalama hız ve dolaşım süresi ile hesaplanabilir;

$$L_1 = \int_0^{t_1} V_1 dt = \int_0^{z_1} \sqrt{V_{t1}^2 + V_{z1}^2} \frac{dz}{V_{z1}} \quad (4.23)$$

Denklem (4.23)' ün çözümü üç farklı siklon tasarımı için aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} L_1 &= 1.53 \pi D_c = 4.8 D_c \text{ (1D3D için)} \\ L_1 &= 3.06 \pi D_c = 9.6 D_c \text{ (2D2D için)} \\ L_1 &= 1.66 \pi D_c = 5.2 D_c \text{ (1D2D için)} \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.1.2.2. Koni bölümünde dolaşım mesafesi (L_2)

Bir siklonun koni bölümündeki toplam ortalama hızı, aşağıdaki gibi üç hız bileşeni ile belirlenir;

$$V_2 = \sqrt{V_{t2}^2 + V_{z2}^2 + V_{r2}^2} \quad (4.25)$$

Bu denklemdeki, V_{t2} , V_{z2} ve V_{r2} , Denklem (4.14), (4.18), (4.19), (4.20) ve (4.21) ile elde

edilir. Koni bölümünde dolaşım mesafesi, Denklem (4.26) yardımı ile bulunur.

$$L_2 = \int_0^{t_2} V_2 dt = \int_0^{Z_{o2}} \sqrt{V_{r2}^2 + V_{z2}^2 + V_{\theta2}^2} \frac{dz}{V_{z2}} \quad (4.26)$$

1D3D siklon tasarımı için koni bölümü dolaşım mesafesi,

$$L_2 = \int_0^{2D_c} \sqrt{\left(\frac{1}{Z+2D_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{Z\pi+4\pi D_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{8\pi Z+32\pi D_c}\right)^2} * (Z+4D_c) \pi * dz$$

ile bulunurken 2D2D siklon tasarımı için koni bölümü dolaşım mesafesi,

$$L_2 = \int_0^{4D_c/3} \sqrt{\left(\frac{1}{3Z+4D_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{3Z\pi+8\pi D_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{48\pi Z+128\pi D_c}\right)^2} * (3Z+8D_c) \pi * dz$$

ile elde edilir. 1D2D siklon için koni bölümü dolaşım mesafesi ise,

$$L_2 = \int_{11D_c/8}^{3D_c/2} \sqrt{\left(\frac{D_c}{2Z+5D_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{13\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{104\pi}\right)^2} * 13\pi * dz$$

$$+ \int_0^{11D_c/8} \sqrt{\left(\frac{1}{4Z+10D_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{3Z\pi+15D_c\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{24\pi Z+120D_c\pi}\right)^2} * (3Z+15D_c) * dz$$

ile hesaplanabilir. Farklı siklon çaplarındaki L_2 mesafesinin detaylı çözümleri Ek Açıklamalar - A' da verilmiştir; Farklı siklon çapları ile L_2 için elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} L_2 &= 10.83 D_c \quad (1D3D \text{ için}) \\ L_2 &= 7.22 D_c \quad (2D2D \text{ için}) \\ L_2 &= 2.57 D_c \quad (1D2D \text{ için}) \end{aligned} \quad (4.27)$$

4.1.3. Verimli dönüş sayısı

Teoride, dış girdaptaki hava akışı dolaşım mesafesi ve siklon boyutları, verimli dönüş sayısını belirlemektedir (Wang 2001). Siklon gövde bölümündeki dönüş sayısı, aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$N_{e1} = \frac{L_1}{\pi * D_c} \quad (4.28)$$

Bir siklonun koni bölümündeki dönüş sayısı,

$$N_{e2} = \frac{L_2}{\pi \left(\frac{D_c + D_0}{2} \right)} \quad (4.29)$$

ile bulunur. Farklı ölçülerde 1D3D, 2D2D ve 1D2D siklonlar için verimli dönüş sayısı ve hava akışı dolaşım mesafesinin hesaplanma bilgi Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hava akışı dolaşım mesafesi ve verimli dönüş sayısı

Siklonlar	Gövde		Koni		Toplam	
	L ₁	N _{e1}	L ₂	N _{e2}	L	N _e
1D3D	4.8 D _c	1.53	10.83 D _c	4.60	15.63 D _c	6.13
2D2D	9.6 D _c	3.06	7.22 D _c	3.07	16.82 D _c	6.13
1D2D	5.2 D _c	1.66	2.57 D _c	1.01	7.77 D _c	2.67

Bu bölümde, hava akışı dolaşım mesafesi ve dönüş sayısı hesaplamaları için yeni bir teori yöntemi geliştirilmiştir. Akış profili ve siklon boyutları, bir siklonun dış girdabındaki hava akışı dolaşım mesafesini belirlemektedir. Farklı siklon ölçülerinde verimli dönüş sayısı, hava akışı dolaşım mesafesi ve siklon ölçülerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre, verimli dönüş sayısı, siklon tasarımı itibariyle belirlenir ve siklon çapına ve giriş hızına bağlıdır. Hem 1D3D hem de 2D2D siklonlarında 6.13 dönüş ve 1D2D siklonda 2.67 dönüş bulunmaktadır.

4.2. Siklonlarda Basınç Düşümü

Bir siklon tasarımı yapılırken, basınç düşümü öncelikli olarak ele alınması gereken konudur. Çünkü enerji gereksinimi ile doğru orantılı olduğu için, bir vantilatör sistemi tasarlanmasında siklon basınç düşümü bilgisi önemlidir.

Shepherd ve Lapple (1939), Stairmand (1949, 1951), First (1950) ve Barth (1956) gibi, siklon basınç düşümünü belirlemek amacıyla birçok model geliştirilmiştir. Bununla birlikte, denklemler hem deneysel model hem de değişken nitelikte olduğu için içerdikleri boyutsuz parametreler, pratik uygulamalarda kolay değerlendirilememiştir. Bilinmektedir ki; siklon basınç düşümü, giriş hızı gibi bazı işletim parametrelerine ve ilgili siklonun tasarımına bağlıdır. Ampirik modeller, yeni siklon teknolojisi olarak her siklon tasarımda kullanılamamakta ve bunun için yeni siklon tasarımları geliştirilmektedir. Siklon basınç düşümü tahminlemesi dahil olmak üzere, siklon tasarımının bilimsel açıdan değerlendirilmesi için başka teorik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Shepherd ve Lapple (1939) bir siklon basınç düşümünün, aşağıdaki bileşenlerden oluştuğunu ortaya koymuşlardır;

1. Gazın, siklona girdiği zaman uğradığı genleşme nedeniyle oluşan kayıp.
2. Gazın siklondaki döngüsel hareketinden dolayı oluşan kinetik enerji kaybı.
3. Siklon duvarındaki sürtünme nedeniyle oluşan kayıp.
4. Çıkış borusundaki türbülanslı akımdan dolayı oluşan kayıp.
5. Dönüş esnasında basınç enerjisinden geri kazanılan kinetik enerji

4.2.1. Basınç düşümüne ilişkin teorik analizler

Genel olarak, siklon basınç kaybı, tüm bağımsız basınç kayıp bileşenleriyle elde edilebilir. Aşağıda yer alan basınç kayıp bileşenleri, bu araştırma için siklon basınç kaybı analizinde ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla;

1. Siklon giriş basınç düşümü (ΔP_e).
2. Kinetik enerji kaybı sonucu basınç düşümü (ΔP_k).
3. Dış girdapta sürtünme basınç düşümü (ΔP_f).
4. Dönel alan nedeniyle basınç düşümü (ΔP_r).
5. İç girdap ve çıkış borusunda basınç düşümü (ΔP_o).

4.2.1.1. Siklon giriş basınç düşümü (ΔP_e)

Siklon giriş basınç düşümü, giriş borusundaki dinamik basınç kaybıdır ve Denklem (4.30) ile belirlenebilir. Bu denklemde, C_5 dinamik kayıp sabiti ve VP_{in} giriş hızı basıncıdır.

$$\Delta P_e = C_5 * VP_{in} \quad (4.30)$$

4.2.1.2. Kinetik enerji kaybı sonucu basınç düşümü (ΔP_k)

Bu basınç düşümü, giriş borusundan çıkış borusuna kadar olan hız değişimidir ve,

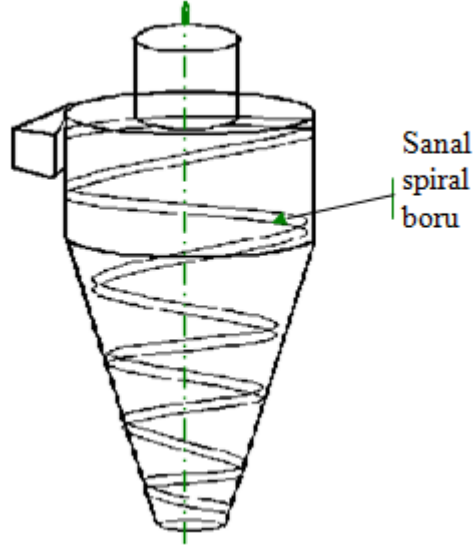
$$\Delta P_k = VP_{giris} - VP_{cikis} \quad (4.31)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

