



TOZ TOPLAMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Şeyda BEYPAZARLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şeyda BEYPAZARLI

22/06/2021

TOZ TOPLAMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Şeyda BEYPAZARLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HAZİRAN 2021

ÖZET

Kontrolsüz olarak atmosfere bırakılan tozlar ve gazlar hava kirliliğinin en önemli etmenidir. Hava kirletici gazlar üretim sırasında ortaya çıktıklarında belirli limitin üzerinde ise dış ortama egzoz edilemezler. Hava içerisindeki toz, duman gaz gibi hava kirleticiler toz toplama sistemiyle emilir ve filtre edilerek dış ortama aktarılır. Malzemenin başka proseslere gönderilmesi, ezilmesi, karıştırılması ve paketlenmesi gibi endüstriyel işlerin fazla miktarda toz üretmesi insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. Bu ortamlarda hava kirletici miktarının zarar vermeyecek seviyelere getirilmesi için toz toplama sistemleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında ilk bölümde toz toplama sistemleri türleri araştırılmıştır. Toz toplama sisteminin performansına etki eden parametreler incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda bütünleşik iki kademeli bir toz toplama sistemi tasarımı yapılmıştır. Tasarım analiz edilerek klasik bir toz toplama sistemi ile karşılaştırılmıştır. İki sistemin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. Klasik sistemde hava girişi toz toplama ünitesinin altından, hava çıkışı üst kısımdan gerçekleştirilir ve filtreler dikey konumlandırılmıştır. Yeni sistemde bütünleşik iki kademeli bir toz toplama sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan toz toplama sisteminde hava girişi üst kısımdan gerçekleştirilerek ön filtreleme mekanizmasına yönlendirilmiştir. Analizler sonucunda toz toplama sistemindeki filtre iç merkez hava hızları klasik sistemde 7,38 m/s, yeni tasarlanan sistemde 6,69 m/s olduğu görülmektedir.

Bilim Kodu : 92808
Anahtar Kelimeler : Toz toplama, havalandırma, filtreleme sistemi
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

DUST COLLECTION SYSTEM DESIGN AND ANALYSIS

(M. Sc. Thesis)

Şeyda BEYPAZARLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

The most important factors of air pollution are uncontrolled dust and gases released into the atmosphere. The air pollutant gases when they occur during production above certain limits cannot be exhaust to the outside. Air pollutants such as dust and smoke in the air are absorbed and filtered by the dust collection system and transferred to the outside environment. The large amount of dust produced by industrial works such as sending the material to other processes, crushing, mixing and packaging adversely affects human health and the environment. Dust collection systems are used in these environments to bring the amount of air pollutants to non-harmful levels. In this thesis, the types of dust collection systems were investigated in the first chapter. The parameters affecting the performance of the dust collection system were examined. As a result of the researches, a combined two-stage dust collection system was designed. The design was analyzed and compared to a classical dust collection system. Computational fluid dynamics analysis of the two systems were made. In the classical system of the dust collection unit, the air inlet is from the bottom, the air outlet is from the upper part, and the filters are positioned vertically. In the new system, an integrated two-stage dust collection system is designed. In this dust collection system, the air intake is made from the upper part and is directed to the pre-filtering mechanism. As a result of the analyzes, it is seen that the filter inner center air velocities in the dust collection system are 7.38 m/s in the classical system and 6.69 m/s in the newly designed system.

Science Code : 92808

Key Words : Dust collection, ventilation, filtration system

Page Number : 69

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında katkılarını, desteklerini ve ilgisini esirgemeyen çok değerli ve saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. TOZ TOPLAMA SİSTEMİ GENEL BİLGİLER	9
3.1. Toz Toplama Sistemi Tipleri.....	9
3.1.1. Yerçekimi ayırıcılar (düşme kutuları)	9
3.1.2. Santrifüjlü toplayıcılar veya siklonlar	10
3.1.3. Torbalı toplayıcılar.....	12
3.1.4. Kartuş toplayıcılar.....	13
3.1.5. Islak yıkayıcılar.....	15
3.1.6. Elektrostatik çökelticiler (ESPs)	15
3.2. Havadaki Kirleticiler	16
3.3. Filtreler.....	18
3.3.1. Filtrasyon mekanizmaları.	19
3.3.2. Toz toplamada kullanılan filtre tipleri	24
3.3.3. Toz toplamada kullanılan filtre standartları.	27

	Sayfa
3.4. Fanlar.....	31
3.4.1. Eksenel akışlı fanlar.....	31
3.4.2. Santrifüj fanlar.	32
3.4.3. Diğer fanlar.....	33
3.5. Temizleme Mekanizmaları	34
3.5.1. Çalkalayarak temizleme.	34
3.5.2. Ters hava ile temizleme.....	36
3.5.3. Darbeli jet ile temizleme.	37
4. TOZ TOPLAMA SİSTEMİ TEORİK ANALİZİ.....	39
5. TOZ TOPLAMA SİSTEM TASARIMI VE HAD ANALİZİ	51
5.1. Toz Toplama Sistem Tasarımı	51
5.2. HAD Analizi	54
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	61
KAYNAKLAR	63
EKLER	67
EK-1.Parçacık Özellikleri.....	68
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Hava kalitesi indeksi.....	2
Çizelge 3.1. Hava kirleticilerin boyut dağılımı ve özellikleri.....	17
Çizelge 3.2. EN 779:2012 standardına göre sınıflandırma	28
Çizelge 3.3. ISO 1690:2016 standardına göre sınıflandırma	29
Çizelge 3.4. ASHRAE 52.2:2012 partikül boyut aralığı	30
Çizelge 3.5. ASHRAE 52.2:2012 filtre verim sınıflandırma.....	30
Çizelge 4.1. Türbülanslı schmidt sayıları	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Bir ağırlık ayırıcısının tipik tasarımının gösterimi (düşme kutusu).....	10
Şekil 3.2. Bir siklon toz toplayıcı tipik tasarımının gösterimi	11
Şekil 3.3. Bir torbalı toz toplayıcı tipik tasarımının gösterimi	13
Şekil 3.4. Tipik dikey montajlı kartuş toplayıcı.....	14
Şekil 3.5. Bir ıslak yıkayıcılı toz toplayıcı tipik tasarımının gösterimi	15
Şekil 3.6. Kek filtrasyonu	20
Şekil 3.7. Derinlik filtrasyonu.....	21
Şekil 3.8. Elek etkisi	22
Şekil 3.9. Atalet etkisi	22
Şekil 3.10. Yakalanma etkisi	23
Şekil 3.11. Difüzyon etkisi.....	23
Şekil 3.12. Belirli bir filtre için çeşitli filtrasyon mekanizmalarının tanecik çapına göre filtrasyon verimine etkisi	24
Şekil 3.13. Filtre performansı	26
Şekil 3.14. EN 779:2012 standardındaki örnek filtre için verim eğrisi	28
Şekil 3.15. Kanatlı eksenel fan	34
Şekil 3.16. Mekanik çalkalayıcılar.....	35
Şekil 3.17. Ters hava ile temizleme	37
Şekil 3.18. Darbeli jet ile temizleme.....	37
Şekil 3.19. Normal filtrasyon sırasında (solda) birikme ve filtre temizlik sırasında tozun yerinden çıkması (sağda)	38
Şekil 4.1. N_{ay} sayısına göre, silindir, küre ve şerit şeklindeki lif verim değişimleri	40
Şekil 4.2. EN 779:2012 standardındaki örnek filtre için basınç düşüm eğrisi.....	42
Şekil 4.3. Darcy denklemleri arasındaki fark.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Fan eğrisinin sistem eğrisi ile kesişimi.....	46
Şekil 5.1. Filtre fark basınç ve debi grafiği.....	51
Şekil 5.2. Yeni sistem ekipmanları	52
Şekil 5.3. Klasik sistem ekipmanları.....	52
Şekil 5.4. Yeni sistem ölçülendirme	53
Şekil 5.5. Klasik sistem ölçülendirme.....	53
Şekil 5.6. Klasik ve yeni sistemler için HAD malzeme tanımlama.....	54
Şekil 5.7. Klasik ve yeni sistemler için HAD sınır giriş şartı	54
Şekil 5.8. Klasik ve yeni sistemler için HAD sınır çıkış şartı.....	55
Şekil 5.9. Klasik ve yeni sistemler için çözüm ağı	55
Şekil 5.10. Klasik sistem hava hızları dağılımı.....	56
Şekil 5.11. Yeni sistem hava hızları dağılımı	57
Şekil 5.12. Sistemlerde ölçüm alınan filtreler.....	57
Şekil 5.13. Filtre pile hava hızları dağılımı.....	58
Şekil 5.14. Filtre iç merkez hava hızları dağılımı	59
Şekil 5.15. Filtre dış 1. bölge hava hızları dağılımı	59
Şekil 5.16. Filtre dış 2. bölge hava hızları dağılımı	60

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Bez filtreler	25
Resim 3.2. Kartuş filtreler.....	25
Resim 3.3. Duvara monte fanlar	31
Resim 3.4. Solda boru eksenel fan, sağda kanatlı eksenel fan.....	32
Resim 3.5. Santrifüj fan	33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
σ	Türbülanslı bir prandtl sayısı
μ	Gaz dinamik viskozitesi (kg/m.s)
a	İvme (m/s^2)
A	Filtreleme alanı (m^2)
A_m	Ortalama partikül tutma verimi (%)
C	Cunninggum düzeltme katsayısı
D	Partikül çapı (μm)
D_k	Genel akış hızı dengesiz genliği
D_{ki}	Maksimum akış hızı dengesiz genliği
D_{lif}	Filtre lif çapı (μm)
e	Filtrasyon verimi (%)
E_m	0,4 μm çapındaki partikül tutma verimi (%)
$F_{y-atalet}$	Taneciğe etki eden atalet kuvveti (N)
$F_{y-direnç}$	Taneciğe etki eden direnç kuvveti (N)
K	Darcy geçirgenlik katsayısı
k_b	Boltzman sabiti
K_{loss}	Kaybedilen geçirgenlik katsayısı
L	Uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
m_d	Alt hava akış alanında kirletici miktarı (kg)
m_u	Üst hava akış alanında kirletici miktarı (kg)
N_{ay}	Ayrılma katsayısı
ϕ	Taneciklerin Yayılımı (m^2/s)
Q	Hava debisi (m^3/s)
Re	Reynolds sayısı
T	Mutlak sıcaklık (K)
U	x yönündeki hız komponenti

Simgeler**Açıklamalar**

V	y yönündeki hız komponenti
V_{y-gaz}	Gaz hızı (m/s)
V_{y-toz}	Toz hızı (m/s)
W	z yönündeki hız komponenti
α	Geçirgenlik (1/m ²)
ΔP	Basınç düşüşü (Pa)
Δt	Tozun geçme süresi aralığı (s)
η_{D+Y}	Difüzyon ve yakalama verimi
η_{fan}	Fan verimi (%)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ν	Gaz kinematik viskozitesi (m ² /s)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

A/C	Hava filtreleme alanı oranı (m/s)
EPA	Amerika Birleşik Devletleri çevre koruma ajansı
ESPs	Elektrostatik çökelticiler
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
ISO	Uluslararası standardizasyon örgütü
IUPAC	Atmosferik kimya terimleri sözlüğü
PM	Partiküler madde
WHO	Dünya sağlık örgütü

1. GİRİŞ

Dünya’da endüstrinin hızla gelişmesiyle beraber hava kirliliğinde büyük bir artış gözlenmiş ve bu durum insan sağlığı için büyük bir tehdit haline gelmiştir. Kontrolsüz olarak atmosfere bırakılan tozlar ve gazlar hava kirliliğinin en önemli etmenidir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), “İnsan, bitki, hayvan veya madde üzerine zarar verebilen veya rahat yaşam şeklini (konfor) ve maddeyi aşırı şekilde etkileyen kum, toz, uçucu kül, kurum, is, duman, buğu, tütsü, sis, pus, buhar, gaz veya koku gibi bileşenlerin miktar, karakteristik ve süre olarak çevre atmosferindeki varlığıdır.” şeklinde açıklayarak hava kirliliğini tanımlamaktadır [1].

Partiküler madde (PM) hava kalitesini negatif yönde etkileyen en ön nemli kirletici kaynaklardan bir tanesidir. Altı yayın kirleticiler olarak Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından bildirilen kirleticilerden bir tanesidir. Kimyasal tepkime ve yayılma özellikleri partiküler maddede farklılık göstermektedir [2]. Bir m^3 ’te bulunan parçacık adedi PM miktarını belirtmektedir. Temiz odalarda ve çalışma ortamlarında parçacık miktarı adet iken, üretim tesislerinde μg veya mg olarak ifade edilir [3].

Tanecikler çaplarına göre ince tanecikler ve kaba tanecikler olarak iki farklı grupta adlandırılmaktadır. İnce tanecikler $2,5 \mu m$. Çapından daha küçük olanlardır, yalnızca mikroskop altında görülebilirler. Endüstriyel işlemler, enerji santralleri, motorlu araçlar, odun yakmak, orman yangınları ve tarımsal yangınlar ince taneciklerin ortaya çıkmasına sebep olur. Kaba tanecikler $2,5-10 \mu m$ çapına sahip olanlardır.

Partiküler madde miktarı insan sağlığını tehdit etmektedir. Partikül boyutuna göre insan üzerindeki etkileri değişmektedir. İnce partiküller sağlık açısından kaba partiküllere göre daha etkilidir. Çünkü $10 \mu m$ ’den büyük kısmı burun ve nazofarenkste tutulabilirken, $10 \mu m$ ’den küçük kısmı bronşlarda birikir, $1-2 \mu m$ çapındakiler alveollerde $0.1 \mu m$ çapında olanlar ise alveollerden intrakapiller aralığa difüze olabilmektedir [4].

Belirli hava kirletici konsantrasyonu kayıt altına almak için oluşturulmuş bir ağ yapısıyla ölçülmektedir. Bu ölçüm değerleri ham haldedir, geliştirilmiş formüller kullanılarak hava

kalitesi indeksine dönüştürülmektedir. Bölgedeki her bir kirletici için bu değer ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Çizelge 1.1. 'de Hava kalitesi indeksi yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Hava kalitesi indeksi [5]

Hava Kalitesi İndeksi	Sağlık Seviyesi	Uyarılar
0 - 50	İyi	Yok
51 - 100	Orta	Nadiren hassas olan kişiler, uzun süreli ve yoğun efor sarfını azaltmayı dikkate almalıdır.
101 - 150	Hassas gruplar için sağlıksız	Kalp veya solunum hastalığı (astım gibi) olan kişiler, yaşlılar ve çocuklar uzun süreli ve yoğun efor sarfını azaltmalıdır.
151 - 200	Sağlıksız	Kalp veya solunum hastalığı (astım gibi) olan kişiler, yaşlılar ve çocuklar uzun süreli ve yoğun efor sarfından kaçınmalıdır. Bunun dışında herkes, uzun süreli ve yoğun efor sarfını azaltmalıdır.
201 - 300	Çok sağlıksız	Kalp veya solunum hastalığı (astım gibi) olan kişiler, yaşlılar ve çocuklar dış ortamda yapılan tüm fiziksel aktivitelerden kaçınmalıdır. Bunun dışında herkes, uzun süreli ve yoğun efor sarfından kaçınmalıdır.
301 - 500	Tehlikeli	Kalp veya solunum hastalığı (astım gibi) olan kişiler, yaşlılar ve çocuklar evlerinde kalmalıdır ve aktivite seviyelerini düşük tutmalıdır. Bunun dışında herkes, dış ortamda yapılan tüm fiziksel aktivitelerden kaçınmalıdır.

Hava kalitesi indeksi, hava kalitesinin günlük olarak rapor edilmesi için kullanılan bir indekstir. Yaşadığımız bölgenin havasının ne kadar temiz veya kirli olduğu ve ne tür sağlık etkilerinin oluşabileceği konusunda bilgiler verir. Hava kalitesi indeksi, kirli havanın solunmasından birkaç saat sonra veya birkaç gün içinde oluşabilecek sağlık etkilerini belirtir. Örneğin hava kalitesi indeksi 100'dür ifadesi, ortalama 24 saatte 2,5 µm'den küçük çaptaki taneciklerin 40 µg/m³ miktarında olduğunu, 10 µm 'den küçük çaptaki taneciklerin 150 µg/m³ miktarında olduğunu belirtmektedir [5].

Ülkemizde 2 Kasım 1986 tarihinde hava kirliliği ile ilgili yönetmelikle önlemler ve yapılması gerekli uygulamalar ile başlamıştır. Sonrasında Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği 06 Haziran 2008 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yönetmelikte

tesisler havayı kirletme durumlarına göre kirletici vasfı yüksek tesisler, izne tabi tesisler ve izne tabi olmayan tesisler olarak üç farklı grup tanımlamışlardır [6].

Malzemenin başka proseslere gönderilmesi, esilmesi karıştırılması ve paketlenmesi gibi endüstriyel işlerin fazla miktarda toz üretmesi insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. Bu ortamlarda hava kirletici miktarının zarar vermeyecek seviyelere getirilmesi için toz toplama sistemleri kullanılmaktadır. İçinde toz tanecikleri bulunan gazlar, geçirgenliği uygun olan bir ortamdan geçirildiği takdirde içlerindeki tanecikler bu ortamlar tarafından tutulabilir. Toz toplama sistemleri filtrasyon prensibine çalışmaktadırlar. Toz toplama sistemine kirli hava negatif basınca sahip egzoz havalandırma sistemindeki emiş kanallarıyla ulaşır. Toz toplama sistemine giren bu kirli hava filtrelerden geçer. Filtreden geçirilmiş temiz hava prosese bağlı olarak ortama geri verilir ya da ortam dışına atılır. Sistem bu şekilde çalışmaya devam ederken, filtrelerin üzerlerinde zamanla toz birikmeye başlar ve filtreleri tıkar. Bu toz belirli sistemlerle silkelenerek toz boşaltma ekipmanında toplanır.

Toz toplama sistemlerinin başka bir kullanım alanında ürünün geri kazanılmasıdır. Örneğin demir çelik endüstrisinde sinter ürünleri, çimento endüstrisinde çimento ürünleri sisteme geri entegre edilebilmektedir.

Toz toplama ekipmanlarının uygulama alanları, ilaç, kompozit, gıda, tarım, kumlama ve püskürtme, lazer/plazma kesim, kaynak ve diğer metal uygulamaları, kimya, lastik, madencilik, boya, ahşap, tekstildir. Toz toplama sistemleri kullanılacakları yere, prosese, hava kirleticilerin özelliklerine ve havalandırma şartlarına göre farklı şekilde tasarlanır.

Filtreleme sistemlerinin tasarımı ve üretilmesinde önemli konulardan birisi de enerji tüketimidir. Toz toplama sistemleri kurulurken enerji tüketimleri de incelenmeli ve verimli biçimde çalışmalıdır.

Tozun türü, partiküllerin boyutları, toplama kanallarının şekli, filtre içindeki hava hızı dağılımları, filtre torbaları, filtreleme yüzey alanları, kontrol sistemindeki filtre hava basıncı gibi değişkenler toz toplama sistemlerinde enerji verimliliğini etkilemektedir. Filtrenin verimli çalışması için basınç kaybı ve kaçaklar sürekli ölçülerek en iyi şekilde kullanılması sağlanmalıdır. Isı transferi, buharlaşma işlemi, basınç kaybı, akış davranışları,

hız profilleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) görselleştirmeleri ile analiz edilmelidir [7].

Düşük basınçlı filtrelerin piyasaya sürülmesi, mühendisler için daha da büyük bir sorun teşkil etmektedir, bu da oldukça dinamik sıvı akışına dair ayrıntılı bir bakış açısı gerektirmektedir. Bu değerli bilgiyi elde etmek, zaman zaman uzamsal ve zamansal çözünürlük açısından yetersiz kalan fiziksel ölçümlere dayanan geleneksel yöntemlerle zordur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri, fiziksel deneylere kıyasla maliyetin bir kısmında ihtiyaç duyulan ayrıntı seviyesini sunduğu için bu amaç için oldukça uygundur [8].

Bu çalışmanın amacı toz tutma kapasitesi yüksek, düşük basınç kayıplarına sahip verimli çalışan bir toz toplama ünitelerini inceleyerek klasik sisteme alternatif olarak yeni sistem bir sistem tasarlamaktır. Bu tasarlanan toz toplama ünitesi hava akış davranışları ve hava hızları açısından analiz edilerek performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Toz toplama sistemleriyle ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

Xie ve diğeri, çalışmalarında küçük kıvrımlı filtre kartuşlarıyla donatılmış yeni bir kartuş filtreleme siklonu ve ortak siklonu temel alan bir nabız püskürtme sistemi sunmuştur. Büyüklüğü 2,5 μm 'den büyük olan daha büyük parçacıkların çoğu, içlerindeki dönen hava akımıyla önceden ayrılır. Daha sonra, boyutu 2,5-5 μm olmayan ince parçacıklar, filtre kartuşu tarafından filtre edilir. Kartuş filtreleme siklonunun basınç düşüşü, toplam ayırma verimliliği, derecelendirme verimliliği ve temizleme aralığı dahil olmak üzere performans parametreleri deneylerle incelenmişlerdir. Sonuçları, geleneksel siklon ayırıcı ve kartuş filtresine göre özel avantajlara sahip olduğunu, partiküllerin ayrılmasının ve yakalanmasının etkisini etkili bir şekilde arttırdığını göstermiştir [9].

Solari ve diğeri araştırmalarında, bir siklon ayırıcı içine bir torba kumaş filtre yerleştirilmiştir. Bu özel çözüm, ayırma verimliliğini düşük enerji tüketimi ile artırmak için siklon ve filtre avantajlarını birleştirmiştir. Dahası, bu çözüm sadece sistemin genel verimliliğini arttırmakla kalmamış, aynı zamanda filtrelerin çalışma koşulları üzerinde olumlu etkilere izin vererek ömrünü arttırmıştır. Sonuçlarında, atmosfere yayılan toz emisyonları kanun düzenlemeleri tarafından belirlenen sınırlar dahilinde tutmayı başarmışlardır [10].

Sallem ve diğeri tarafından toz konsantrasyonunun ve filtrasyon hızının filtrasyon süresine, özellikli kek direncine ve ortalama kek yoğunluğuna etkisi, pilot ölçekli jet darbeleri bir torba filtrede incelenmiştir. Araştırmaları sonucunda filtrasyon hızı, basınç düşüşü üzerindeki toz konsantrasyonunun yanı sıra kek özellikleri, kek yoğunluğu ve spesifik kek direncine kıyasla daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Filtre pastasının özgül direnci ve yoğunluğu, sabit toz konsantrasyonunda daha yüksek filtreleme hızında daha yüksektir. Kek yoğunluğu ayrıca toz konsantrasyonundan da etkilenir. Daha yüksek bir filtrasyon hızında, ancak sabit toz konsantrasyonunda açıkça daha kısa filtrasyon sürelerinin yanı sıra, daha yoğun bir kek gelişir ve daha yüksek gaz hızlarında daha yüksek bir pasta direnci parametresi belirlenir [11].

Kim ve diğerkleri tarafından optimum geometriye sahip pileli bir filtre torbasının filtrasyon özellikleri, 1,2 m/dk'lık bir filtrasyon hızı ve 10 g/m³'lük bir toz konsantrasyonu koşulları altında incelenmiştir. Sonuç olarak, burada değerlendirilen pileli filtre torbasının, filtre kıvrılmasından kaynaklanan ölü alan nedeniyle, teorik filtrasyon alanının aksine yaklaşık %50 ila 60'lık etkili bir filtrasyon alanına sahip olduğunu bulmuşlardır [12].

Xi ve diğerkleri bir sokak vakumu için toz toplayıcının iç akış alanı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile incelemiştir. Toz toplayıcının akış oranı dağılımının dengesiz olduğunu, bunun nedeninin Girişte daha yüksek hava hızı olduğunu göstermektedir. İç akış alanının homojenliğini artırmak için Girişe bir bölme plakası eklenmiştir. Ana teknik parametreler, maksimum akış hızı dengesiz genliği D_{ki} ve genel akış hızı dengesiz genlik D_k azalmıştır. D_{ki} , 0.3429'dan 0.1308'e düşürülmüştür. D_k ise 0,1012'den 0,0402'ye düşürülmüştür [13].

Feng ve diğerkleri tarafından pileli filtrelerden filtre akışını simüle etmek için çeşitli HAD modelleri değerlendirilmiştir. Yüksek katlanma yoğunluğu için, basınç kaybını ve akış alanını tahmin etmek için LES, DES veya v2f RANS gerekmektedir, düşük katlanma yoğunluğu için k-ε modelinin yanı sıra daha farklı modeller de uygulanmıştır [14].

Andersen ve diğerkleri düşük basınçlı kumaş filtrelerin (2 bar) darbeli jet temizliği, tam üç boyutlu bir HAD modeli kullanılarak incelemiştir. 10 m uzunluğunda 28 torba ile pilot ölçekli test filtresinde elde edilen deneysel sonuçlar ve genel olarak, temizleme sisteminin tam ölçekli boyutları mevcut HAD modelinin güvenilirliğini doğrulamak için kullanılmıştır. Doğrulanmış HAD modeli güçlü sıkıştırılabilir etkileri, yüksek derecede geçici bir davranışı, sıkıştırılabilir girdap halkalarının oluşumunu ve aşırı genişlemiş süpersonik jet ile olan şok hücre fenomenini ortaya koymaktadır. Temizleme nozulları ve ventüri tasarımı sonuç veriminde önemli bir rol oynar. Bu tasarımlar torbalar içindeki darbe basıncına yardımcı olur veya bunlara karşı çıkar. HAD simülasyonu, geleneksel düz delikli nozullarında jetin sağlam hizalanma sağladığını ve ek nozul tasarımının yalnızca sınırlı bir iyileştirme sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, düşük basınçlı filtrelerde ventürilere duyulan ihtiyaç ve ventüri tasarımını optimize etmenin önemi gösterilmektedir. Ventüri boğaz çapının azaltılmasının, geri akışı azalttığı ve darbe basıncını iyileştirdiği gösterilmiştir [8].

Li ve diğerkleri, pileli filtre kartuşunun içindeki basıncı ve normal ve silindirik koniler darbeli jet işlemleri sırasında bir kartuşa yerleştirildiğinde toz temizleme verimliliğini araştırmıştır. Deneyisel bir darbe-jet pileli filtre toz toplayıcı tasarlamışlardır. Pileli filtre kartuşunun uzunluğu boyunca üç noktadaki statik basınçlar ölçülmüş ve kartuşlar koniğe monte edilmeden önce ve sonra karşılaştırmışlardır. Tank basıncı, meme çapı ve jet mesafesi de dahil olmak üzere çeşitli parametreler incelemişlerdir. Bunlarla birlikte filtre kartuşunun basınç düşüşü ve toz emisyonu konsantrasyonu da incelemişlerdir. Bu çalışma, tank basıncındaki artışın, kartuşdaki koni varlığına bakmaksızın darbe jeti yoğunluğunu iyileştirdiğini göstermiştir. Darbe jet yoğunluğu, kartuş her iki tip koni ile takıldığında da artar. Darbeleri jet düzgünlüğü normal koni için azaltılmış, ancak silindirik koni için arttırılmıştır. Konilerin darbeleri jet basıncı üzerindeki etkisi, talep üzerine temiz modda tıkanma ve temizleme sırasındaki performansın düşürülmesiyle doğrulanmıştır. Kalan basınç düşüşü azaltılmış ve normal veya silindirik koni kartuşa takıldığında toz emisyonunun tepe konsantrasyonu artmıştır. Silindirik bir koni temizleme aralığını uzatmış ve normal koni tersini gerçekleştirirken toz emisyonunu azaltmıştır. [15].