4.2.1.3. Dış girdapta sürtünme basınç düşümü (ΔP_f)

Sürtünme basınç düşümü, dış girdap ile siklon iç cidarı arasında oluşan sürtünmeden kaynaklı basınç kaybıdır. Dış girdaptaki hava akışı, siklon boyunca aşağıya yönelik bir spiralde akmaktadır. Hava akışının, çap D_s ve uzunluk L (dış girdap dolaşım mesafesi) ile sanal bir spiral boruda (Şekil 4.5) dolaştığı düşünülebilir. Sürtünme basınç düşümü, Darcy' nin denklemi ile aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$d\Delta P_f = f * \frac{VP_s}{D_s} \quad (4.32)$$



Şekil 4.5. Dış girdaptaki hava akışına dair sanal spiral boru

Gövde bölümünde (ΔP_{f1}): Eşdeğer akış çapı (D_{s1}), sanal spiral borudaki hava akış ölçüsünün belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu akışa ilişkin akış oranı ve toplam hız, Denklem (4.33)' te söz konusu eşdeğer çap kullanılarak belirlenmektedir.

$$V_{s1} \frac{\pi D_{s1}^2}{4} = V_{in} * \frac{D_c^2}{8} \quad (4.33)$$

Bu denklemde, V_{s1} gövde bölümündeki dış girdabın toplam hava akış hızını göstermektedir. Dolayısıyla, $V_{s1} = V_1$, Denklem (4.22) itibariyle belirlenmekte ve (1D3D, 2D2D ve 1D2D tasarımları için) $D_{s1} = 0.395 D_c$ elde edilmektedir.

Gövdedeki sürtünme basınç düşümü,

$$\Delta P_{f1} = \int_0^{L_1} f * \frac{VP_{s1}}{D_{s1}} dL = \int_0^{Z_1} f * \frac{VP_{s1}}{D_{s1}} * V_1 * \frac{dZ}{V_{z1}} \quad (4.34)$$

ile tayin edilir.

Bu denklemde, VP_{s1} , akış hızı (V_{s1}) ile belirlenen akış hızı basıncıdır. f sürtünme faktörüdür. Ayrıca Reynolds sayısının (Re , Denklem 4.35) fonksiyonudur ve sanal spiral boru yüzeyi pürüzlülük derecesini ifade eder.

$$R_e = \frac{D * V * \rho}{\mu} \quad (4.35)$$

Sürtünme faktörü (f), sıvılar için olan Reynolds sayısı ve boru yüzeyine ilişkin pürüzlülük faktörüne (e/D) dayalı olarak Moody grafiğinden (sürtünme grafiği) elde edilebilir. Bu durumda sanal borunun sınırlarını, bir tarafta siklon iç yüzeyi ve diğer tarafta hava akışının olduğu bölüm belirler. Grafikten elde edilen sürtünme faktörünün yarısı, Denklem (4.34)'te basınç düşümü hesaplaması için kullanılmaktadır. Çizelge 4.2' de 1D3D, 2D2D ve 1D2D tasarımlarına ait giriş hızlarındaki sürtünme faktörleri listelenmektedir.

Çizelge 4.2. Sürtünme basınç düşümü hesaplaması için sürtünme faktörleri

Siklon	Ölçü (D _c)	e/D _c	Re	f (Moody grafiği)	f (ΔP _f model için)
1D3D	0.2 m	0.0010	1.64 *10 ⁵	0.022	0.011
	0.9 m	0.0002	9.85*10 ⁵	0.016	0.008
2D2D	0.2 m	0.0010	1.54 *10 ⁵	0.022	0.011
	0.9 m	0.0002	9.20*10 ⁵	0.015	0.008
1D2D	0.2 m	0.0010	1.23 *10 ⁵	0.023	0.012
	0.9 m	0.0002	7.40*10 ⁵	0.015	0.008

Denklem (4.34), bir siklonun gövde bölümündeki sürtünme kayıp modelidir. Bu model, sürtünme basınç kaybının, gövdedeki dış girdabın hava akış mesafesinin bir fonksiyonu olduğuna işaret etmektedir. Bir diğer ifade ile, sürtünme kaybı, siklon yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Siklon ne kadar uzunsa, sürtünme kaybı o kadar fazla olmaktadır. Aşağıda verilen sonuçlar, bir siklonun gövdesinde yer alan sürtünme kaybına ilişkin öngörü içeren Denklem (4.34)' ten sağlanmıştır.

$$\Delta P_{f1} = 0.13 * VP_{s1} = 0.14 * VP_{in} \quad (1D3D \text{ için})$$

$$\Delta P_{f1} = 0.27 * VP_{s1} = 0.28 * VP_{in} \quad (2D2D \text{ için}) \quad (4.36)$$

$$\Delta P_{f1} = 0.14 * VP_{s1} = 0.15 * VP_{in} \quad (1D2D \text{ için})$$

Koni bölümünde (ΔP_{f2}): Koni bölümünde, eşdeğer akış çapı (D_{s2}) şöyle belirlenmektedir;

$$V_{s2} * \frac{\pi D_{s2}^2}{4} = V_{in} * \frac{D_c^2}{8} * \frac{Z}{Z_{o2}} \quad (4.37)$$

Koni bölümündeki sürtünme basınç düşümü ise, aşağıdaki şekilde belirlenmektedir;

$$\Delta P_{f2} = \int_0^{L_2} f \frac{VP_{s2}}{D_{s2}} dL = \int_{Z_{o2}}^0 f \frac{VP_{s2}}{D_{s2}} * V_2 \frac{dZ}{V_{z2}} \quad (4.38)$$

1D3D, 2D2D ve 1D2D için Denklem (4.38), aşağıdaki şekildedir;

- 1D3D siklon için:

$$\Delta P_{f2} = \int_0^{2D_c} \frac{f}{2} VP_{in} * \left(\frac{\pi}{D_c} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{Z + 4D_c}{\sqrt{Z}} \right) * \left[\left(\frac{4D_c}{Z + 2D_c} \right)^2 + \left(\frac{4D_c}{Z\pi + 4\pi D_c} \right)^2 + \left(\frac{D_c}{2Z\pi + 8\pi D_c} \right)^2 \right]^{\frac{7}{4}} dZ$$

- 2D2D siklon için:

$$\Delta P_{f2} = \int_0^{4D_c/3} \frac{f}{\sqrt{24}} VP_{in} * \left(\frac{\pi}{D_c} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3Z + 8D_c}{\sqrt{Z}} \right) * \left[\left(\frac{8D_c}{3Z + 4D_c} \right)^2 + \left(\frac{8D_c}{3Z\pi + 8\pi D_c} \right)^2 + \left(\frac{3D_c}{6Z\pi + 16\pi D_c} \right)^2 \right]^{\frac{7}{4}} dZ$$

- 1D2D siklon için:

$$\Delta P_{f2} = \int_0^{3D_c/2} \frac{f\sqrt{3}}{16} V_{P_{in}}^* \left(\frac{\pi}{D_c} \right)^2 \left(\frac{3Z + 15D_c}{\sqrt{Z}} \right)^3 * \left[\left(\frac{8D_c}{2Z + 5D_c} \right)^2 + \left(\frac{16D_c}{3Z\pi + 15\pi D_c} \right)^2 + \left(\frac{2D_c}{3Z\pi + 15\pi D_c} \right)^2 \right]^{7/4} dZ$$

Denklem (4.38) çözümleri, bir siklonun koni bölümünde öngörülen sürtünme basınç düşümü modelleridir. Sürtünme faktörü (f) Çizelge 4.2' den belirlenmektedir. Yine, yukarıda belirtilen modeller, koni bölümündeki sürtünme kaybının, koninin dış girdabındaki hava akış dolaşım mesafesinin fonksiyonudur. Dolayısıyla, konideki sürtünme kaybı, koninin yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Ek Açıklamalar - B, farklı giriş hızları ve siklon çaplarında olan bir siklonun koni bölümündeki sürtünme basınç düşümü hesaplanmasını göstermektedir.

4.2.1.4. Dönel alan nedeniyle basınç düşümü (ΔP_r)

Siklon konisinde, hava akış döngüsü, radyal ivme nedeniyle bir basınç alanı oluşturmaktadır. Dönel enerji kaybı, merkezkaç kuvvetini aşmak için kullanılan ve akışın, dış girdaptan iç girdaba hareketini sağlayan bir enerji türüdür. Dönel kinetik enerji kaybı için denklem geliştirilmesi amacıyla, hem iç hem dış girdaptaki döngü yönünün ara yüzeylerinde oluşması beklenen sürtünmelerden dolayı, aynı olduğu varsayılmaktadır.

Dönel alan basınç kaybı, siklon koni duvarı ile girdap ara yüzü arasındaki basınç alanında oluşan basınç değişimi olarak ölçülebilir. Bu basınç değişimi, teğetsel hızın teorik analizinde tanımlanmıştır (Denklem 4.6). Aslında, Denklem (4.6) aşağıdaki Denklem (4.39)' u ifade etmektedir;

$$dP = \rho \frac{V_t^2}{r} * dr \quad (4.39)$$

Denklem (4.39) çözümünde, dönele kayıp aşağıdaki şekilde elde edilmektedir;

$$\Delta P_r = \rho V_{in}^2 \left(\frac{R}{r_0} - 1 \right) \quad (4.40)$$

Buradan da üç farklı siklon tasarımı için,

$$\Delta P_r = 2 VP_{in} \quad (1D3D \text{ ve } 2D2D \text{ için}), \quad \Delta P_r = 1.22 VP_{in} \quad (1D2D \text{ için}) \quad \text{elde edilir.}$$

4.2.1.5. İç girdap ve çıkış borusunda basınç düşümü (ΔP_o)

İç girdabın sabit bir yüksekliğe ve yatay bir eğim açına sahip olduğu ve herhangi bir dikey konumda aynı yarıçapa ve aynı dönme hızına sahip olduğu varsayılır. Söz konusu basınç bileşenine ilişkin hesaplama yöntemi, iç girdap ve çıkış borusundaki ortalama basınç düşümünü belirlemek için kullanılmaktadır. Aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta P_o = C_6 * VP_{out} \quad (4.41)$$

Bu denklemde, C_6 dinamik kayıp sabiti ve VP_{out} çıkış hız basıncıdır.

4.2.1.6. Siklon toplam basınç kaybı (ΔP_{toplam})

Siklon toplam basıncı, aşağıdaki şekilde beş basınç düşümü bileşeninin toplanması, ile basit bir şekilde elde edilebilir;

$$\Delta P_{toplam} = \Delta P_e + \Delta P_k + \Delta P_f + \Delta P_r + \Delta P_o \quad (4.42)$$

4.2.1.7. Siklon basınç düşümü öngörüsü

Denklem (4.30), (4.31), (4.36), (4.38), (4.40) ve (4.41), beş basınç kayıp bileşeninin öngörülebilmesi için model teşkil etmektedir. Söz konusu modellere dayanarak, farklı giriş

hızları ile farklı boyutlarda siklonlar için basınç düşümleri hesaplanmıştır. Koni bölümündeki sürtünme kaybı için hesaplama detayları, Ek Açıklamalar – B’ de verilmektedir. Tahmini basınç düşümleri, Çizelge 4.3 – 4.11’ e listelenmektedir. Basınç düşümü tahminlerine göre: (1) Siklon basınç düşümü, siklon ölçüsünden bağımsızdır. (2) Dış girdap sürtünme kaybı ve bir siklondaki dönel enerji kaybı temel basınç düşümü bileşenlerini oluşturmaktadır. (3) Sürtünme kaybı, siklon yükseklik fonksiyonudur. Siklon yüksekliği ne kadar çok ise, sürtünme kaybı da o kadar yüksek olur.

Çizelge 4.3. $V_{in} = 16$ m/s ile 1D3D için tahmini basınç düşümü

Siklon Ölçüsü	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f		ΔP_r	ΔP_o	Toplam ΔP
			ΔP_{f1}	ΔP_{f2}			
0.1	159	95	22	358	319	117	1070
0.2	159	95	22	358	319	117	1070
0.3	159	95	22	358	319	117	1070
0.6	159	95	22	358	319	117	1070
0.9	159	95	22	358	319	117	1070

- Siklon ölçüsü: (m) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.4. $D_c = 0.2$ m ile 1D3D için tahmini basınç düşümü

Hız	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f	ΔP_r	ΔP_o	Toplam
5	16	9	35	31	11	102
8	35	21	79	70	26	231
10	62	37	140	124	45	408
13	97	58	219	194	71	639
15	140	83	315	279	102	919
16	159	95	358	319	117	1048
18	190	113	430	380	139	1252
20	248	148	561	497	181	1635

- Hız: (m/s) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.5. $D_c = 0.9$ m ile 1D3D için tahmini basınç düşümü

Hız	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f	ΔP_r	ΔP_o	Toplam
5	16	9	35	31	11	102
8	35	21	79	70	26	231
10	62	37	140	124	45	408
13	97	58	219	194	71	639
15	140	83	315	279	102	919
16	159	95	358	319	117	1048
18	190	113	430	380	139	1252
20	248	148	561	497	181	1635

- Hız: (m/s) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.6. $V_{in} = 15$ m/s ile 2D2D için tahmini basınç düşümü

Siklon	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f		ΔP_r	ΔP_o	Toplam
Ölçüsü			ΔP_{f1}	ΔP_{f2}			ΔP
0.1	140	82	40	210	279	103	854
0.2	140	82	40	210	279	103	854
0.3	140	82	40	210	279	103	854
0.6	140	82	40	210	279	103	854
0.9	140	82	40	210	279	103	854

- Siklon ölçüsü: (m) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.7. $D_c = 0.2$ m ile 2D2D için tahmini basınç düşümü

Hız	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f	ΔP_r	ΔP_o	Toplam
5	16	9	23	31	11	90
8	35	21	53	70	26	205
10	62	37	94	124	45	362
13	97	58	147	194	71	567
15	140	83	210	279	102	814
16	159	95	241	319	117	931
18	190	113	286	380	139	1108
20	248	148	376	497	181	1450

- Hız: (m/s) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.8. $D_c = 0.9$ m ile 2D2D için tahmini basınç düşümü

Hız	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f	ΔP_r	ΔP_o	Toplam
5	16	9	23	31	11	90
8	35	21	53	70	26	205
10	62	37	94	124	45	362
13	97	58	147	194	71	567
15	140	83	210	279	102	814
16	159	95	241	319	117	931
18	190	113	286	380	139	1108
20	248	148	376	497	181	1450

- Hız: (m/s) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.9. $V_{in} = 12$ m/s ile 1D2D için tahmini basınç düşümü

Siklon Ölçüsü	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f		ΔP_r	ΔP_o	Toplam ΔP
			ΔP_{f1}	ΔP_{f2}			
0.1	89	75	12	80	107	27	390
0.2	89	75	12	80	107	27	390
0.3	89	75	12	80	107	27	390
0.6	89	75	12	80	107	27	390
0.9	89	75	12	80	107	27	390

- Siklon ölçüsü: (m) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.10. $D_c = 0.2$ m ile 1D2D için tahmini basınç düşümü

Hız	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f	ΔP_r	ΔP_o	Toplam
5	16	13	15	19	5	68
8	35	29	32	42	11	149
10	62	52	55	75	19	263
12	89	75	80	107	27	378
15	140	117	125	168	42	592
16	159	133	144	191	47	674
18	190	159	171	228	57	805
20	248	207	224	298	74	1051

- Hız: (m/s) ve basınç düşümü: (Pa)

Çizelge 4.11. $D_c = 0.9$ m 1D2D için tahmini basınç düşümü

Hız	ΔP_e	ΔP_k	ΔP_f	ΔP_r	ΔP_o	Toplam
5	16	13	15	19	5	68
8	35	29	32	42	11	149
10	62	52	55	75	19	263
12	89	75	80	107	27	378
15	140	117	125	168	42	592
16	159	133	144	191	47	674
18	190	159	171	228	57	805
20	248	207	224	298	74	1051

- Hız: (m/s) ve basınç düşümü: (Pa)

Siklon basınç düşümü, beş bağımsız basınç düşümü bileşeninden oluşmaktadır. Dış girdaptaki sürtünme kaybı ve siklondaki dönel enerji kaybı, temel basınç kaybı bileşenleridir. Beş farklı ebatta siklon (0.1 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.6 m ve 0.9 m) için basınç düşümüne ilişkin teorik analizler, siklon basıncının, çaptan bağımsız olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, siklon basınç düşümü, siklon yüksekliğinin bir fonksiyonudur. 1D3D, 2D2D ve 1D2D siklon tasarımları için, basınç düşümüne ilişkin öngörüler, kendi tasarım giriş hızlarında (16 m/s, 15 m/s ve 12 m/s) sırasıyla, 1071 Pa, 854 Pa ve 390 Pa olmaktadır.

4.3. Siklon Toplama Verimi

Düşük maliyetli ve en etkili partikül madde ayırma sistemi olarak kullanılan siklonlar üzerinde uzun yıllar çalışılmıştır. Bu süreçte, toplama veriminin hesaplanmasına ilişkin bir çok prosedür geliştirilmesine rağmen, mevcut tasarım uygulaması, analitik tasarım prosedüründen ziyade geçmiş deneyimlere dayanmakta ve bundan dolayı siklon toplama verimini tam olarak öngörememektedir.

Literatürde, siklon verimi tahminlenmesi için yıllardır birçok teori ortaya atılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere, Lapple (1951), bir siklondaki hava akışı dönüş sayısı ve

bir kuvvet dengesine dayalı kesme noktasına (d_{50}) dayalı (ayrıca klasik siklon tasarımı olarak bilinmektedir) bir teori geliştirmiştir. Lapple modelinin kullanımı kolay olmasına rağmen, siklon toplama verimini doğru bir şekilde hesaplayamamaktadır. 1972 yılında, Leith ve Licht, siklon toplama verimi çalışmalarına ilişkin bir başka teori (geri karıştırma) öne sürmüştür. Geri karıştırma teorileri, siklon eksenine dik olan herhangi bir düzlemde, toplanmamış parçacıkların türbülanslı karışımının, siklonun herhangi bir yatay kesiti boyunca toplanmamış toz konsantrasyonu oluşturduğunu göstermektedir. Söz konusu teoriye dayanarak, herhangi bir boyuttaki partikül için verimin öngörülebilmesi amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Leith ve Licht modeli, literatürde yer alan diğer teoriler ile karşılaştırıldığında, verim yönünden en iyi çalışma olarak görülmektedir. (Leith ve Mehta, 1973). Ancak bu model deneysel verilerle test edilmemiştir ve pratik uygulamalarda kolayca hesaba katılamayan değişkenlere ve boyutsuz parametrelere sahiptir.