Morgan Gold Cone kartuşu hakkındaki yazısında toz toplama ünitesinde kullanılan ortasındaki pileli filtre konisinin dört faydasından ve dikey, yatay filtre kombinasyonuna sahip toz toplama ünitelerinden bahsetmiştir. Birinci faydayı kartuş başına daha önce elde edilenden daha kompakt bir alanda daha fazla hava akışı sağlamak için kartuşa ilave yüzey alanı eklenmiş olur olarak açıklamış. İkinci faydayı filtrenin altındaki delikle toz toplayıcıda daha fazla kullanım alanı açar, böylece ara geçiş hava hızları azalır olarak açıklamıştır. Üçüncü faydayı darbe enerjisinin daha etkin kullanımı için darbe filtre kartuşunun uzunluğu boyunca daha dengeli dağıtır olarak açıklamıştır. Son olarak, dördüncü fayda belki de en önemlisi: Koniden çıkan darbenin yönü, filtrelerden uzaktaki hazneye doğrudur. Bu, hafif toz parçacıklarını haznenin içine ve hava akımının dışına zorlar olarak açıklamıştır. Farr'ın Golde Cone filtre montajı için aldığı patentte [16], bu ölü boşluğun verimli, kullanışlı bir filtreleme alanına dönüştürüldüğü toz toplamada bir devrimi tarif eder.

Morgan eski tip toz toplama ünitelerinde hava girişi aşağıdan yukarı olarak tasarlandığı için hava debisinde sınırlama yarattığını ifade etmiştir. Bu nedenle filtreler yatay olarak yerleştirilmiş ve hava yukarıdan aşağı doğru yönlendirilmiştir. Fakat bu tasarımda tozun temizlenmesi, hava filtreleme alanında artış, filtre ömrünün kısılması ve patlama riskinin

oluşması gibi sorunlara yol açmıştır. Geliştirilmiş tasarım olarak Farr Gold Serisi toz toplayıcısının yaptığı gibi havayı kolektörün yanından geçmektedir. Bu, havayı toz toplayıcıya kartuşların kendileri ile aynı yükseklikte çağıran yüksek girişli bir giriş ile sağlanmaktadır. Hava, ilk olarak havayı dağıtan ve aynı zamanda daha büyük parçacıkları ayıran ve filtreleri hiç görmeden doğrudan haznenin içine bırakan bir sınıflandırıcı görevi gören bir dizi kademeli kanal bölmesi yoluyla gönderilmektedir. Hava çapraz olarak filtrelenecek şekilde kıvrımlı bir yola ve yön değiştirmeye sahiptir. Bu çapraz akış etkisi, yukarı doğru geçiş arası kutu hızlarını ortadan kaldırmıştır. Hava, kolektöre kartuş seviyesinde getirildiği için, filtreler doğru yukarı doğru akan artık hava olmamaktadır. Bu sistem, filtreleri yanlarına çevirmeden ve ortamın büyük bir kısmını boşa harcamadan aşağı akış tarzı bir hava düzeninin faydasını birleştirmektedir [17].

Donaldson 40 yılı aşkın süredir toz toplama üniteleri konusunda geliştirici çözümler sunmaktadır. Örnek olarak kaynak dumanı toplama uygulaması için hava akışını değiştirerek hava medya oranındaki artışı göstermiştir. 1970-1978 yılları arasındaki toz toplama ünitelerinde hava yukarı doğru akışa sahiptir, filtreler dikey konumlandırılmıştır hava medya oranı 1-1,5 arasındadır. 1978-1981 yılları arasındaki toz toplama ünitelerinde hava yukarıdan aşağı dorudur, filtreler dikey konumlandırılmıştır ve hava medya oranı yine 1-1,5 arasındadır. 1981-2014 yılları arasındaki toz toplama ünitelerinde hava yine yukarıdan aşağı doğrudur fakat filtreler yatay olarak konumlandırılmıştır ve kirli hava filtrelerin merkez noktasından giriş yapar, hava medya oranı 2-3,5 arasındadır. Son tasarım Downflo Evolution da filtreler yatay olarak konumlandırılmış, hava akışı yukarıdan aşağı doğrudur fakat kirli hava girişi ventüri bölümünden gerçekleştirilir ve hava medya oranının 3,5-4 arasında artırır. Böylelikle %40'a kadar daha az filtreye sahip ve daha az yer kaplamaya bir toz toplama ünitesi ortaya çıkarmıştır [18].

Bu tez çalışmasında ilk bölümde toz toplama sistemleri türleri araştırılmıştır. Toz toplama sisteminin performansına etki eden parametreler incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda farklı bir toz toplama sistemi tasarımı yapılmıştır. Yeni sistemde hava giriş ve çıkışı üst kısımdan gerçekleştirilir ve filtreler yatay konumlandırılmıştır. Klasik sistemde hava girişi toz toplama ünitesinin altından, hava çıkışı üst kısımdan gerçekleştirilir ve filtreler dikey konumlandırılmıştır. Bu iki sistemin HAD analizleri gerçekleştirilmiş, sistem ve filtreleme hava hızı değerleri karşılaştırılmıştır.

3. TOZ TOPLAMA SİSTEMİ GENEL BİLGİLER

3.1. Toz Toplama Sistemi Tipleri

Endüstriyel olarak kullanılan toz toplama ekipmanları zararlı partiküler maddelerin havalandırma sistemlerinden uzaklaştırılması için kullanılır. Özel kurulumlarda toz toplama sistemlerinin seçiminde; toz derişimler ve tozun kimyasal ve fiziksel özellikleri, partikül yakalama etkinliği, hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi ve zararlı parçacıkların imha yöntemleri gibi parametreler göz önünde tutulmaktadır.

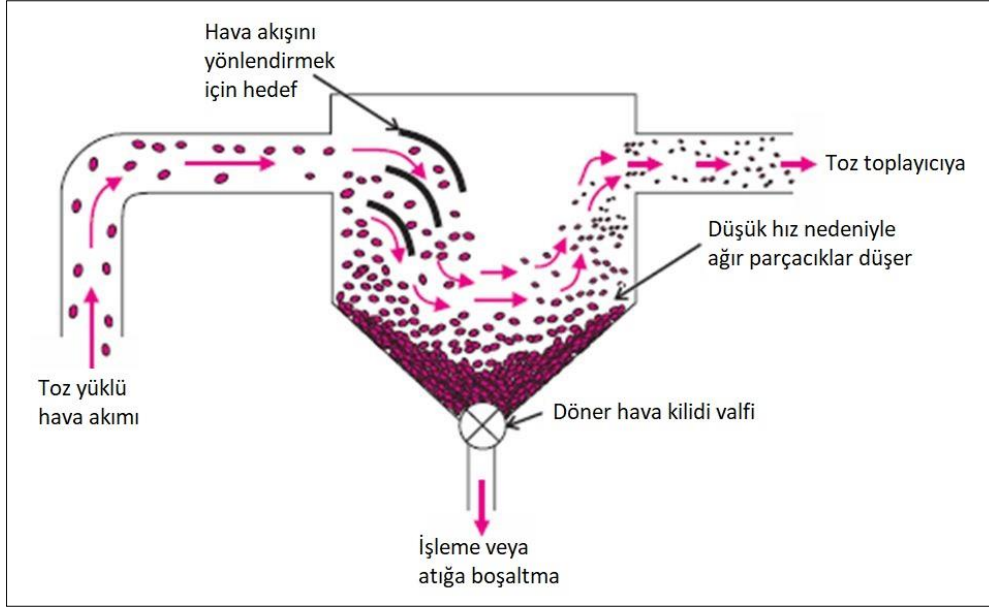
Tozun toplanma sürecinde toz özellikleri arasında, korozyf, patlayıcı, viskozitesi fazla, hafif veya kabarık olması bulunur. Toz partiküllerinin şekli de önem arz etmektedir. Çünkü partiküllerin düzensiz yığılmış veya küresel yığılmış olup olmadığı filtre torbasını kullanırken önemlidir. Toz toplamanın verimli gerçekleştirilmesi için, yığılmış partiküller idealdir çünkü toz keklerinin filtre bezi üzerinde kolayca birikmesine izin vererek toz toplayıcıda daha verimli toplama sağlar. Bununla birlikte, topaklaşan parçacıklar, filtre bezinden çok kolay ayrılmama eğiliminde olabilir.

Toz toplama sistemleri, basit şekilde yerçekimi ayırıcılardan gelişmiş olan elektrostatik çökticilere kadar farklı yapılara sahiptirler. Aşağıda, partikül giderimi için kullanılan toplayıcı türlerinin avantajları ve dezavantajları ile kısa bir özeti aşağıdadır [19].

3.1.1. Yerçekimi ayırıcılar (düşme kutuları)

Tipik bir yatay akış yerçekimi ayırıcısı, giriş, çıkış ve toz toplama hunileri olan uzun bir yatay kutu şeklinde inşa edilmiştir (Şekil 3.1). Toz yüklü hava akımı, girişteki üniteye girer, daha sonra genişleme bölümüne girer, bu da hava hızının düşmesine ve partiküllerin yerçekimi ile yerleşmesine neden olur. Geliştirilmiş bir çöktme odası tipi, bölme odasıdır; bölmeler hava akımının yönünün ani değişikliklerine neden olarak partikül ayrılmasını ve toplanmasını artırır. Bu şekilde indüklenen hareket, yerçekimine bağlı olarak harekete eklenir. Böylelikle partikül toplama, yerçekimi ve eylemsizlik etkisinin bir kombinasyonu ile gerçekleştirilir. 10 ila 20 mm kadar küçük partiküller toplanabilir. Bölmeli çöktme bölmesi daha kompakttır ve basit yerçekimi çöktme bölmesinden daha

az yer gerektirir. Çökeltme odaları, daha verimli toplayıcıların girişinde en iyi şekilde kullanılır. Böylelikle yükü azaltabilir, performansı artırabilir ve daha verimli ve daha pahalı cihazın ömrünü uzatabilir ve toz daha kolay geri kazanılabilir. Çökeltme odaları, metal arıtma, gıda maddeleri ve enerji santralleri dahil olmak üzere birçok endüstride kullanılmıştır.

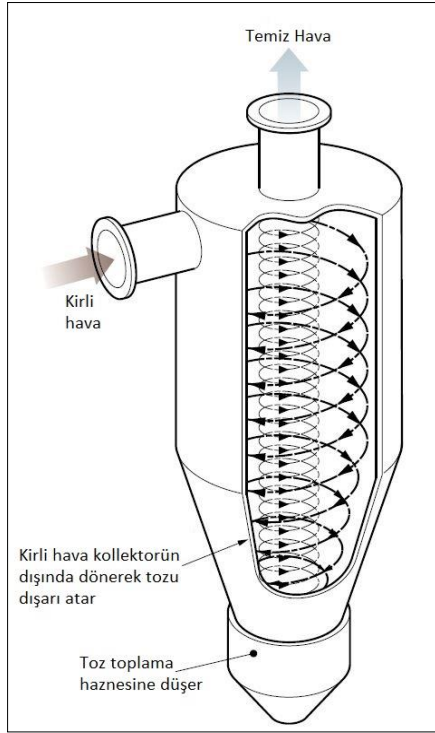


Şekil 3.1. Bir ağırlık ayırıcısının tipik tasarımının gösterimi (düşme kutusu) [19]

Yerçekimi ayırıcıların avantajları şunları içerir: düşük inşaat ve bakım maliyeti, birkaç bakım problemi, nispeten düşük basınç düşümleri, yalnızca kullanılan yapı malzemeleri tarafından uygulanan sıcaklık ve basınç sınırlamaları, katı partiküllerin kuru bertarafı. Dezavantajları arasında geniş alan gereksinimleri ve nispeten düşük toplam toplama verimliliği yer alır [20].

3.1.2. Santrifüjlü toplayıcılar veya siklonlar

Siklonlar, altta sivrilen dairesel bir bölmeden oluşur (Şekil 3.2). Tozlu hava, siklonun tepesine teğet olarak beslenir ve odanın etrafında döner. Bu, parçacıkları merkezkaç hareketiyle duvara doğru fırlatır. Parçacıkların hızları azalır ve siklonun tabanındaki bir toplama hunisine düşer. Temizlenmiş hava, siklonun tepesindeki merkezi bir çıkıştan geçer. Parçacık ne kadar büyükse, bir siklonun onu havadan uzaklaştırması o kadar kolay olur [21].



Şekil 3.2. Bir siklon toz toplayıcı tipik tasarımının gösterimi [21]

Toz toplama sistemlerinde siklonlar maliyeti ve bakımı az cihazlardır ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler. Ana toz toplayıcıdaki toz yükünü azaltır ve geri kazanılan ürünün kuru olmasını sağlamaktadır. Tasarımsal olarak performansını değerlendirmek zordur. Belirlenecek tasarım parametrelerinin doğru olması ve boyutsal olarak büyük oldukları için fabrika alanı gereklidir.

Siklonlar, tozu temizlemek için merkezkaç kuvveti kullanır. Dönen bir hava akımındaki bir parçacık, onu çarpacağı ve momentum kaybedeceği bir yüzeye doğru hızlandırır ve böylece hava akımından uzaklaştırılan bir merkezkaç kuvvetine maruz kalır. Bu siklonlar genellikle çapı 10 mm'den 50 mm'den fazla olmayan küçük boyutlardadır. Solunabilir fraksiyonu toplamak için 1960'lardan beri yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Tipik bir siklon ön toplayıcıda, hava yan tarafından teğetsel olarak girer ve içeride döner. Belli bir boyutun üzerindeki parçacıklar siklon duvarlarına atılır ve tabanında ("kum çömleği") toplanır. Solunabilir tozu içeren hava, siklonun üst kısmındaki merkezi çıkıştan çıkar ve tozun toplanması için hava filtrelenir. Siklonlardaki sıvı davranışının karmaşıklığından dolayı, toplama özelliklerini matematiksel olarak tahmin etmek zordur ve deneysel tasarıma dayanırlar. Bununla birlikte, uygun boyut seçimini elde etmek için, hava örnekleme pompası, belirli bir değişkenlik dahilinde siklon açıklığı boyunca uygun akışı

sağlayacak şekilde kalibre edilmeli ve akış düzgün olmalıdır. Pompa doğru şekilde kalibre edilmediyse, seçim ya daha büyük (düşük akış için) ya da daha küçük (yüksek akış için) aerodinamik çaplara kaydırılacaktır. Kalibre edildikten sonra siklonlar tüm parçacıklar için kullanılabilir, ancak genellikle lifler için kullanılmaz.