Stairmand (1951) ve Barth (1956) ilk olarak, 50' lerde siklon toplama verimi analizi için "statik partikül teorisi" geliştirmiştir. Bir kuvvet denge analizine dayalı olan statik partikül teorisi, siklon performansının niteliklerinin belirlenmesi amacıyla, diğer bir çok araştırmacının teorik analizlerinde kabul edilmiştir. Temel olarak "statik partikül teorisinin, bir partikül üzerindeki kuvvet dengesinin %50 oranında toplanma olasılığı ve %50 oranında siklona girme olasılığı olan kritik bir partikülü ortaya çıkardığı ileri sürülmüştür. Kritik partikül çapı d_{50} 'dir. Kritik partikül boyutları (d_{50}), siklona giren en büyük partikülden daha büyük ve siklonda toplanabilen en küçük partikülden daha küçük boyuttadır. d_{50} çapındaki kritik partikül, teorik olarak, kuvvet dengesi nedeniyle daime dış girdapta takılı kalacaktır.

4.3.1. Dış girdapta partikül toplama mekanizması

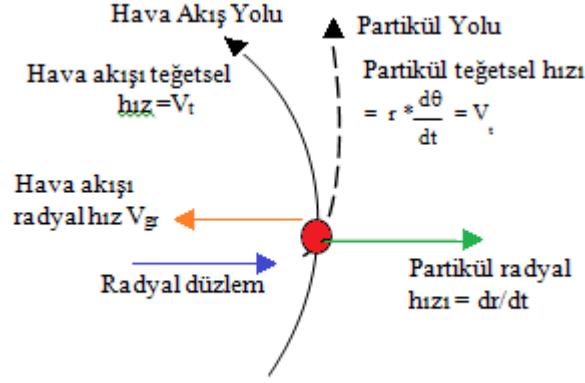
Siklon sistemlerinde iki farklı girdap oluşumu vardır. Bunlar; temiz akışkanın siklonu terk etmesini sağlayan, daha küçük çaplı olan iç girdap ve partikül toplanmasını sağlayan, daha büyük çaplı olan dış girdaptır.

4.3.1.1. Dış girdapta partikül hareketleri

Dış girdapta partikül toplama mekanizmasının incelenmesi, siklon performans özellikleri ile tasarım ve işletim parametreleri arasındaki ilişkiyi anlamının bir yoldur. Bu çalışmanın ilk adımı, dış girdaptaki partikül hareketini nitelendirme çalışmasıdır. Partikül hareketi çalışması ve dış girdap yörüngesi hakkında, aşağıdaki kabuller gerçekleştirilmiştir:

- Partikül küreseldir. Düzensiz şekle sahip olan küresel olmayan partiküller için, Stokes çapları (ayrıca EKÇ olarak bilinmektedir) analiz için kullanılmaktadır.
- Hava akışı ve partikül arasındaki hız ilişkisi, sıvı modelini değiştirmez. Örnek olarak; dış girdaptaki hava akışı hız profili verilebilir.
- Partikül hareketi komşu partiküllerden etkilenmez.
- Partikül teğetsel hızı, hava akışı teğetsel hız ile aynıdır.
- $Re < 1$ iken, bir partikül üzerindeki sürüklenme kuvveti Stokes Kanunları tarafından verilmektedir.
- Bir partikül üzerindeki kuvvet dengesi, söz konusu partikül üzerinde %50 toplama olasılığı oluşturmaktadır.
- Partikül, iç girdap ve dış girdap ara yüzeyinden, siklon duvarına doğru hareket eder ve partikül duvara çarptığı zaman toplanır.

Partikül hızı ve ivme vektörleri: Dış girdaptaki partikül hareketinin analizi, silindirik bir koordinat sisteminde gerçekleştirilmektedir. Hava akışının siklon dış girdabına, çapı d_p ve yoğunluğu ρ_p olan bir partikül getirmesi halinde, partikül üzerindeki merkezkaç kuvveti, radyal bir ivme oluşturmaktadır. Partikül ve hava akışı arasındaki hız ilişkisi, partikül ve hava akışı için farklı bir yörünge meydana getirmektedir. Şekil 4.6, partikülün dış girdapta hareket halinde iken partikül yörüngesi ve hava akımı yörüngesini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. Dış girdaptaki hava akışı ve partikül yörüngesi

$r\theta$ koordinatlarında, partikül hızı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$\vec{V}_p = r \frac{d\theta}{dt} \vec{T} + \frac{dr}{dt} \vec{R} \quad (4.43)$$

Partikül ivmesi, aşağıdaki analiz itibariyle elde edilebilir;

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{\partial V_p}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial V_p}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} \vec{T} + r \frac{d^2\theta}{dt^2} \frac{dr}{dt} \vec{T} + r \frac{d\theta}{dt} \frac{d\vec{T}}{dt} + \frac{d^2r}{dt^2} \vec{R} + \frac{dr}{dt} \frac{d\vec{R}}{dt}$$

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} \vec{R} \quad \text{ve} \quad \frac{d\vec{R}}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} \vec{T} \quad \text{olduğunda ve yukarıdaki denkleme uygulandığında;}$$

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_t = \left[2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r \frac{d^2\theta}{dt^2} \right] \vec{T} + \left[\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \vec{R} \quad (4.44)$$

Denklem (4.44) elde edilmiş olur. Partikül teğetsel hızınının, zamana bağlı olarak sabit olan, hava akışı teğetsel hızına (V_t) eşit olduğundan partikülün ($a_t=0$) teğetsel ivmesi bulunmamaktadır.

Partikül üzerindeki etkili kuvvetler: Siklon dış girdabında partikül hareketleri, aşağıdaki şekilde Newton Kanunları yardımıyla belirlenebilir;

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \sum \vec{F} \quad (4.45)$$

Yerçekimi kuvveti (F_G): Yerçekimi kuvvetinin partikül hareketi üzerindeki etkisi, partikül çökme hızı (V_{TS}) olarak adlandırılır. Partikül çökme hızı tanımına dayanarak (Hinds, 1999), partikül havada serbest kaldığında ve hızlı bir şekilde çökme hızına ulaştığında, partikül üzerindeki havanın sürüklenme kuvveti (F_{DG}), yerçekimi kuvvetine tam olarak eşit ve tersi yönünde olmaktadır. Şöyle ki,

$$F_{DG} = F_G = mg \quad (4.46)$$

Bu denklemde F_{DG} , yerçekiminin neden olduğu partikül hareketine karşı gazın gösterdiği direnç kuvvetidir. Stokes Kanunları itibarıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$F_{DG} = 3\pi * \mu * V_{TS} * dp \quad (4.47)$$

Denklem (4.46) ve (4.47) birleştirilerek, partikül çökme hızı aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$V_{TS} = \frac{\rho_p * d_p^2 * g}{18\mu} \quad (4.48)$$

Bu denklemde, partikül yoğunluğu (ρ_p) kg/m^3 cinsinden; yerçekimi ivmesi (g) m/s^2 cinsinden; gazın viskozitesi (μ) $\text{Pa}\cdot\text{S}$ cinsinden; çap (d_p) m cinsinden ve partikül çökme hızı (V_{TS}) m/s cinsinden ifade edilmektedir. Hava kalitesi araştırmasında partikül boyutları $100 \mu\text{m}$ ' ye eşit ya da daha düşük olmasından dolayı, yerçekimi nedeniyle oluşan partikül

çökme hızı, dış girdaptaki partikül dolaşım hızı ile kıyaslandığında göz ardı edilebilir düzeydedir. ($V_{TS} \ll V_p$). Dolayısıyla, partikül üzerindeki yerçekimi kuvvetinin etkisi, önemsizdir.

Merkezkaç kuvveti (F_C): partikül ayrışımı için radyal düzlemde partikül üzerinde etkili olan bir kuvvettir. Aşağıdaki şekilde belirlenebilir;

$$F_C = m\vec{a}_r = \frac{\pi * d_p^3 * \rho_p}{6} \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \quad (4.49)$$

Sürüklenme Kuvveti (F_D): Radyal düzlem boyunca, merkezkaç kuvveti nedeniyle ortaya çıkan gaz direnç kuvveti olarak adlandırılan bir başka kuvvet daha bulunmaktadır. Stokes kanunu uygulamasında yer alan partikül Reynolds sayısının, birden ($Re < 1$) küçük olduğu varsayılmaktadır. Küresel partikül üzerindeki sürüklenme kuvveti şu şekilde ifade edilir;

$$F_D = 3\pi\mu d_p * (V_{pr} - V_{gr}) = 3\pi\mu d_p * \left(\frac{dr}{dt} - V_{gr} \right) \quad (4.50)$$

4.3.1.2. Kuvvet dengesi diferansiyel denklemi

Yukarıda belirtildiği üzere, siklon dış girdabında, radyal düzlemde partikül üzerinde etkili olan, yalnızca iki kuvvet (merkezkaç kuvveti F_C ve sürüklenme kuvveti F_D) bulunmaktadır. $F_C > F_D$ iken, partikül, toplanmak üzere, siklon duvarına doğru hareket etmektedir. Ancak, $F_C < F_D$ iken, partikül, iç girdaba hareket etmekte ve daha sonra nüfuz etmektedir. Kuvvet dengesi ($F_C = F_D$), %50 giriş olasılığı ve %50 toplanma olasılığı vermektedir. Kuvvet dengesi diferansiyel denklemi, Denklem (4.49)' un Denklem (4.50)' e eşitlenmesiyle düzenlenebilir. $F_C = - F_D$ eşitliği Denklem (4.51)' i oluşturur.

$$\left[\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] + \frac{18\mu}{\rho_p * d_p^2} \left(\frac{dr}{dt} - V_{gr} \right) = 0 \quad (4.51)$$

Bu, dış girdap alanında partikül hareketini tanımlayan genel bir kuvvet dengesi diferansiyel denklemdir. Kuvvet dengesi diferansiyel denklemi çözümü, kutupsal ($r\theta$) koordinatlarda partikül radyal kritik yörüngesini vermektedir. Söz konusu yörünge, radyal düzlemde önemli bir yoldur ve partikül çapının bir fonksiyonudur. Yukarıda belirtildiği üzere, kuvvet dengesi, %50' lik bir ihtimal tanımaktadır. Diğer bir ifade ile, bir partikül üzerindeki kuvvetin kritik yörüngede dengede olması halinde, partikül çapı d_{50} olacaktır. Kuvvet dengesi diferansiyel denklemi, siklon dış girdabında bir d_{50} dağılımı oluşturacaktır.

4.3.1.3. Dış girdap partikül kritik yörüngesi

Partikül teğetsel hızı ($r d\Phi/dt$), hava akışı teğetsel hızına (V_t) eşittir. $\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$ olduğunda kuvvet dengesi diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir;

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} - \left(\frac{V_t^2}{r} + \frac{V_{gr}}{\tau} \right) = 0 \quad (4.52)$$

Söz konusu kuvvet dengesi diferansiyel denklemi çözümü için, aşağıda yer alan öncül koşullar kullanılmaktadır:

1. $t = 0$ iken $r = r_0$ ve $r_0 =$ iç ve dış girdap ara yüz yarıçapı = dış boru yarıçapı
2. $\frac{dr}{dt} = V_{pr}$ ve $V_{pr} = 0$, $t = 0$

Diğer taraftan, aksenal düzlemde yer alan partikül yörüngesi (rz koordinatları), daha önemlidir. Bu yüzden diferansiyel Denklem (4.52), ayrıca aksenal düzlem için de

çözümlemelidir. Eksenel yöndeki partikül hareketinin doğrusal bir yol izlediği ve gazın radyal hızının sıfır olduğu varsayılmaktadır. Sonuç olarak, ivme koşulu, d^2r/dt^2 , Denklem (4.52) için göz ardı edilebilmektedir. V_t koşulu, Denklem (4,1) itibariyle belirlenmektedir. Bu yüzden, kuvvet dengesi diferansiyel denklemi, aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir;

$$\frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} = \frac{R * V_{in}^2}{r^2} \quad (r_0 < r < R) \quad (4.53)$$

Denklem (4.53)' te, $t = \frac{Z_p}{V_{pz}}$ = eksenel yönde Z mesafesinde partikül dolaşım zamanı, daha

sonra, $dt = \frac{dZ_p}{V_{pz}}$ = eksenel yönde dZ mesafesinde partikül dolaşım zamanı olur. Denklem

(4.53)' ün çözümü, aşağıda belirtilen, dış girdapta rz düzlemindeki partikül kritik radyal yörüngesini vermektedir;

$$r_p(z) = \sqrt[3]{r_o^3 + \frac{\rho_p * \pi * R * V_{in} * d_p^2}{4\mu} * Z_p} \quad (4.54)$$

4.3.1.4. Dış girdap partikül dağılımı

Yukarıda belirtildiği üzere, partikül üzerindeki kuvvet dengesi, %50 toplanma olasılığı ve %50 giriş olasılığı tanımaktadır. Diğer bir ifade ile, partikül kuvvet dengesi durumundayken siklon toplama verimi %50 olacaktır. Partikülün kuvvet dengesi durumunda olduğu durumlarda, partikül çapının d_{50} olacağına işaret edilmektedir. Aslında, d_{50} kritik ayrışma çapıdır. Partikül çapının d_{50} ' den büyük olması halinde, partikül siklon iç cidarına doğru hareket edecektir, ancak çapının d_{50} ' den küçük olması durumunda ise, partikül iç girdaba doğru hareket edecektir. Denklem (4.54)' te kritik ayrıştırıcı çapı (d_{50}) verilmiştir. Bu denklem incelendiğinde, siklon dış girdap boşluğunda, d_{50} dağılımı mevcut olduğu görülmektedir. Bu dağılım, koordinat düzlemi üzerindeki yerin (r, z), partikül yoğunluğunun, siklon tasarımın ve giriş hızının bir fonksiyonudur. Dış girdap

boşluğundaki d_{50} dağılım fonksiyonu, Denklem (4.54)'ün aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenmesi ile elde edilebilir;

$$d_{50} = \sqrt{\frac{4\mu(r_p^3 - r_o^3)}{\rho_p * \pi * R * V_{in} * Z_p}} \quad (4.55)$$

4.3.1.5. Dış girdapta partikül toplama olasılık dağılımı

Yukarıdaki analize dayanılarak, d_{50} dağılımı, dış girdapta herhangi bir noktada $P(r, z)$ kritik ayrıştırma çapını (d_{50}) tanımlamaktadır. $P(r, z)$ noktasında, partikül çapı $d > d_{50}$ ise, partikül, siklon cidarına hareket etmekte ve toplanabilmekte iken, partikül çapının $d < d_{50}$ olması halinde partikül, iç girdaba yönelecek ve girecektir. Belirli bir giriş partikül boyut dağılımı için, d_{50} 'den büyük olan tüm partiküllerin toplam giriş partiküllerine oranı, $P(r, z)$ noktasındaki partikül toplama olasılığını vermektedir. Giriş partikül boyut dağılımının, Denklem (4.56)'da gösterildiği şekilde geometrik standart sapma (GSS) ve kütle medyan çapı (KMÇ) ile lognormal bir dağılım olduğu varsayılır ise, dış girdaptaki herhangi bir $P(r, z)$ noktasında partikül toplama olasılığının belirlenmesi için Denklem (4.57) kullanılabilir.

$$F(d) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi d_p} \ln(GSS)} \exp\left[-\frac{(\ln(d_p) - \ln(KMÇ))^2}{2(\ln(GSS))^2}\right] dd_p \quad (4.56)$$

$$P(d) = \int_{d_{50}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi d_p} \ln(GSS)} \exp\left[-\frac{(\ln(d_p) - \ln(KMÇ))^2}{2(\ln(GSS))^2}\right] dd_p \quad (4.57)$$

Aslında partikül toplama olasılığı dağılımı (Denklem 4.57), dış girdaptaki partikül toplama oran dağılımını ifade etmektedir. Ayrıca, dış girdapta toplanan yoğunluk dağılımıdır.

4.3.2. Siklon kesme noktası için teorik model (d_{50})

Kuvvet denge teorisi, kesme noktası için matematiksel bir model geliştirmenin eşsiz bir yoludur. Bununla birlikte genel kuvvet denge diferansiyel denklemi (Denklem 4.51), hali hazırda çözülebilir değildir. Yaklaşık bir sonuca, bazı varsayımlara dayanarak ulaşmak mümkündür. Genel kuvvet dengesi diferansiyel denkleminin çözümünü için, Barth (1956) bazı varsayımlarda bulunmuştur. İlk olarak, partikülün radyal hızı, statik durumu dolayısıyla sıfır olarak varsayılmıştır. Ayrıca, havanın homojen bir biçimde dış girdaptan iç girdaba sızdığı varsayılmıştır. Dolayısıyla, radyal hızın içine giren hava aşağıdaki şekilde belirlenmiştir;

$$V_{gr} = \frac{Q}{\pi * D_o * Z_o} \quad (4.58)$$

Barth'ın teorik kesme modeli çözümü aşağıdaki gibidir;

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu Q}{\rho_p * \pi * V_{in}^2 * Z_o}} \quad (4.59)$$

4.3.3. Siklon genel verimi üzerine teorik model

Denklem (4.57), d_{50} 'nin kritik ayırıştırma çapı olarak yer aldığı, dış girdaptaki partikül toplama olasılığı dağılımıdır. Ara yüzeyde bulunan kritik çapın bu denklemde kullanılması halinde çıkan sonuç, siklon toplam toplama verimini oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle d_{50} 'nin kesme noktası olarak kullanıldığı Denklem (4.57), siklon toplam veriminin hesaplanmasında teorik bir model olmaktadır.

4.3.4. Gözlemlenen kesim noktası

Kuvvet dengesi analizleri ile bağlantılı temel bir problem ile karşılaşılmaktadır. Kesme noktası (Denklem 4.59) için matematiksel model, yalnızca tek bir partikül için gerçekleştirilen analize dayanmaktadır. İç PM boyut dağılımını dikkate almamaktadır.