Çökeltme odalarının avantajları aynı zamanda siklonlar için de geçerlidir ve ek olarak siklonlar, ortamın altından 1000°C' nin üstüne kadar geniş bir basınç ve sıcaklık aralığında kullanılabilir. Performansları, girişteki giriş toz konsantrasyonuna karşı duyarsızdır; artan partikül konsantrasyonu ile verimlilik artabilir ve sıvı damlacıklarının gazlardan uzaklaştırılmasında, emme kolonlarından boşaltmada olduğu gibi etkin bir şekilde kullanılabilirler. Dezavantajı, havada taşınan 5 µm' den daha ince parçacıklar için düşük verimliliktedirler [20].

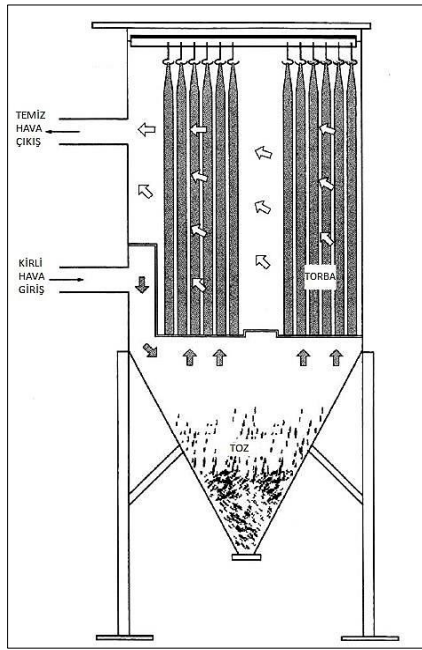
3.1.3. Torbalı toplayıcılar

Torbalı toz toplayıcılar, hava akışını filtre torbalarından zorlayarak hava akışındaki partikülü yakalar. Bir torba yuvası, girişteki toz yüklü havayı alarak ve başlangıçta daha büyük parçacıkları atmak için hızı düşürerek çalışır. Torba daha sonra havayı bir kumaş torbadan geçirerek kalan partikülleri filtreler (Şekil 3.3). Ayrılma, parçacıkların çarpışması ve filtre kumaşına yapışması ve ardından kendi üzerine inşa ederek bir toz keki oluşturmasıyla gerçekleşir. Toz, torbanın dışında biriktiği için, toz keki torbadan çıkarıldığında veya temizlendiğinde, yerçekimi ile torba bölümünün altında bulunan toplama haznesine düşer. Toplanan toz daha sonra bir hazne valfi aracılığıyla toplayıcıdan çıkarılır [19].

Geleneksel polyester torbalar, tozun kumaşa gömülebileceği daha büyük gözenekler oluşturan, temizliği engelleyen ve torba ömrünü azaltan bir iğneleme işlemiyle üretilir. Genişletilmiş servis torbaları, elyafları karıştırmak için su kullanan benzersiz bir hidro-bağlama işlemiyle tasarlanmıştır. Bu işlem, daha küçük gözenekler, daha iyi yüzey yüklemesi ve daha iyi temizlik ile daha homojen bir malzeme sağlar. Bu avantajlar, basınç düşüşü nedeniyle torbaların değiştirilmesi gerekmeden önce iki kat çalışma ömrü sağlar, bakım ve işletme maliyetlerini düşürür ve torbalı toz toplamayı yepyeni bir seviyeye yükseltir. Daha gelişmiş torba malzemesi teknolojisi, filtrasyon verimliliğini artırmak ve normal sıcaklıklardaki uygulamalar için kendi kendini temizlemeyi desteklemek için iğne

ile delinmiş polyester üzerine genişletilmiş PTFE membranı veya hidrofobik nanofiber ağı lamine etmektir.

Öte yandan, polyamid gibi sıcaklığa dirençli torba malzemeleri sıkı bir şekilde takip edilir, maliyet kabul edilebilir bir seviyeye düşürüldüğünde, uygulama alanlarının sıcak gaz filtreleme işlemi için artması beklenir [22].



Şekil 3.3. Bir torbalı toz toplayıcı tipik tasarımının gösterimi [7]

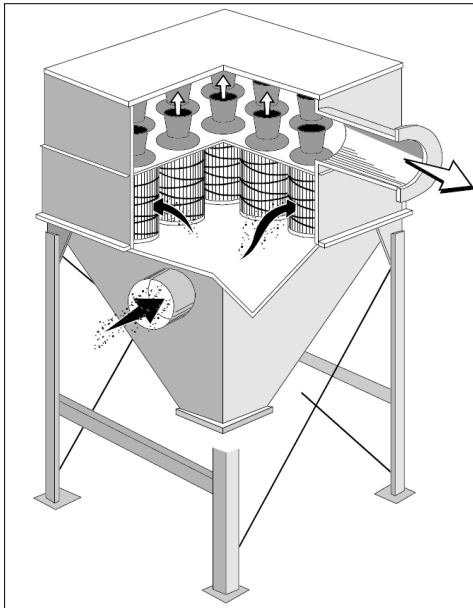
3.1.4. Kartuş toplayıcılar

Bir tel çerçeve üzerinde desteklenen ince kıvrımlı filtre ortamı kullanılarak kolektör hacmi birimi başına filtre alanında daha fazla artış elde edilir. Bu kartuş, mevcut kolektörlerdeki standart torbalar ve kafesler için neredeyse doğrudan bir yedek olarak dikey olarak monte edilebilir veya orijinal tasarımlarda yatay olarak monte edilebilir (Şekil 3.4). Standart torbalar ve kafesler için doğrudan bir ikame olarak kullanıldığında, bir kasa için güçlendirme maliyetleri yeni bir torba yuvası inşa etme maliyetinin %70'i kadardır [23].

Kartuş toplayıcı tasarımlarında erken temizliği sağlayan, bir kartuş dizisi boyunca bir üfleme borusu kullanan tipik bir darbe ekipmanıdır. Daha yeni tasarımlar, her kartuş çifti için ayrı hava valfleri kullanır. Bir kartuş tipi, kıvrımlı filtre ortamı ve dış destek ağı ile

çevrelenmiş bir iç destekleyici çekirdek içerir. Kartuşun bir ucu açıktır, bu da filtreden dışarıdan geçen gazın temiz bir hava plenumuna çıkmasını sağlar. Temizleme havası, aynı açık uçtan, ancak temizlenmekte olan gazın tersi yönde darbeleri olarak verilir. Kartuşun diğer ucu bir uç kapakla kapatılır. Üretim süreci, uç kapakların filtre ortamına ve çekirdeklere bağlandığı güçlü, sert bağlantılar gerektirir. Ortamı uç kapaklara karşı sızdırmaz hale getirmek için epoksi veya poliüretan plastikler kullanılır. Kartuş, kendisini temiz hava plenumuna bağlayan deliği çevreleyen bir montaj plakasına karşı sıkıca yerinde tutulur. Yatay kartuşlar tipik olarak aralarında bir conta sızdırmazlığı ile birlikte monte edilir. Düzgün monte edilmemişse veya conta malzemesi yüksek kalitede değilse, tekrarlanan temizlik darbelerinden sonra sızıntı meydana gelecektir [24].

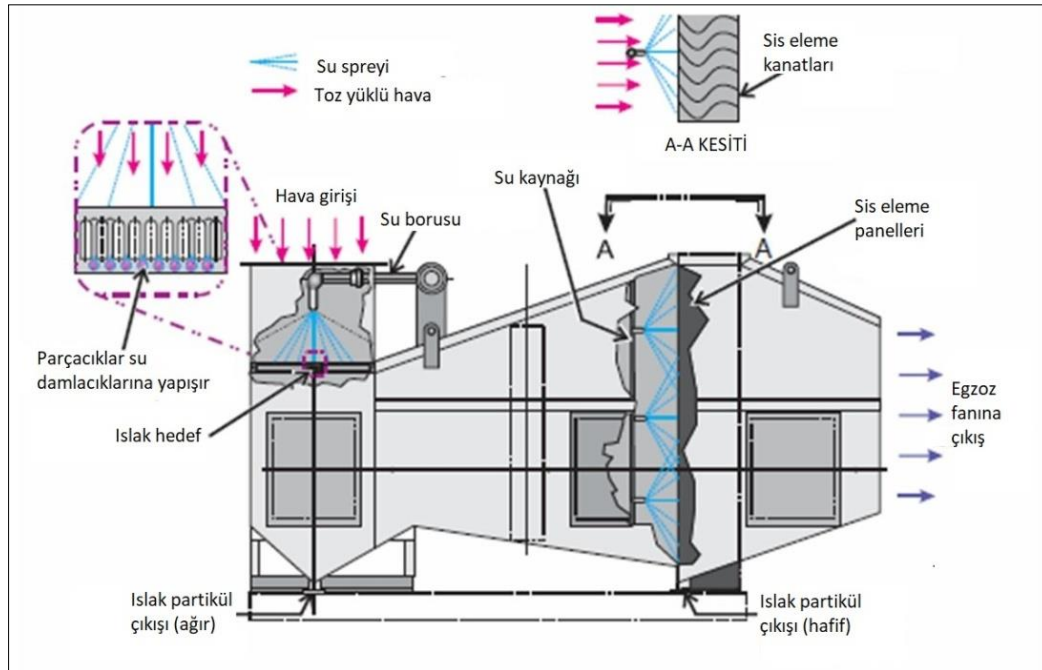
Kartuşlar, alan ve enerjiden tasarruf sağlayabilir. Bu toz filtre elemanları genellikle selüloz karışımlarından (kağıt) veya membranlar dahil olmak üzere polyester veya polipropilenden (yün) eğilerek bağlanmış dokunmamış malzemelerden yapılır. Pile geometrileri, farklı eleman çaplarına göre değişir. Pileli kartuşlu toz filtresi elemanları, mekanik sallama üniteleri, basınçlı hava darbeleri jet temizleme ve ters üfleme temizleme ile temizlenebilir. Bunların sonuncusu, filtre elemanının tüm yüzeyinde tekdüze bir temizleme etkisi sağlar. Düşük toz kalıntıları kıvrımlı eleman tarafından tutulacak olsa da bunlar genellikle mevzuatın izin verdiği seviyelerin altındadır [25].



Şekil 3.4. Tipik dikey montajlı kartuş toplayıcı. [24]

3.1.5. Islak yıkayıcılar

Sıvı kullanarak partikülleri toplayan cihazlar ıslak yıkayıcılardır. Islak yıkayıcı tasarımsal olarak fazladır. Çoğunda ıslatılmış hedef ile partiküller yakalanır. Islak hedef plakası, su kaynağı veya partiküllerin su damlalarına çarptığı bir bölgedir (Şekil 3.5). Islak yıkayıcıların faydaları, farklı nem ve sıcaklık şartlarında çalışabilme, kimyasala karşı dirençli ve az bakım gerektirmez. Yakalanan parçacıklarla atılması gereken su miktarının fazla olması toz toplama verimini azaltırken enerji tüketimini artırmaktadır. Maden işleme proseslerinde yakalanan partiküller çökelme havuzları kullanılarak atılır ve bu havuzlardan gelen su geri kullanılabilir [19].



Şekil 3.5. Bir ıslak yıkayıcı toz toplayıcı tipik tasarımının gösterimi [19]

3.1.6. Elektrostatik çökticiler (ESPs)

Elektriksel kuvvet kullanarak toz toplama plakalarıyla hava içindeki kirleticileri kontrol edebilen cihazlar Elektrostatik çökticiler (ESPs)'dir. Bu cihazlardan geçen hava içindeki parçacıklar korona bölgesine yönlendirilerek negatif elektrik ile yüklenir. Negatif yüklenen parçacıklar pozitif yüklü plakaya yönelir. Vurma hareketi ile plakadaki parçacıklar uzaklaştırılır.

Dört temel ESP türü vardır: levha ve tel (kuru), düz levha (kuru), ıslak ve iki aşamalı. Elektrostatik çökticiler normalde yerel egzoz havalandırma sistemlerinden daha yüksek bir başlangıç maliyetine sahiptir, ancak onları dikkate almaya değer kılan bir dizi avantaja sahiptir. ESP'ler büyük bir hava hacmi sağlar, çeşitli sıcaklıklarda uygun şekilde çalışır ve hareketli parça olmadığından çok az bakım gerektirir. Kurulum süresi ve maliyetleri de yerel bir egzoz havalandırma sisteminden daha düşüktür. Diğer bir avantaj, ürünün kolayca geri kazanılması ve sürece geri dönüştürülmesidir. ESP'lerin sınırlamaları, fiziksel büyüklüklerini, operasyon masraflarını ve tutarsız toplama verimliliklerini içerir [26].