Bununla birlikte, siklon kesme noktası, PM girişinin PBD ile değişmektedir. (Wang vd. 2001). Dolayısıyla, PBD fonksiyonu olarak bir düzeltme gereksinimi doğmaktadır.

Siklon kesme noktaları ve PBD ilişkisinin belirlenmesini teminen, Denklem (4.57), d_{50} 'nin beş farklı toz ile siklon toplam veriminin tayin edildiği, teorik bir gözlem şeklinde kullanılmıştır (Wang, 2000). 1D3D ve 2D2D siklonlar için takip edilen d_{50} Çizelge 4.12' de verilmiştir.

Çizelge 4.12. 1D3D ve 2D2D siklonlar için PBD ve ölçülmüş verimden izlenen kesme noktaları (d_{50}) (Wang, 2001)

Toz	ρ_p	PBD	1D3D		2D2D	
		KMÇ/GSS	ölçülen η_{total}	İzlenen d_{50}	ölçülen η_{total}	İzlenen d_{50}
A	1.77	20 / 2.0	99.7 %	3.00	99.6 %	3.20
B	1.82	21 / 1.9	99.3 %	4.30	98.9%	4.82
C	1.87	23 / 1.8	99.7 %	4.50	99.6 %	4.80
Mısır unu	1.52	19 / 1.4	99.3 %	8.25	99.2 %	8.50
Uçucu kül	2.73	13 / 1.7	96.8%	4.85	95.5 %	5.25

- PBD: partikül boyut dağılımı
- Tozlar A, B, ve C, farklı pamuk işlemlerinden alınan ince pamuk tiftik tozlarıdır. 100 μm ' lik açıklıkları bulunan bir yüzey vasıtasıyla geçmektedir.
- KMÇ: kütle medyan çapı (μm)
- GSS: geometrik standart sapma
- ρ_p : partikül yoğunluğu (g/cm^3)
- Ölçülen η_{total} : bir önceki araştırmadan ölçülen genel siklon verimi (Wang, 2000).
- İzlenen d_{50} : d_{50} (μm), genel verime eşit p (d) düzenlemesi itibarıyla Denklem (4.56)' dan elde edilmiştir.

Çizelge 4.12, bir siklona ilişkin kesme noktasının, PBD ile değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu, bir önceki deneysel araştırmada Wang (2000) tarafından ortaya konan

gözlem ile aynıdır. Çizelge 4.13, izlenen d_{50} ve deneysel d_{50} sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 4.13’ te verilen sonuçlar, bir siklon kesme noktasının, giriş tozu PBD’ ye ilişkin GSS ve KMC’ nin bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymaktadır. GSS’ nin 1.5’ ten büyük olması halinde, KMC’ de meydana gelen artış ile kesme noktaları düşerken tozlar GSS’ nin 1.5’ den düşük olması halinde, kesme noktaları, KMC’ de meydana gelen artış ile yükselmektedir.

Çizelge 4.13. Deneysel kesme noktaları ile izlenen kesme noktalarının karşılaştırılması (Wang, 2001)

Toz	1D3D		2D2D	
	İzlenen d_{50}	Deneysel d_{50}	İzlenen d_{50}	Deneysel d_{50}
A	3.00	2.50	3.20	2.74
B	4.30	3.55	4.82	3.75
C	4.50	3.34	4.80	3.60
Mısır unu	8.25	---	8.50	---
Uçucu kül	4.85	4.25	5.25	4.40

- İzlenen d_{50} : d_{50} (μm), genel verimi eşit P (d) düzenlemesi itibariyle Denklem (4.56)’ dan elde edilmektedir.
- Tozlar A, B, ve C, farklı pamuk işlemlerinden alınan ince pamuk tiftik tozlarıdır. 100 μm ’ lik açıklıkları bulunan bir yüzey vasıtasıyla geçmektedir.
- Deneysel d_{50} (μm), PBD ve iç/giriş ve dış/çıkış yoğunluğunun deneysel ölçümlerinden hesaplanan deneysel kesirsel verim eğrilerinden belirlenmektedir (Wang 2000).
- Deneysel d_{50} mısır unu için mevcut değildir.

4.3.5. Partikül boyut dağılımı için düzeltilen d_{50} modeli

Barth modeli (Denklem 4.59) kullanılmak suretiyle elde edilen kesme noktaları ve Denklem (4.57) kullanılarak çözümlenen gözlemlenen kesim noktaları ve farklı tozlar için ölçülen genel verim karşılaştırmaları, Çizelge 4.14’ te gösterilmektedir. Barth modelindeki

kesme noktaları, deneysel araştırma ile tutarlı olmayacak şekilde, PBD ile değişmemektedir.

Çizelge 4.14. Teorik modelden elde edilen (Barth modeli) kesme noktaları ile izlenen kesme noktaları karşılaştırması (Wang, 2001)

Toz	1D3D		2D2D	
	İzlenen d_{50}	Barth d_{50}	İzlenen d_{50}	Barth d_{50}
A	3.00	3.58	3.20	3.46
B	4.30	3.58	4.82	3.46
C	4.50	3.58	4.80	3.46
Mısır unu	8.25	3.58	8.50	3.46
Uçucu kül	4.85	3.58	5.25	3.46

- İzlenen d_{50} : d_{50} (μm), genel verime eşit P (d) düzenlemesi itibariyle Denklem (4.56)' dan elde edilmektedir.
- Tozlar A, B, ve C, farklı pamuk işlemlerinden alınan ince pamuk tiftik tozlarıdır. 100 μm ' lik açıklıkları bulunan bir yüzey vasıtasıyla geçmektedir.
- Barth d_{50} , AEC' de Denklem (4.59) itibariyle belirlenmektedir.

Kesme noktası hesaplamalarında PBD etkisinin belirlenmesi amacıyla teorik d_{50} modelinin düzenlenmesi için bir kesme noktası düzeltme faktörü (K) belirlenmesine ihtiyaç vardır. Çizelge 4.15, izlenen d_{50} ve Barth d_{50} dayalı olarak K değerlerini listelemektedir. K değerinin, KMÇ ve GSS' nin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. K ile KMÇ ve GSS ilişkisinin belirlenmesini için bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Denklem (4.60) ve (4.61), Çizelge 4.15' teki verilere dayanarak, regresyon uyumunun sonuçlarını göstermektedir. Bu analizden, GSS' nin, K üzerindeki etkisinin KMÇ' den daha fazla olduğu sonucu anlaşılmaktadır.

$$K_{1D3D} = 5.3 + 0.02 * KMÇ - 2.4 * GSS \quad (4.60)$$

$$K_{2D2D} = 5.5 + 0.02 * KMÇ - 2.5 * GSS \quad (4.61)$$

Çizelge 4.15. Farklı tozlar ile 1D3D ve 2D2D siklonlar için kesme noktası düzeltme faktörü (Wang, 2001)

Toz	PBD		Kesme noktası düzeltme faktörü (K)	
	KMÇ	GSS	1D3D	2D2D
A	20	2.0	0.84	0.92
B	21	1.9	1.20	1.39
C	23	1.8	1.26	1.39
Mısır unu	19	1.4	2.31	2.46
Uçucu kül	13	1.7	1.36	1.52

- PBD: partikül boyut dağılımı
- Tozlar A, B, ve C, farklı pamuk işlemlerinden alınan ince pamuk tiftik tozlarıdır. 100 µm' lik açıklıkları bulunan bir yüzey vasıtasıyla geçmektedir.
- KMÇ: kütle medyan çapı (µm) / PBD
- GSS: geometrik standart sapma

Barth d_{50} modeline kesme noktası düzeltme faktörü eklenmesi ile, siklon kesme noktası, düzeltilmiş teorik kesme noktası modeli olarak başvuru olan Denklem (4.62) itibariyle belirlenebilmektedir.

$$d_{50} = K \sqrt{\frac{9\mu Q}{\rho_p * \pi * V_{in}^2 * Z_o}} \quad (4.62)$$

Kesme noktası modelinin düzeltilmesi için bu araştırmada kullanılan teori ve metodoloji, siklon genel veriminin hesaplanmasında, kesirsel bir verim eğrisi geliştirmenin gerekli olmadığını ortaya koymaktadır. Siklon veriminin hesaplanması süreci, aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir;

1. Siklon giriş tozu PBD' sinin elde edilmesi.
2. Denklem (4.60) ve (4.61) ile verilen farklı siklon tasarımı için kesme noktası

düzeltilme faktörünün hesaplanması..

3. Düzeltilmiş d_{50} modelinin (Denklem 4.62) kullanılması suretiyle kesme noktasının belirlenmesi.
4. Düzeltilmiş kesme noktası ve PBD' nin Denklem (4.57)' de kullanılarak genel verimin bulunması.