3.2. Havadaki Kirleticiler

Uluslararası Standardizasyon Örgütü'ne (ISO 4225- ISO, 1994) göre, "Toz: Küçük katı parçacıklar, geleneksel olarak çapı 75 μm 'nin altındaki parçacıklar olarak alınır, kendi ağırlıkları altında çöken, ancak bir süre askıda kalabilirler". "Atmosferik Kimya Terimleri Sözlüğü" ne göre, "Toz: Rüzgâr, volkanik patlama gibi doğal kuvvetler ve mekanik veya insan yapımı süreçler tarafından havaya yansıtılan küçük, kuru, katı partiküller kırma, taşlama, frezeleme, delme, yıkma, kürekle çekme, taşıma, eleme, torbalama ve süpürme. Toz partikülleri genellikle çap olarak yaklaşık 1 ila 100 μm arasındadır ve yerçekiminin etkisi altında yavaşça yerleşirler. " [27]. Bununla birlikte, havadaki tozun partikül boyutuna atıfta bulunulduğunda, "partikül çapı "tek başına aşırı bir basitleştirmedir. Bir parçacığın geometrik boyutu, havadaki durumunda nasıl davrandığını tam olarak açıklamadığından, çoğu mesleki hijyen durumu için parçacık boyutunun en uygun ölçüsü parçacık aerodinamik çapıdır, "Geometrik boyutuna, şekline ve gerçek yoğunluğuna bakılmaksızın, söz konusu parçacık ile sakin havada aynı terminal çökme hızına sahip olan 1 g / cm^3 yoğunluklu varsayımsal bir kürenin çapı" olarak tanımlanır. Bu şekilde ifade edilen aerodinamik çap uygundur çünkü partikülün solunum yolunun farklı bölgelerine nüfuz etme ve birikme kabiliyetinin yanı sıra aerosol örnekleme ve filtrasyon cihazlarında partikül taşınması ile yakından ilgilidir. Partikül boyutunun, örneğin difüzyon yoluyla veya elektrik kuvvetlerinin etkisi altında hareket eden parçacıkların davranışıyla ilgili başka tanımları da vardır. Ancak bunlar, çalışma alanında havada asılı toz söz konusu olduğunda genellikle ikincil öneme sahiptir.

Aerosol biliminde, aerodinamik çapı $> 50 \mu\text{m}$ olan partiküllerin genellikle havada çok uzun süre kalmadıkları kabul edilir: terminal hızları $> 7 \text{ cm/s}$ 'dir. Bununla birlikte, koşullara

bağlı olarak, parçacıklar > 100 µm bile havada uçabilir (ancak neredeyse hiç kalmaz). Ayrıca, toz parçacıkları sıklıkla önemli ölçüde <1 mm boyutlarında bulunur ve bunlar için yerçekimine bağlı çökme, tüm pratik amaçlar için ihmal edilebilir. 1 mm'lik bir parçacığın son hızı yaklaşık 0,03 mm /s'dir, böylece hava ile hareket, içinden çökmekten daha önemlidir. Bu nedenle, mevcut bağlamda özetlendiğinde, tozların, kökenlerine, fiziksel özelliklerine ve ortam koşullarına bağlı olarak havada bulunan veya havayla taşınabilen, boyutları 1 µm'den en az 100 µm'ye kadar değişen katı parçacıklar olduğu düşünülmektedir.

Hava Kirleticilerin Boyut Dağılımı ve Özellikleri Çizelge 3.1'de yer almaktadır. Çalışma ortamında bulunan toz türlerinin örnekleri: Serbest kristal silika (örneğin kuvars olarak), kömür ve çimento tozları içerenler gibi mineral tozları; kurşun, kadmiyum, nikel ve berilyum tozları gibi metalik tozlar. Diğer kimyasal tozlar, örneğin birçok toplu kimyasal ve böcek ilacı; un, odun, pamuk ve çay tozları, polenler gibi organik ve bitkisel tozlar; canlı parçacıklar, küfler ve sporlar gibi biyolojik tehlikeler gibidir [20].

Çizelge 3.1. Hava kirleticilerin boyut dağılımı ve özellikleri [20]

Hava Kirleticileri	Boyut Aralığı (µm)	Tanım
Toz	0,1-30,0	Katıların pülverizasyonu ya da parçalanması ile oluşur. Örnek olarak; metal ve kömür tozu verilebilir. Parçacık boyutları 300-400 µm olabilir ancak iri parçacıklar havada asılı kalmaz.
Buğu	0,01-10,0	Gaz fazından yoğunlaşma ya da sıvıların dağılımı ile oluşan asılı sıvı parçacıklardır. Elektro kaplama tanklarının açık yüzeyleri üzerinde oluşur.
Duman	0,01-1,0	Organik maddeler eksik yanma sonucu oluşan aerosol karışımıdır.
Tütsü	0,001-1,0	Buharın veya yanma sonucu ortaya çıkan gazların yoğunlaşarak gaz halden katı hale geçmesi ile oluşan aerosoldür. Özellikle kaynak sırasında uçucu hale gelen metaller örnek verilebilir.
Buhar	0,005	Oda sıcaklığında katı veya sıvı olarak bulunan maddelerin gaz halidir. Birçok solvent buhar açığa çıkarmaktadır.
Gaz	0,0005	

Tozlar yalnızca çalışma süreçleri tarafından üretilmez, aynı zamanda doğal olarak da oluşabilir, örneğin polenler, volkanik küller ve kum fırtınaları. Asbest ve diğer bu tür malzemeler gibi lifli tozların, öncelikle parçacıkların şekli ile ilgili özel sağlık sorunları

ortaya çıkardığı gösterilmiştir. Sağlıkla ilgili olarak, çapı <3 mm, uzunluk > 5 mm ve en-boy oranı (uzunluk / genişlik) 3'e 1 veya daha büyük olan parçacıklar "lifler" olarak sınıflandırılır. Lif örnekleri arasında asbest (iki grup mineralden oluşur: serpantinler, örneğin krizotil ve amfiboller, örneğin krosidolit- "mavi asbest"). Diğer örnekler arasında taş yünü (veya taş yünü) ve cam yünü gibi sentetik elyaflı malzemelerin yanı sıra seramik, aramid, naylon, karbon ve silikon karbür elyaflar yer alır.

Mesleki hijyende "havadan taşınan toz" terimi kullanılsa da ilgili çevre hijyeni alanında, genel atmosferik çevre kirliliği ile ilgili olarak, "asılı partikül madde" terimi sıklıkla tercih edilmektedir. Havadaki partiküllerin aerodinamik davranışı, toz maruziyetinin tüm ölçüm ve kontrol alanlarında çok önemlidir [20].

Fazlarına ve ortaya çıkma yöntemlerine göre havadaki kirleticiler sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma; katı maddelerden oluşan dumanlar, metal dumanları, tozlar, sıvı maddelerden oluşan dumanlar, sisler, buğular, çeşitli gazlar ve buharlar şeklindedir [28].

Tanecik Boyut Dağılımını bir örnekteki aktarılan bir boyuttan daha küçük olan taneciklerin yüzdesi olarak ifade edilebilir. Ek-1 'de verilen en üstteki eğri (adet eğrisi), tipik bir atmosferdeki kirlilik için çizilmiştir. Ortadaki eğride (alan eğrisi) projeksiyon alanlarının yüzdesi, en alttaki eğride (kütle eğrisi) ise toplum kütlelerinin yüzdeleri gösterilmiştir. Örneğin elektro mikroskobun ölçebildiği tanecikleri en küçüğü 0,005 mm çapıdır ve 0,1 mm çaptaki veya daha küçük tanecikler atmosferdeki taneciklerin adet olarak %80 kadarını kapsamakta, fakat kütsel olarak sadece %1 'ini almaktadır. 1 mm çapından büyük olanlar sadece %0,1 iken, toplam kütselin %70 kadarıdır. Bu ifade kütsel bir taneciğin kütselinin, çapının küpü ile artmasının bir sonucudur. Hava kirliliğin %80'i, 5 mm çapından küçük taneciklerden kaynaklanmaktadır. 1 mm çapından daha küçük tanecikler ise en çok leke bırakıcılarıdır [29].

3.3. Filtreler

Filtre temelde bir maddeyi diğerinden ayırmak için kullanılan bir cihazdır ve bunu yapmak için katıları bir şekilde hapsedecek akışkan akış yolunda bir dolgu ortamının yerleştirilmesi gerekir.

Filtreleme, tamamen partikül veya damlacık boyutuna (ve bir dereceye kadar şekle) göre çalışır, öyle ki belirli bir boyutun altındaki partiküller bariyerden geçerken, daha büyük partiküller daha sonra çıkarılmak üzere bariyer üzerinde veya içinde tutulur. Ayırma boyutu, bariyerin, filtre ortamının bir özelliğidir. Geniş filtre tasarımları yelpazesi, büyük ölçüde filtrede toplanan birikmiş katıların işlenmesi ihtiyacının bir sonucudur, ancak belirli bir ekipman zemini alanına (veya hacmine) filtre ortamı kadar çok alan sığdırma ihtiyacı duyulabilir. Başka bir tasarım karar vericisi, bir filtrenin çalışması, genellikle filtre ortamı boyunca bir basınç farkına ihtiyaç duyar ve bu, ortamın yukarı akışındaki akışkan basıncı (basıncılı filtreler) veya emme aşağı akış (vakum filtreleri) aracılığıyla gerçekleştirilebilir [25].

Hava filtreleri, havadaki partikülleri ve pislikleri/kirleticileri ortadan kaldıran filtre içindeki malzeme olan filtre medyası üzerine gelen maddeleri yakalar. Bu yakalama iki etkinin olmasını gerektirir. Birincisi, partikülün filtre ortamını oluşturan "lifler" ile çarpışması veya bu lifler tarafından çıkarılmasıdır. İkincisi, partikülün filtreye temas ettikten sonra medya fiberine yapışmaya devam etme olasılığıdır. Hava filtresi ortamı iki tipte mevcuttur: yalnızca mekanik ve elektro-mekanik. Yalnızca mekanik hava ortamı, yalnızca aşağıda açıklanan dört parçacık yakalama işlemine dayanır. Elektromekanik hava filtresi medyası bu aynı işlemlere dayanır, ancak büyük bir geliştirmeye birlikte ekler. Bu bir elektrik yüküdür [30].

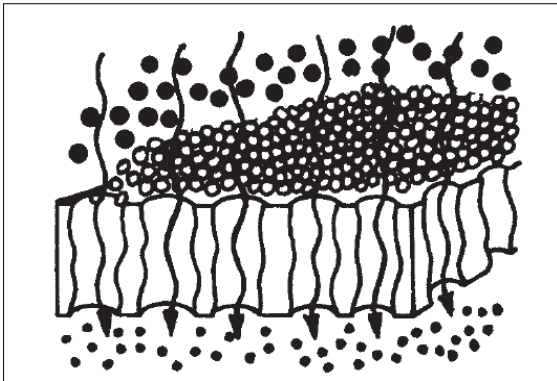
3.3.1. Filtrasyon mekanizmaları

Bir filtre ortamının, askıya alınan parçacıkların bir kısmını veya tamamını tutmak için akışkan akışı boyunca yerleştirilmiş gözenekli bir bariyer olduğu belirtilmiştir. Bu bariyer, filtrelenecek en küçük partikülün çapına kıyasla çok ince ise o zaman tüm filtreleme, filtre materyalinin yukarı akış yüzeyinde gerçekleşirdi. Gözenek çapından daha küçük herhangi bir parçacık gözeneklerden geçecek ve bundan daha büyük herhangi bir parçacık yukarı akış yüzeyinde kalacaktır. Bununla birlikte, daha büyük parçacıkların bazıları, tek tek gözeneklere yerleşecek ve onları tıkayacak boyutta olacaktır. Akışkanın akışı kabul edilebilir bir düzeyin altına düşene kadar, ortam yüzeyi yavaş yavaş bu şekilde tıkanan gözeneklerle dolacaktır [25].

Çoğu gerçek filtre materyali, elbette, son derece ince değildir, ancak akışkan akışı yönünde sınırlı bir kalınlığa sahipken, bu tür malzemedeki çoğu gözenek, akışkan yolu boyunca çap olarak değişiklik gösterir. Bir partikül, gözenğin çok küçük olduğu bir noktaya ulaşınca kadar hareket ettiğinde ve partikülün boyutu nedeniyle tamamen tutulduğunda filtrasyon gerçekleşir. Bu şekilde daha fazla kullanılması için filtre malzemesi doluncaya kadar öyle kalır. Filtrenin yüzeysel veya derinlik olarak çalışmasına göre filtrasyon mekanizmaları tanımlanmıştır. Filtrasyon için dört temel mekanizma vardır.

Yüzey gerilmesi mekanizması: Parçacık, gözeneklerden daha büyüktür ve geçemez. Gözenek çaplarından daha küçük partiküller ortamdan geçer ve ayrılmaz. Bu tür bir ayırma genellikle dokunmamış kumaşlarla değil, tek tip gözenek açıklıklarına sahip ortamlarla ilişkilidir. Örnekler, açıklıkların çap olarak muntazam olduğu dokuma örgü kumaşlar, elekler ve membran malzemeleridir.

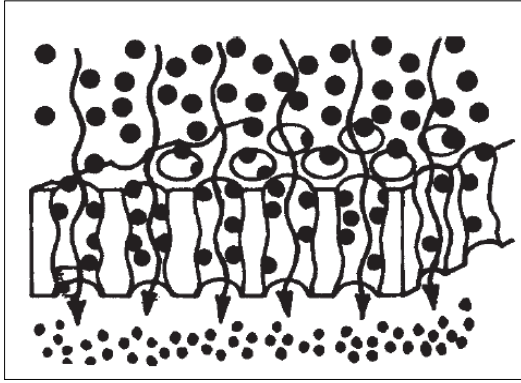
Kek filtrasyonu mekanizması: Kek (veya yüzey) filtrasyonu, bir filtre ortamının yüzeyindeki (veya yüzeyine yakın) partiküllerin yakalanmasını içerir, böylece partikül maddenin bir filtre keki tabakası halinde birikmesi, filtrasyon işlemine katılır (Şekil 3.6). Torbalı toz toplama sistemlerinde kullanılan yüzeyi değiştirilmiş iğne keçeleri ve diğer ortamlar, bu şekilde çalışır, böylece darbeli veya ters akışlı temizleme işlemleri, kekin kolayca çıkarılmasına ve filtre ortamının yeniden kullanımına izin verir. Bazı kimyasal işlemlerde bu önemlidir çünkü kekin değeri vardır ve geri kazanımı filtrasyonun amaçlarından birdir. Silisli toprak gibi bir filtre yardımcısının olduğu birçok işlemde kullanıldığında, filtre keki filtre ortamı haline gelir ve dokunmamış malzemeye destek görevi görür [31].



Şekil 3.6. Kek filtrasyonu [25]

Derinlik gerilmesi mekanizması: Bu, gözenek çaplarına kıyasla nispeten kalın olan ve gözenek çaplarının uzunlukları açısından oldukça değişken olduğu keçeler ve dokunmamış malzemeler için geçerlidir. Partiküller, çapın partikülden daha küçük hale geldiği ve bu noktada partikülün gözenek içinde hapsediği bir boyunlaşma noktasına ulaşana kadar gözeneklere nüfuz eder.

Derinlik filtrasyonu mekanizması: Derinlik filtrasyonu, derinlik gerilmesinden farklıdır. Parçacık, gözenek yapısının herhangi bir noktasında çaptan daha küçük olabilse bile, bir akışkandan bir parçacığı çıkarmak için mekanizmalar içerir. Bu mekanizmalar parçacık yakalama mekanizmalarıdır (Şekil 3.7).

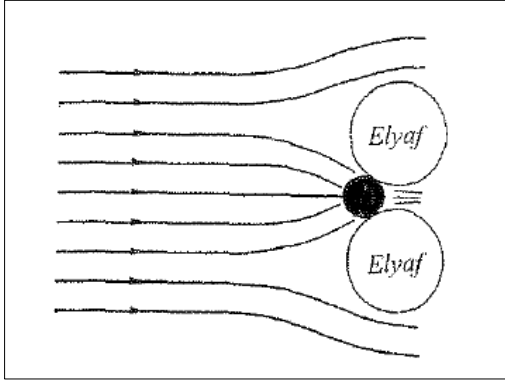


Şekil 3.7. Derinlik filtrasyonu [25]

Filtreler gaz moleküllerinin içinden geçmesine izin verecek küçük gözeneklere sahiptirler. Bu moleküller filtredeki liflerin etrafında sürekli bir akıntı yaratmaktadır. Küçük parçacıklar bu gözeneklerin içinden gaz akıntısı ile kolayca taşınıp atmosfere çıkmaktadır. Fakat büyük parçacıkların böyle bir şansları yoktur. Büyük parçacıklar ataletleri nedeniyle lifin etrafından dolaşacak dönüşü yapamazlar. Bunun yerine lif yüzeyine çarpıncaya kadar düz gitmeyi sürdürürler. Bu davranış sonucunda çarpışma olarak adlandırılan parçacık yakalama etkilerinden biri gerçekleşmiş olur [31]

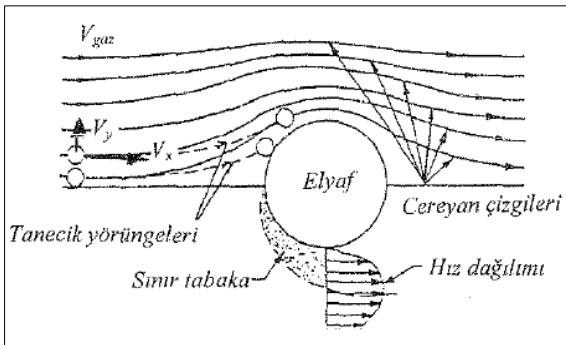
Filtrede toplanacak toz taneciklerinin çapı ile filtre materyali elyaf çapına göre, elek, atalet, yakalama ve difüzyon olmak üzere dört adet parçacık yakalama etkisi mevcuttur.

Elek Etkisi: En basit mekanizma olarak tanımlanabilen elek tipi filtrasyon etkisinde Şekil 3.8 'de görüldüğü filtre materyali yapısı olan iki elyaf ipliği açıklığından daha büyük çapa sahip olan taneciklerin yakalanmasıdır.



Şekil 3.8. Elek etkisi [32]

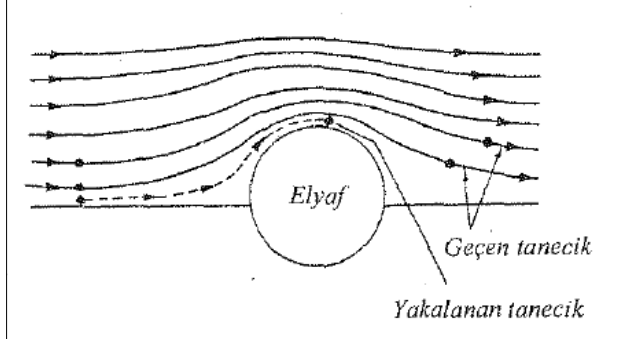
Atalet Etkisi: Hava akışına karşı filtre materyali olan elyaf engeli olduğu zaman paralel bir şekilde etrafında dönerek hareketlerine devam ederler. Şekil 3.9'daki gibi hava ile hareket halindeki parçacıklar, ataletleri nedeniyle filtre elyafı etrafında hareketlerini tamamlayamazlar, elyafa tutunurlar. Bu atalet etkisi hava hızının ve tanecik çapının artışıyla doğru, elyaf çapının artmasıyla ters orantılıdır [32].



Şekil 3.9. Atalet etkisi [32]

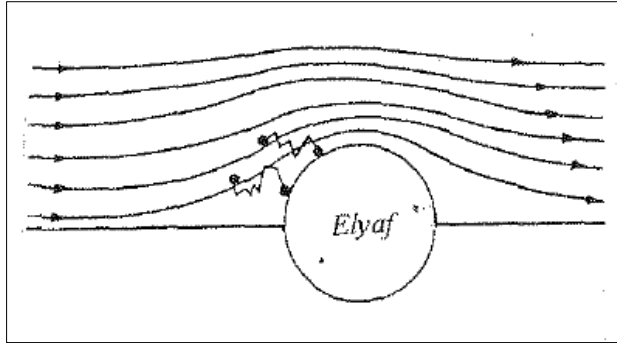
Yakalanma Etkisi: Hava akışındaki taneciklerin çapı çok küçük ise hava ile paralel bir şekilde elyaf ipliğinin etrafında dönebilir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bu dönüş yakınlığı tanecik yarıçapından daha küçükse elyaf tarafından tutulur. Hava içindeki tanecik çapı artarsa, elyaf çapı ve iplikler arasındaki uzaklık azalırsa bu etkide artış gözlenir. Bu

yakalama etkisinin kuvveti filtre elyafı içerisinde yakalanması beklenen tanecik çapına benzer ne kadar küçük çaplı filtre elyafına sahipse artar [31].



Şekil 3.10. Yakalanma etkisi [32]

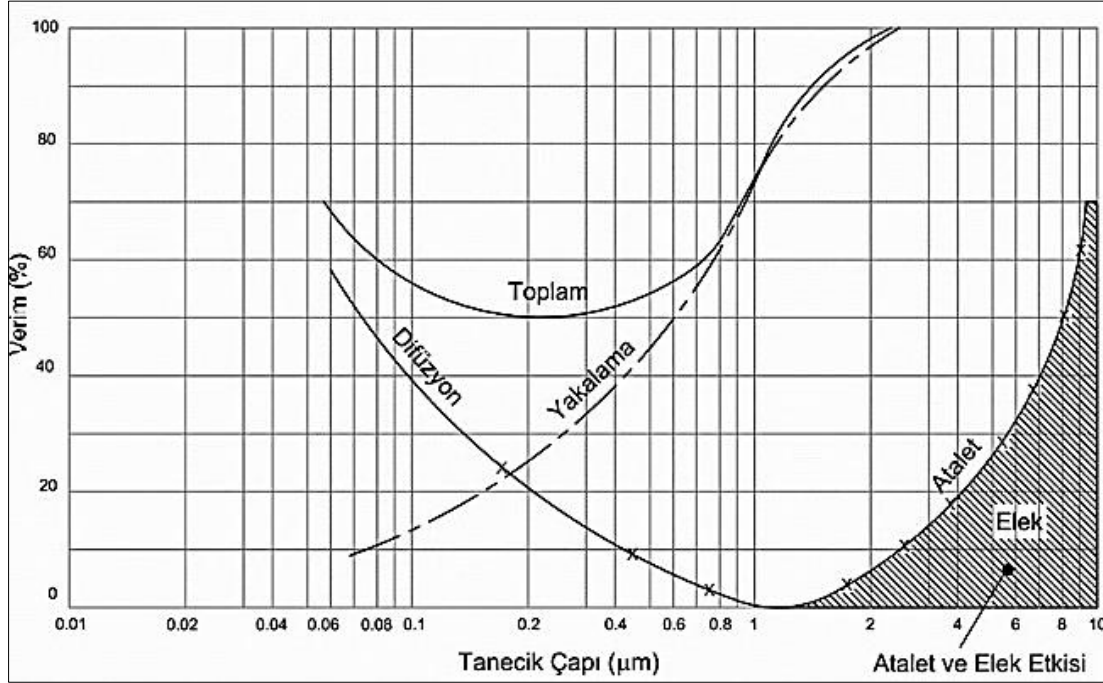
Difüzyon Etkisi: $1\mu\text{m}$ 'den daha küçük çapında tanecikler gaz molekülleriyle çarpışabilir. Bu Brownian hareketi olarak adlandırılan gaz molekülü davranışının sonucudur. Şekil 3.11 deki gibi bu düzensiz hareket karşındaki filtre elyafı taneciklerin yakalanması sağlamaktadır. Hava hızının, tanecik çapının artmasıyla, elyaf çapının küçülmesiyle difüzyon etkisinde artış gözlenmektedir [32].



Şekil 3.11. Difüzyon etkisi [32]

Bir filtrenin toplam verimi bu dört filtrasyon etkisinin toplamından oluşmaktadır. Bu nedenle toplam verimin belli koşullar altında, belli bir minimum değeri olacaktır. Büyüyen tanecik boyutu ile yakalanma ve atalet etkileri artarken, difüzyon etkisi ise azalmaktadır. Bu da, bir filtrede yakalanması en zor olan belirli bir tanecik boyutunun varlığına işaret etmektedir. Şekil 3.12'de filtre materyali olarak cam yünü kullanılan hassas filtrede, filtrasyon etkilerinin ve tanecik çapının verim üzerindeki değişimi yer almaktadır.

Yakalanması en zor olan tanecik boyutunun 0.15-0.3 μm çapındaki tanecikler olduğu görülmektedir [30].



Şekil 3.12. Belirli bir filtre için çeşitli filtrasyon mekanizmalarının tanecik çapına göre filtrasyon verimine etkisi [30]

3.3.2. Toz toplamada kullanılan filtre tipleri

Filtreli toz toplayıcıları potansiyel performansıyla hava veya gaz akışlarından tozun uzaklaştırılması için çok çeşitli uygulamalara sahiptir.

Bir filtreli toz toplayıcının temel biçimi, içinde birkaç benzer filtre elemanlarının bulunduğu büyük bir bölmedir. Bu elemanlar, aynı zamanda yuvayı iki parçaya ayıran yatay bir destek plakasından dikey olarak sarkar, içinde elemanların asılı olduğu kirli gaz tarafı ve plakanın üstündeki temizlenmiş hava tarafı.

Toz toplayıcıdaki filtreleri bez (torba) ve kartuş filtreler olarak iki grupta inceleyebiliriz. Bir bez filtredeki en yaygın eleman biçimi, temelde silindirik bir filtre materyali parçasına sahiptir; her iki ucu da destek kafesine kapatılmış şekilde (manşon veya tüp) veya alttan (torba) kapatılmış ve üst destek plakasıyla sızdırmaz hale getirilmiştir. Bez filtre aslında silindirik olabilir (daha sonra çorap olarak da adlandırılır) veya düz olabilir (cep veya zarf)

(Resim 3.1). Torbaların ve ceplerin performansı, aynı malzemeler ve hava filtreleme alanı oranı için esasen benzerdir; temel fark, olağan temizleme yöntemindedir [31].



Resim 3.1. Bezel filtreler [33]

Pileli filtre kartuşları, genellikle yuvaya yatay olarak monte edilen bez filtrelerden giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kartuşlar, alan ve enerjiden tasarruf sağlayabilir. Bu toz toplayıcı filtre elemanları genellikle selüloz karışımlarından (kâğıt) veya membranlar dahil olmak üzere polyester veya polipropilenden (yün) eğrilerek bağlanmış dokunmamış malzemelerden yapılır (Resim 3.2) Pile geometrileri, farklı eleman çaplarına göre değişir. Pileli kartuşlu toz filtresi elemanları, mekanik sallama üniteleri, basınçlı hava darbeleri jet temizleme ve ters üfleme ile temizlenebilir. Bunların sonuncusu, filtre elemanının tüm yüzeyinde tekdüze bir temizleme etkisi sağlar [31].



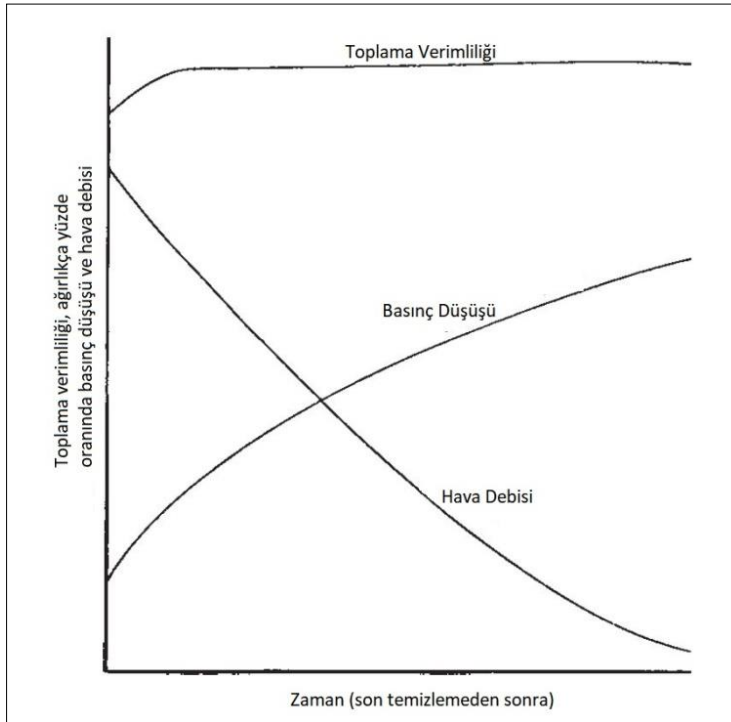
Resim 3.2. Kartuş filtreler [33]

Filtreler genellikle hava içindeki partikülleri, ayırmak için aynı yöntemi kullanır. Toz yüklü hava, filtre ortamındaki boşluklardan daha büyük partiküllerin basit eleme işlemi ile

biriktirildiği bir kumaş tüp veya zarf içinden akar. Kumaşın hava giriş yüzeylerinde hızla bir toz keki oluşur. Toz keki daha sonra mikrometrenin altındaki çapa sahip tozları ve dumanı giderebilen oldukça verimli bir filtre görevi görür ve daha sonra temelde kek kumaşı destekleyici bir yapı görevi görür.