Siklon dış girdabında partikül hareketi, kuvvet dengesi türevsel denkleminin kurulmasını teminen, bu bölümde analiz edilmiştir. Barth' ın “statik partikül” teorisi kuvvet dengesi denklemi ile birleştirilmiş ve siklon dış girdabı toplama olasılık dağılımı ve siklon kesme noktası modelleri için teorik analizler uygulanmıştır. Farklı tozlar için siklon kesme noktaları, siklon genel veriminin hesaplaması için teorik model ve ölçülmüş siklon genel toplama verimi izlenmiştir. Uçucu kül ile 1D3D ve 2D2D siklonları için kesme noktaları teorik tahminlemeleri, 4.85 μm ve 5.25 μm olarak elde edilmiştir. Bu bölümdeki teorik çalışma kullanılarak, aşağıdaki temel gözlemler elde edilir:

1. İzlenen kesme noktaları, PBD (KMÇ ve GSS) tozlarının bir fonksiyonudur.
2. Teorik d_{50} modelin (Barth model), PBD için düzenlenmesi gerekmektedir.
3. 1D3D ve 2D2D siklonlar için kesme noktası düzeltme faktörleri (K) deneysel kesme noktaları ve teorik olarak izlenen kesme noktalarından, regresyon uygunluğu yoluyla geliştirilmiştir.
4. Bu çalışmada geliştirilen teorik genel verim modeli, düzeltilmiş d_{50} ve PBD ile siklon toplam veriminin hesaplaması için kullanılabilir. Toplam verim hesaplanmasında kesirsel verim eğrilerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Söz konusu araştırmaya ilişkin sonuçlar, enerji tüketimi ve verimi açısından kapsamlı bir tasarım süreci olan Texas A&M siklon tasarımına uzanmaktadır. Temel olarak, siklon tasarım sürecinde aşağıdaki adımlar yer almaktadır:

1. Siklon tasarım hızı:

1D3D: $16 \text{ m/s} \pm 2 \text{ m/s}$ standart hava

2D2D: $15 \text{ m/s} \pm 2 \text{ m/s}$ standart hava

1D2D: $12 \text{ m/s} \pm 2 \text{ m/s}$ standart hava

2. Siklon boyutlandırması:

Hava akış oranı ve siklon tasarım hızı, bir siklonun boyutlandırılmasında ana kriterlerdir. Denklem (2.9), standart hava akım oranı ve giriş hızının kullanılması itibariyle siklon çapının belirlenmesi için kullanılabilir.

3. Siklon toplama verimliliğinin belirlenmesi:

Toplama verimliliği belirlenmesinde aşağıda yer alan alt basamaklar kullanılmaktadır:

a. KMÇ ve GSS elde edilmesi için partikül boyut dağılımının belirlenmesi

b. Denklem (4.60) ve (4.61) itibariyle kesme noktası düzeltme faktörünün belirlenmesi

c. Denklem (4.62) itibariyle kesme noktası belirlenmesi.

d. Denklem (4.57) itibariyle siklon genel veriminin belirlenmesi.

4. Denklem (2.10) veya Denklem (4.30), (4.31), (4.36), (4.38), (4.40) ve (4.41) itibariyle siklon basınç düşümünün belirlenmesi.

Son yıllarda siklon koni bölümünün altında, malzemenin alındığı ve boşaltıldığı bölgeler arasında hava akışını engellemesi için yıldız besleyici ismi verilen döner çarklı vericiler kullanılmaktadır. Yıldız besleyiciler, pnömatik iletim sistemlerinin önemli bir bileşenidir. Çeşitli granül, tanecik, veya toz halindeki malzemenin silo, bunker, siklon, mikser gibi yerlerden akışını kontrol ederler (Anonim, 2018). Yıldız besleyicilerin siklon sistemlerindeki diğer bir görevi ise, hava akışının sistemi direkt olarak terk etmesini engellemektir. Bu sayede siklon içerisinde daha kararlı iç ve dış girdaplar oluşur ve siklon verimi artar.

Bu araştırmada, hava akışı dolaşım mesafesi ve dönüş sayısının hesaplanmasına ilişkin yeni bir teorik model geliştirilmiştir. Akış profili ve siklon boyutları, bir siklonun dış girdabında hava akışı dolaşım mesafesini belirlemektedir. Farklı siklon ebatları için verimli dönüş sayısı, hava akışı dolaşım mesafesi ve siklon boyutlarına göre hesaplanmıştır. Teorik hesaplamalara göre verimli dönüş sayısı, siklon tasarımı itibarıyla belirlenmekte ve siklon çapı ve giriş hızından bağımsız bulunmaktadır. Hem 1D3D hem de 2D2D siklonlar için 6.13 dönüş mevcut iken, 1D2D için 2.67 dönüş bulunmaktadır.

Siklon basınç düşümü, beş adet bağımsız basınç düşümü bileşeninden oluşmaktadır. Dış girdaptaki sürtünme kaybı ve siklondaki dönel kayıp, en önemli basınç düşüm bileşenleridir. Beş farklı siklon ebadı için (0.1 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.6 m ve 0.9 m) gerçekleştirilen teorik analizler, siklon basıncının çapından bağımsız olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, siklon basınç düşümü, siklon yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Yeni teorik model, hava akışı dolaşım mesafesi, dönüş sayısı ve siklon basınç düşümünün tahmin edilmesinde kullanılabilir. 1D3D, 2D2D ve 1D2D siklon tasarım için; basınç düşüm tahminleri, kendi tasarım giriş hızlarında (16 m/s, 15 m/s ve 12 m/s); sırasıyla, 1071 Pa, 854 Pa ve 390 Pa şeklindedir.

- Takip edilen kesme noktaları, siklon kesme noktalarının fonksiyonu olduğunu ortaya koymaktadır.
- Teorik d_{50} modeli (Barth model), PBD için düzeltilmeyi gerektirmektedir.
- 1D3D ve 2D2D siklon için kesme noktası düzeltme faktörü (K), deneysel kesme noktaları ve teorik kesme noktalarından, regresyon yoluyla geliştirilmiştir.

- Düzeltilmiş d_{50} , GSS' ye, KMÇ' den daha duyarlıdır.

Araştırmada geliştirilen yeni teorik modellere ilişkin özet denklemler aşağıda belirtilmektedir.

Gövde bölümünde dolaşım mesafesi:

- $L_1 = 1.53 \pi D_c = 4.8 D_c$ (1D3D)
- $L_1 = 3.06 \pi D_c = 9.6 D_c$ (2D2D) (4.24)
- $L_1 = 1.66 \pi D_c = 5.2 D_c$ (1D2D)

Koni bölümünde dolaşım mesafesi:

- $L_2 = 10.83 D_c$ (1D3D)
- $L_2 = 7.22 D_c$ (2D2D) (4.27)
- $L_2 = 2.57 D_c$ (1D2D)

Verimli dönüş sayısı:

- $N_{e1} = \frac{L_1}{\pi * D_c}$ (Gövdede) (4.28)

- $N_{e2} = \frac{L_2}{\pi \left(\frac{D_c + D_0}{2} \right)}$ (Konide) (4.29)

Siklon basınç düşümü:

$$\bullet \quad \Delta P_{\text{total}} = \Delta P_e + \Delta P_k + \Delta P_f + \Delta P_r + \Delta P \quad (4.42)$$

Gövde bölümünde sürtünme basınç düşümü:

$$\bullet \quad \Delta P_{f1} = \int_0^{L_1} f * \frac{VP_{s1}}{D_{s1}} dL = \int_0^{Z_1} f * \frac{VP_{s1}}{D_{s1}} * V_1 * \frac{dZ}{V_{z1}} \quad (4.34)$$

$$\Delta P_{f1} = 0.13 * VP_{s1} = 0.14 * VP_{in} \quad (1D3D)$$

$$\Delta P_{f1} = 0.27 * VP_{s1} = 0.28 * VP_{in} \quad (2D2D) \quad (4.36)$$

$$\Delta P_{f1} = 0.14 * VP_{s1} = 0.15 * VP_{in} \quad (1D2D)$$

Koni bölümünde sürtünme basınç kaybı:

$$\bullet \quad \Delta P_{f2} = \int_0^{L_2} f \frac{VP_{s2}}{D_{s2}} dL = \int_{Z_{o2}}^0 f \frac{VP_{s2}}{D_{s2}} * V_2 \frac{dZ}{V_{z2}} \quad (4.38)$$

Dönel basınç kaybı:

$$\bullet \quad \Delta P_r = \rho V_{in}^2 \left(\frac{R}{r_0} - 1 \right) \quad (4.40)$$

$$\Delta P_r = 2 VP_{in} \quad (1D3D \text{ ve } 2D2D \text{ için})$$

$$\Delta P_r = 1.22 VP_{in} \quad (1D2D \text{ için})$$

Genel verim modeli:

$$\bullet \quad P(d) = \int_{d_{50}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi d_p} \ln(GSS)} \exp\left[-\frac{(\ln(d_p) - \ln(KM\zeta))^2}{2(\ln(GSS))^2}\right] dd_p \quad (4.57)$$

Siklon toplama verimi:

$$\bullet \quad K_{1D3D} = 5.3 + 0.02 * MMD - 2.4 * GSD \quad (4.60)$$

$$\bullet \quad K_{2D2D} = 5.5 + 0.02 * MMD - 2.5 * GSD \quad (4.61)$$

$$\bullet \quad d_{50} = K \sqrt{\frac{9\mu Q}{\rho_p * \pi * V_{in}^2 * Z_o}} \quad (4.62)$$