Verimlilik derecesi açısından, dokunmamış filtre kumaşları (keçeler ve eğrilerek bağlanmış elyaflar), gözenekleri küçük olduğu için dokuma kumaşlardan daha verimlidir. Her tür kumaş, küçük elyaf çapları, yakın dokuma veya paketlenme ve kumaşın birim alanı başına daha fazla elyaf ağırlığı kullanılarak verimli hale getirilebilir. Verimliliği artırmak doğal olarak geçirgenlikte ve temizlenebilirlikte azalma anlamına gelir.

Filtrasyon verimliliği, filtrelerde sabit bir parametre değildir. Servis sırasında kek etkisinden dolayı verimlilik artar ve geçirgenlik azalır ve normalde kullanımdan ve temizlemeden sonraki verimliliğinden daha yüksektir. Kumaş seçimi bu nedenle esasen verimlilik, temizlenebilirlik ve geçirgenlik arasında bir uzlaşmadır. Bir filtrenin performans özellikleri normalde Şekil 3.13'de gösterilen eğri tiplerini takip eder.



Şekil 3.13. Filtre performansı [25]

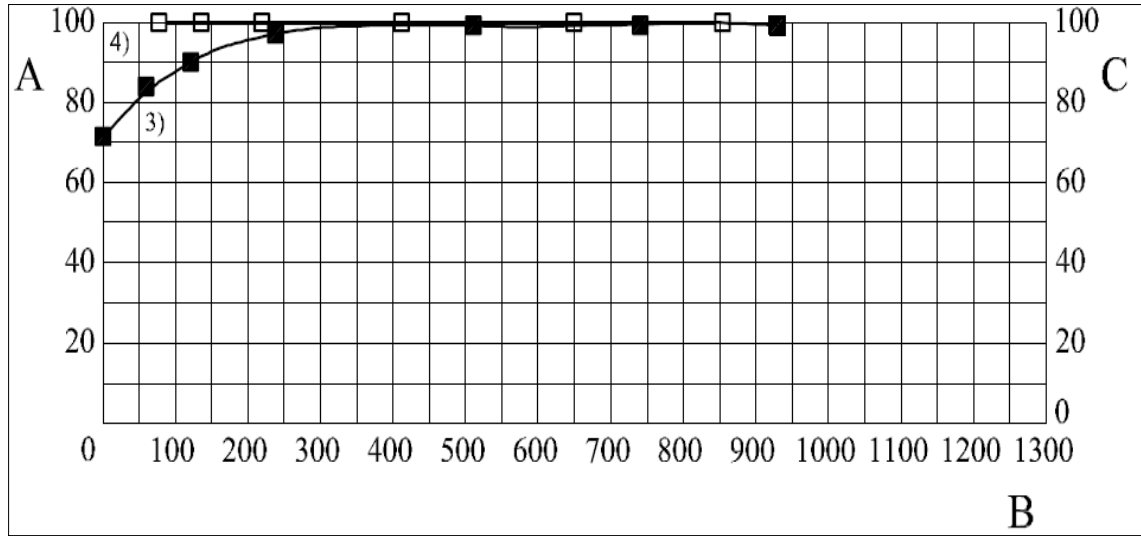
Hiçbir filtreli toz toplayıcı %100 verimli hale getirilemez, ancak uygun materyal seçimi, yeterli boyutlandırma ve iyi tasarım ile bir toz toplayıcı % 99'u aşan verimliliklerde çalışabilir. Filtrenin temizlenmesi gerektiği bir kullanım döngüsünün son noktası, akışa karşı direncin hava akışında kabul edilebilir bir minimum değerin altına düşmesine neden olduğu zamandır. Bir filtre bireysel eleman temizliği ile sürekli çalıştırılabilir.

Bir filtrenin boyutlandırılması veya derecelendirilmesi, doğrudan filtre materyalinin m²'si başına m³ / dk hava cinsinden ifade edilen A/C (hava filtreleme alanı oranı) ile verilir. Etkili oran, filtre ortamından geçen gaz akımının ortalama hızını temsil eder ve dolayısıyla doğrudan filtrasyon hızı olarak da ifade edilebilir. Tipik olarak bu, 0,3-3,5 m/dk arasında değişebilir, ancak ortalama değerler genellikle 0,6 ila 1,2 m/dk arasında değişir. Toz konsantrasyonu ne kadar düşükse ve temizleme aralığı ne kadar kısa olursa, kullanılacak filtreleme hızları o kadar yüksek olur. Hava-toz oranı, ilgili toz türünden ve kullanılan temizleme yönteminden etkilenir [25].

3.3.3. Toz toplamada kullanılan filtre standartları

Farklı ülkelerin ve bölgelerin geliştirdiği değişik standartlar filtrasyon verimliliğinin ölçülmesinde kullanılmaktadır.

Avrupa'da uygulanan EN 779:2012 standardına göre G1-G4 sınıfında yer alan ön filtreler tutma (yakalama) olarak adlandırılan test uygulanır. Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi ince ve çok ince hava filtreleri F5'ten F9'a kadar sınıflandırılırlar. Bu sınıftaki filtreler 0,4 µm çapındaki aerosol parçacıklarla test edilirler ve filtrelenen parçacık sayısının yüzdesi verimliliği ifade eder. Şekil 3.14'te örnek F9 sınıfı filtrenin verim eğrisi yer almaktadır. A çubuğu 0,4 µm partikül çapında % verimliliğini, B çubuğu gram olarak toz yüklemesini, C çubuğu toz yakalama % verimini belirtir. 3 test havası akış hızında beslenen tozun bir fonksiyonu olarak yakalamayı, 4 eğrisi yine test havası akış hızında beslenen tozun bir fonksiyonu olarak 0,4 µm partikül çapında % verimliliği göstermektedir [34].



Şekil 3.14. EN 779:2012 standardındaki örnek filtre için verimi eğrisi [34]

Çizelge 3.2. EN 779:2012 standardına göre sınıflandırma [34]

Sınıfı	Ortalama Sentetik Toz Verimliliği (%)	Ortalama 0.4 µm tutma verimliliği (%)	Son Basınç (Pa)
G1	$50 \leq A_m < 65$	-	250
G2	$65 \leq A_m < 80$	-	250
G3	$80 \leq A_m < 90$	-	250
G4	$90 \leq A_m$	-	250
F5	-	$40 \leq E_m < 60$	450
F6	-	$60 \leq E_m < 80$	450
F7	-	$80 \leq E_m < 90$	450
F8	-	$90 \leq E_m < 95$	450
F9	-	$95 \leq E_m$	450

EN 779:2012 standardı, bir hava filtresinin sadece bir parçacık boyutunu yakalama yeteneğini test ediyor, havada bulunan diğer parçacıklara karşı nasıl çalıştığını dikkate almadığı için yürürlükten kaldırılmıştır. Yerine, hava filtrelerini geniş bir yelpazedeki parçacıklarla kabiliyetini test eden, ISO16890:2016 yürürlüğe girmiştir.

ISO 16890 standardı, hava filtrelerini dört gruba ayırmaktadır (Çizelge 3.3). Her grup için bir ön koşul, bir filtrenin uygun parçacık boyut aralığının en az %50'sini yakalamasıdır. Örneğin, bir filtre PM1 partiküllerinin %50'sinden fazlasını yakalarsa, bir ISO ePM1 filtresi olarak gruplandırılacaktır. ISO standardı aynı zamanda kaba toz filtrelerini de ISO Coarse olarak değerlendirmektedir. %50'den daha az PM10 yakalayan filtreler bu gruba girmektedir [35].

Çizelge 3.3. ISO 1690:2016 standardına göre sınıflandırma [35]

ISO 16890 Grup Sınıflandırması		
ISO ePM1	ePM1 min $\geq$ 50%	Virüsler, nano partiküller, egzoz gazları
ISO ePM2.5	ePM2,5 min $\geq$ 50%	Bakteriler, polenler, toner tozları
ISO ePM10	ePM10 $\geq$ 50%	Ağır atmosferik tozlar, kül
ISO Coarse	ePM10 $\leq$ 50%	Saç teli, kum

Amerika'da ise filtre verimliliği için ASHRAE 52.2:2012 uygulanmaktadır. Çizelge 3.4 'de filtrenin minimum verimliliğini gösteren değerini (MERV: Minimum Efficiency Reporting Value) belirlemek için partikül boyut aralığı verilmiştir. Çizelge 3.5'de bu boyut aralığına göre ortalama verimlilikler ve sınıflar belirlenmiştir [36].

Çizelge 3.4. ASHRAE 52.2:2012 partikül boyut aralığı [36]

Boyut sınıfı	Partikül boyutu μm	Aralık
1	0,30-0,40	1
2	0,40-0,55	
3	0,55-0,70	
4	0,70-1,00	
5	1,00-1,30	2
6	1,30-1,60	
7	1,60-2,20	
8	2,20-3,00	
9	3,00-4,00	3
10	4,00-5,50	
11	5,50-7,00	
12	7,00-10,00	

Çizelge 3.5. ASHRAE 52.2:2012 filtre verim sınıflandırma [36]

Sınıfı	Ortalama verim faktörü %			Ortalama test tozu verimliliği %
	Aralık 1 (0,3-1 μm)	Aralık 2 (1-3 μm)	Aralık 3 (3-10 μm)	
1	-	-	$E3 < 20$	$A_{avg} < 65$
2	-	-	$E3 < 20$	$65 \leq A_{avg}$
3	-	-	$E3 < 20$	$65 \leq A_{avg}$
4	-	-	$E3 < 20$	$65 \leq A_{avg}$
5	-	-	$20 \leq E3$	-
6	-	-	$35 \leq E3$	-
7	-	-	$50 \leq E3$	-
8	-	$20 \leq E2$	$70 \leq E3$	-
9	-	$35 \leq E2$	$75 \leq E3$	-
10	-	$50 \leq E2$	$80 \leq E3$	-
11	$20 \leq E1$	$65 \leq E2$	$85 \leq E3$	-
12	$35 \leq E1$	$80 \leq E2$	$90 \leq E3$	-
13	$50 \leq E1$	$85 \leq E2$	$90 \leq E3$	-
14	$75 \leq E1$	$90 \leq E2$	$95 \leq E3$	-
15	$85 \leq E1$	$90 \leq E2$	$95 \leq E3$	-
16	$95 \leq E1$	$95 \leq E2$	$50 \leq E3$	-

3.4. Fanlar

Fanlar toz toplama sistemlerinde kritik ekipmanlardan biridir. Fanlar havanın sistem boyunca hareketini sağlar. Toz toplama sistemlerinde fanlar havayı emme yönünde yerleştirilir ya da havayı basma yönünde yerleştirilir. Toz toplama sistemi tasarımında hava debisi ve basıncını etkileyen en önemli parametre fanın özellikleridir.

Fan türlerini incelediğimizde temelde iki tip fan türü vardır. Bunlar aksel akışlı ve santrifüj akışlı fanlardır. Bu fanlar kullanım yerlerine göre çeşitlilik göstermektedir.

3.4.1. Aksel Akışlı Fanlar

Aksel fanlar havanın pervanesinin dönme yönüne aksel veya paralel şekilde hareket etmesini sağlarlar. Pervane, tüp aksel, iki aşamalı ve kanatlı gibi farklı aksel fan çeşitleri bulunmaktadır. Pervane olarak adlandırılan fanlar en çok kullanılan türüdür. Bunlar ısı kaynağının yanında genellikle bir duvara montaj edilen sıcak havayı dış ortama egzoz etmekte kullanılan fanlardır (Resim 3.3). Tahrik yöntemi olarak doğrudan ve kayışlı gibi çeşitli konfigürasyonları vardır. Fan kapatıldığında kapanan pancurlara sahip duvar monte fanlarda yapılabilir. Bu amaca yönelik fanlar duvara veya kaideye monte edilebilir. Pervaneli fanlar, düşük statik basınçlarda büyük hacimli havayı hareket ettirmek için tasarlanmıştır.



Resim 3.3. Duvara monte fanlar [38]

Bir kanaldan havayı egzoz etmek için kullanılan boru aksel fanlardır (Resim 3.4, sol). Silindirik bir muhafaza içinde çok sayıda kanatlı yapıdan oluşurlar. Kanatlar genellikle hava hareketine yardımcı olacak şekilde biçimlendirilmiştir. Pervane dış çapının %30 -

50'si ortadaki motor çapı olabilir. Muhafaza, hava kanalına bağlıdır ve motor bağlantı aparatını içerir. Pervaneli fanlar için gerekenden daha yüksek, orta düzeyde statik basınca sahip koşullarda bu fanlar kullanılır. Kanatlı eksenel fanlar, tüp eksenli fanlarla benzerlik gösterir. Kanatlı fan, kılavuz kanatlara sahiptirler (Resim 3.4, sağda). Bu kanatlar, hava akışına paralel yönlendirilmiştir, fan kanadından teğetsel hava akış hızını geri kazanmak ve onu statik basınca dönüştürmek için kullanılır. Pervane veya tüp eksenli fanlarda enerji kaybı olarak görülen teğetsel hava akış hızı statik basınç olarak geri kazanılmaz. Yüksek statik basınca sahip koşullarda bu fanlar kullanılır [37].