Bu araştırmada geliştirilen teorik genel verim modeli, d50 ile siklon toplam veriminin hesaplamasında kullanılabilir. Toplam verim hesaplanmasında, kesirsel verim eğrilerine gereksinim duyulmamaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anonim, 2015, <http://www.tkmmakina.com.tr/tr/siklon.html>, Erişim tarihi: 26.07.2018.
- Anonim, 2018, http://www.polimak.com/Yildiz_Besleyici.htm, Erişim tarihi: 21.07.2018.
- Barth, W., 1956, Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations, *Brennstoff-Warme-Kraft*, 8: 1-9.
- First, M.W., 1950, Fundamental Factors in the Design of Cyclone Dust Collectors, Ph.D. dissertation. Cambridge, Mass., Harvard University. p.72-81.
- Hinds, William C., 1999. *Aerosol Technology*, New York: John Wiley & Sons.
- Kaspar, P., Mihalski, K.D., Parnell, C.B.Jr., 1993, Evaluation and development of cyclone design theory, In Proc. 1993 Beltwide Cotton Production Conferences. New Orleans, La. National Cotton Council.
- Lapple, C.E., 1951, Processes use many collector types, *Chemical Engineering*, 58(5):144-151.
- Leith, D., Licht ,W., 1972, The collection efficiency of cyclone type particle collectors – A new theoretical approach, *AIChE Symposium Series* 126, 68: 196-206.
- Leith, D., Mehta D., 1973, Cyclone performance and design *Atmospheric Environ*, 7: 527-549.
- Mihalski, K., Kaspar P., Parnell, C.B.Jr., 1993, Design of pre-separators for cyclone collectors. In Proc. 1993 Beltwide Cotton Production Conferences, p.1561-1568.
- Parnell, C.B.Jr., 1990, Cyclone design for cotton gins, ASAE Paper No: 905102, Presented at the 1990 ASAE International Winter Meeting, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Parnell, C.B.Jr., 1996, Cyclone design for air pollution abatement associated with agricultural operations, In Proc. 1996 Beltwide Cotton Production Conferences, Nashville, Tenn.: National Cotton Council.
- Parnell, C.B.Jr., Davis, D.D., 1979, Predicted effects of the use of new cyclone designs on agricultural processing particle emissions, Presented at 1979 Southwest Region Meeting of the ASAE, Hot Springs, Arkansas, p.79-89.
- Shepherd, C.B., Lapple, C. E., 1939, Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors, *Industrial and Engineering Chemistry*, 31(8): 972-984.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Simpson, S., Parnell, C.B.Jr., 1995, New low-pressure cyclone design for cotton gins, In Proc. 1995 Beltwide Cotton Production Conferences, Memphis, Tenn.: National Cotton Council.
- Stairmand, C.J., 1949, Pressure drop in cyclone separators, Industrial and Engineering Chemistry, 16(B): 409-411.
- Stairmand, C.J., 1951, The design and performance of cyclone separators, Transactions of Chemical Engineers, 29(1): 356-373.
- Ter Linden, A.J., 1949, Investigation into cyclone dust collectors, Institute Mechanical Engineering. 160: 233-240.
- Wang, L., Parnell, C.B.Jr., Shaw, B.W., 1999, Performance characteristics for the 1D2D, 2D2D, 1D3D and barrel cyclones, Presented at the 1999 ASAE Annual Meeting, Toronto, Canada, p.99-4195.
- Wang, L., 2000, A new engineering approach to cyclone design for cotton gins, M.S. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Texas A&M University.
- Wang, L., Parnell, C.B.Jr., Shaw, B.W., 2000, 1D2D, 1D3D, 2D2D cyclone fractional efficiency curves for fine dust, In Proc. 2000 Beltwide Cotton Production Conferences, San Antonio, Tex.: National Cotton Council.
- Wang, L., Parnell, C.B.Jr., Shaw, B.W., 2001, A new theoretical approach for predicting number of turns and cyclone pressure drop, Presented at the 2001 ASAE Annual Meeting, Sacramento, California, p.21-4009.

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklamalar – A : Koni Bölümüne Dair Dolaşım Mesafesi Hesapları

Ek Açıklamalar – B : Koni Bölümüne Dair Sürtünme Basınç Düşümü Hesapları

Ek Açıklamalar – A : Koni Bölümüne Dair Dolaşım Mesafesi Hesapları

$$D_1 = 0,1 \text{ m} \quad D_2 = 0,2 \text{ m} \quad D_3 = 0,3 \text{ m} \quad D_4 = 0,6 \text{ m} \quad D_5 = 0,9 \text{ m}$$

1D3D siklon tasarımı için:

$$L = \int_0^{2D} \sqrt{\left(\frac{1}{Z+2D}\right)^2 + \left[\frac{1}{\pi(Z+4D)}\right]^2 + \left[\frac{1}{\pi(8Z+32D)}\right]^2} * \pi(Z+4D) * dZ$$

$$L_1 = 1,08 \text{ m} = 10,83D \quad L_3 = 3,25 \text{ m} = 10,83D \quad L_5 = 9,75 \text{ m} = 10,83D$$

$$L_2 = 2,17 \text{ m} = 10,83D \quad L_4 = 6,49 \text{ m} = 10,83D$$

2D2D siklon tasarımı için:

$$L = \int_0^{\frac{4}{3}D} \sqrt{\left(\frac{1}{3Z+4D}\right)^2 + \left[\frac{1}{\pi(3Z+8D)}\right]^2 + \left[\frac{1}{\pi(48Z+128D)}\right]^2} * \pi(3Z+8D) * dZ$$

$$L_1 = 0,72 \text{ m} = 7,22D \quad L_3 = 2,17 \text{ m} = 7,22D \quad L_5 = 6,49 \text{ m} = 7,22D$$

$$L_2 = 1,44 \text{ m} = 7,22D \quad L_4 = 4,33 \text{ m} = 7,22D$$

1D2D siklon tasarımı için:

$$L_1 = \int_{1.375D_1}^{1.5D_1} 13\pi \sqrt{\left(\frac{D_1}{2Z+5D_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{13\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{104\pi}\right)^2} dZ +$$

$$\int_0^{1.375D_1} \sqrt{\left(\frac{1}{4Z+10D_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\pi(3Z+15D_1)}\right)^2 + \left(\frac{1}{\pi(24Z+120D_1)}\right)^2} * (3Z+15D_1) * dZ$$

$$L_1 = 0,26 \text{ m} = 2,565D \quad L_3 = 0,77 \text{ m} = 2,565D \quad L_5 = 2,31 \text{ m} = 2,565D$$

$$L_2 = 0,51 \text{ m} = 2,565D \quad L_4 = 1,54 \text{ m} = 2,565D$$

Ek Açıklamalar – B : Koni Bölümüne Dair Sürtünme Basınç Düşümü Hesapları

$$D_1 = 0,1 \text{ m} \quad D_2 = 0,2 \text{ m} \quad D_3 = 0,3 \text{ m} \quad D_4 = 0,6 \text{ m} \quad D_5 = 0,9 \text{ m}$$

1D3D siklon tasarımı için:

- $V_{in} = 5 \text{ m/s}$ iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.0076 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 35 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 8 \text{ m/s}$ iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.0171 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 78,7 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 10 \text{ m/s}$ iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.0305 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 140 \text{ Pa}$$

• $V_{in} = 13$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.0476 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 219 \text{ Pa}$$

• $V_{in} = 15$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.0686 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 315 \text{ Pa}$$

• $V_{in} = 16$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.078 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 358 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 18$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D_1} \frac{0.0934 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 430 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 20$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{2D} \frac{0.122 \left[\left(\frac{Z+4D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{4D}{Z+2D} \right)^2 + \left[\frac{4D}{\pi(Z+4D)} \right]^2 + \left[\frac{D}{\pi(2Z+8D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{4(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 561 \text{ Pa}$$

2D2D siklon tasarımı için:

- $V_{in} = 5$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.006 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 22,7 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 8$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.014 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 52,5 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 10$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.025 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 93,9 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 13$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.039 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 146,7 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 15$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.056 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 210,4 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 16$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.064 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 240,5 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 18$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.076 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 285,6 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 20$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{\frac{4}{3}D} \frac{0.1 \left[\left(\frac{3Z+8D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{3Z+4D} \right)^2 + \left[\frac{8D}{\pi(3Z+8D)} \right]^2 + \left[\frac{3D}{\pi(6Z+16D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{8(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 375,7 \text{ Pa}$$

1D2D siklon tasarımı için:

- $V_{in} = 5$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.007 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 14,7 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 8$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.015 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 31,6 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 10$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.026 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 55 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 12$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.038 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 80,4 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 15$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.059 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 124,7 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 16$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.068 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 143,7 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 18$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.081 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 171,3 \text{ Pa}$$

- $V_{in} = 20$ m/s iken;

$$\Delta P = \int_0^{1.5D} \frac{0.106 \left[\left(\frac{3Z+15D}{\sqrt{Z}} \right) \right] * \left\{ \left(\frac{8D}{2Z+5D} \right)^2 + \left[\frac{2D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 + \left[\frac{16D}{\pi(3Z+15D)} \right]^2 \right\}^{\frac{7}{4}}}{16(D)^{\frac{3}{2}}} * dZ$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 = \Delta P_4 = \Delta P_5 = 224 \text{ Pa}$$