Resim 3.4. Solda boru eksenel fan, sağda kanatlı eksenel fan [38]

İki aşamalı eksenel akışlı fanlar, temelde seri olarak yapılandırılmış iki eksenel akışlı fandır. Bu konfigürasyon, her bir fanın çalışma basıncı seri halindeyken birbirine eklendiğinden, yüksek statik basınç içeren koşullarda çalışmaya izin verir. Bu fan, her bir fanın arasına yerleştirilmiş kılavuz kanatlar ile her bir fanın aynı yönde dönmesini sağlayacak şekilde tasarlanabilir veya fanlar ters yönde dönebilir [37].

3.4.2. Santrifüj Fanlar

Santrifüj fanlarda radyal şekilde bir hazneye yönlendirilen hava dönen bir pervaneden çekilmektedir (Resim 3.5). Haznenin kullanım amacı istenilen konuma hava akışını yönlendirebilmektir. Bir santrifüj fanın hava akışı, eksenel akışlı fanlardan farklıdır. Ortaya çıkan hava akışı, kanatta oluşan harekete paralel şekilde ya da eksen yönünde dönüş hareketine diktir [39].

Çok sayıda santrifüj fan vardır. Fandan geçen akış temelde tüm tipler için aynıdır, fark kanatların konfigürasyonundadır. Her kanat tipinin, aşağıda ayrıntıları verildiği gibi, farklı avantajları vardır [37].

Profil kanatlar düşük gürültü seviyesine ve yüksek mekanik verime sahip fanlardır. Geriye eğimli kanatların verimliliği, profil kanatlara kıyasla biraz daha düşüktür. Bu kanatlar, kirli havayı işlemeye daha uygundur çünkü tek kalınlıktadırlar ve kirli havanın fan kanatları üzerindeki etkilerine dayanabilecek daha ağır malzemeden yapılabilirler. Geriye eğimli kanatlar daha düşük yapısal mukavemete ve verime sahiptir. Üretimi kolay olmasının nedeni kanat eğriliğinin ortadan kalkmasıdır. Radyal kanatların uçları eğilmiş şekildedir. Bu tipler, asgari hava kirliliğine sahip şiddetli yüksek sıcaklık koşulları altında esas olarak büyük çaplarda kullanılır. İleri eğimli kanatlar, benzer boyut ve hızdaki santrifüj fanlardan fazla hava akış hızına sahiptir. Bu durum daha az alanla daha fazla hava sağlar. Çoğunlukla klimalarda, elektronik parçaların soğutmasında ve fırınlarda uygulanır. Radyal kanatlar sağlamdır ve çalışırken kanatlarını temizler, fakat düşük verimliliğe sahiptir. Taşıma işlemlerinden kaynaklanan aşındırıcı dumanlar ve aşındırıcı malzemeler içeren hava akışları için uygundurlar [37].

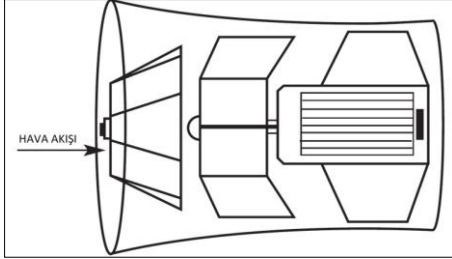


Resim 3.5. Santrifüj fan [38]

3.4.3. Diğer Fanlar

Eksenel fanın bir başka iyileştirmesi de kanatlı eksenel fanıdır. Şekil 3.15'te gösterildiği gibi, kanatlı bir fan, esasen hava akışının kinetik enerjisini basınca dönüştürerek hava akışı modelini iyileştiren çıkış kanatlarına sahip bir tüp eksenel fanıdır. Bu kanatlar, nispeten üniform bir hava akışı profili oluşturur. Kanatlı fanlar tipik olarak, bir kazan egzozu için indüklenmiş hava akımı servisi gibi orta ila yüksek basınçlı uygulamalarda kullanılır. Tüp eksenli fanlar gibi, pervane eksenli fanlar da düşük bir dönen kütleye sahip olma eğilimindedir, bu da nispeten hızlı bir şekilde çalışma hızına ulaşmalarına izin verir. Bu özellik, hızlı hava tahliyesinin veya beslemenin gerekli olduğu acil havalandırma

uygulamalarında kullanışlıdır. Ayrıca, diğer eksenel fanlar gibi, kanatlı fanlar da ters yönde akış oluşturabilir, bu da havalandırma uygulamalarında yardımcı olur. Koşullara bağlı olarak, bu uygulamalar temiz hava beslemesini veya kirli havanın uzaklaştırılmasını gerektirebilir [40].



Şekil 3.15. Kanatlı eksenel fan [40]

3.5. Temizleme Mekanizmaları

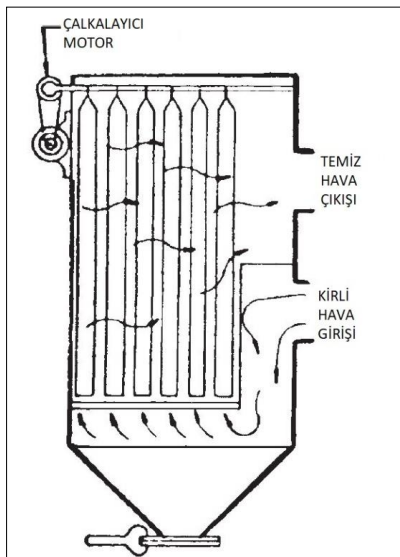
Bir filtrede toplanan tozu temizlemek için kullanılan yaygın yöntemler, tüm filtre dizisinin mekanik olarak çalkalanması veya tek seferde düşük basınçlı ya da yüksek basınçlı (darbeli jet) ters hava üflemesidir. Bu işlem bir seferde tüm filtre dizi bölümü, bir bölüm veya sırayla her bir filtre olarak yapılabilir. Kullanılan yöntem, kullanılan metaryale, elemanların konfigürasyonuna, tasarlanan görev döngüsüne ve yapısal konfigürasyonuna bağlıdır. Malzemenin etkisi ile ilgili olarak, keçeli kumaşların temizliği daha zordur ve darbeli jet temizliği gerektirir. Ama pürüzsüz, kolay kek bırakan bir yüzeye sahip malzemeler herhangi bir yöntemle temizlenebilir. Dokuma kumaş elemanları normal olarak sallama veya ters akışla yeterince temizlenir [19].

3.5.1. Çalkalayarak temizleme

Çalkalayıcı temizliği kullanmak için, torbaları açık uçları aşağı bakacak şekilde kapalı uçtan sarkıtılır. (Şekil 3.16). Hava akışı artık her bir torbaya alttan ve içten dışa doğru, torbaların içinde katı maddeler toplanır. Hava akışı, çalışma sırasında torbaların şişmesine neden olur ve bu nedenle iç desteğe ihtiyaç duymazlar. Çoğunlukla aralıklı işler için kullanılan torbaların, temizlik gerektiğinde hava akışı durdurulur ve torbaların üst kısımları, toplanan tozu silkelemek için titreşimli bir mekanizma ile sallanır [25].

Torbaya çeşitli şekillerde hareket verilebilir, ancak genel etki kumaş boyunca bir sinüs dalgası yaratmaktır. Dalga hareketinin bazı kısımları sırasında kumaş torba merkez hattından dışarı doğru hareket ederken, yüzeyde biriken toz kumaşla birlikte hareket eder. Kumaş uzama sınırına ulaştığında, toz parçalarının kumaştan kopması ve huniye inmesi için yeterli eylemsizliği vardır. Genellikle aralıklı olarak çalıştırılan küçük, tek bölmeli torbalar için, çalkalayıcı mekanizmaya takılan bir kol, tipik olarak bir vardiyanın sonunda uygun aralıklarla manuel olarak çalıştırılabilir. Genellikle sürekli olarak çalıştırılan çok bölmeli torbalıklarda, sistem basınç düşüşüne yanıt veren bir zamanlayıcı veya bir basınç sensörü, torba sallanmasını otomatik olarak başlatır. Bölmeler, her seferinde bir bölmenin temizlenmesi için sırayla çalışır. Bölmeye ileri gaz akışı durdurulur, tozun çökmesine izin verilir, artık gaz akışı durur ve çalkalama mekanizması birkaç saniye ile bir dakika veya daha fazla süreyle açılır. Yerleşme ve çalkalama periyotları tekrar edilebilir, ardından bölme filtreleme için tekrar çevrim içi hale getirilir. Bölme boyunca ileri akışın bir sonucu olarak, temizlik için herhangi bir zamanda bu kısmın hizmet dışı kalmasını telafi etmek için torbalık toplama alanı arttırılmalıdır.

Temizliği etkileyen parametreler arasında sallanma hareketinin genliği ve frekansı ile monte edilmiş torbanın gerginliği yer alır. İlk iki parametre, torbalık tasarımının bir parçasıdır ve genellikle kolayca değiştirilmez. Gerilim, torbalar takıldığında ayarlanır. Bazı kurulumlar, torba gerginliğinin kolayca ayarlanmasına izin verirken, diğerleri, torbanın gevşetilmesini ve takma yüksüğüne yeniden takılmasını gerektirir [24].



Şekil 3.16. Mekanik çalkalayıcılar [25]

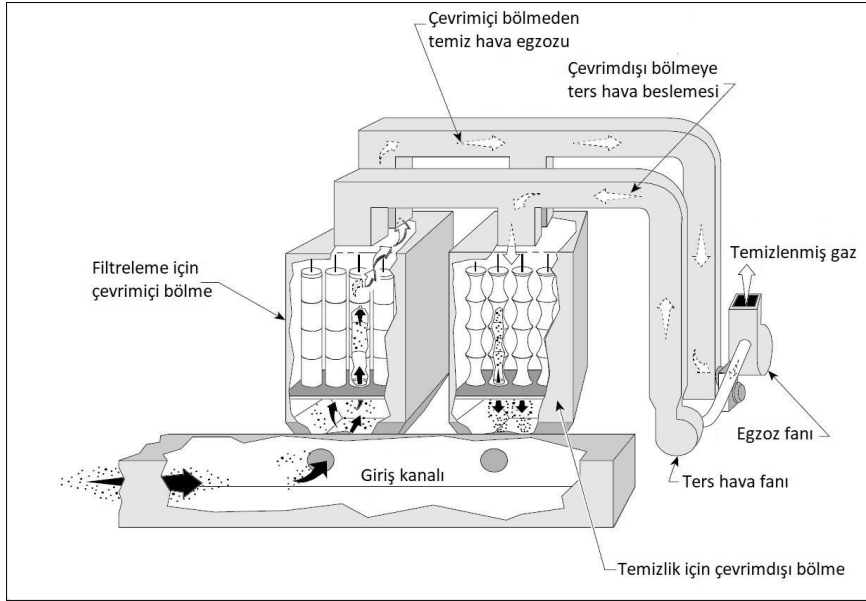
3.5.2. Ters hava ile temizleme

Cam elyaf kumaşlar piyasaya sürüldüğünde, erken bozulmayı önlemek için 30 cm çapında ve 90 cm uzunluğunda olabilen torbaların daha yumuşak bir şekilde temizlenmesi gerekiyordu. Ters hava temizleme, torbalara enerji vermenin daha az yoğun bir yolu olarak geliştirildi. Ters hava temizlemede, temizlenen bölmede torbalara giden gaz akışı durdurulur ve ters (dıştan içe) hava akışı torbalar üzerinden yönlendirilir.

Gaz akışının bu tersine çevrilmesi, torbaları merkez hatlarına doğru nazıkçe çökertir, bu da kekin kumaş yüzeyinden ayrılmasına neden olur. Ayrılmaya, toz ve kumaşın şeklini değiştirmesi nedeniyle oluşan kesme kuvvetleri neden olur. Torbanın üst kısımlarını desteklemek için kullanılan metal kapaklar, temizleme sırasında tamamen çökmelerini önlemek için poşetleri çevreleyen birkaç dikilmiş halka gibi torbanın ayrılmaz bir parçasıdır.

Bu halkalar olmadan, toplanan toz, temizleme sırasında kumaş kendi içine çöktüğü için torbayı boğma eğilimindedir. Çok bölmeli çalkalayıcı torba haznelerinde olduğu gibi, ileri gaz akışını durduran ve temizleme eylemi başlamadan önce tozun yerleşmesine izin veren ters hava torba haznelerinde benzer bir döngü gerçekleşir. Ayrıca, çalkalayıcı torbalarda olduğu gibi, herhangi bir zamanda temizlik için hizmet dışı kalan kısmı telafi etmek için ters hava torbalıklarına ekstra filtreleme kapasitesi eklenmelidir.

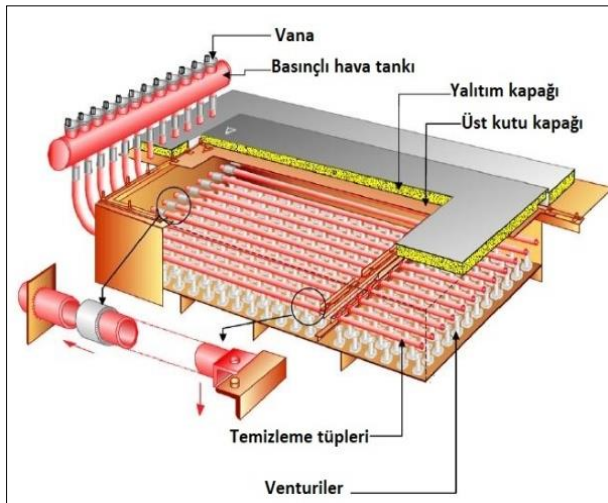
Bazı ters hava torba yuvaları, torbaya iletilen enerji miktarını artırarak temizlemeye yardımcı olmak için ek bir çalkalayıcı sistemi kullanır. Ters havanın kaynağı genellikle bir veya iki bölme için ileri gaz akışından daha yüksek veya daha yüksek bir gaz-kumaş oranında temiz, kuru hava sağlayabilen ayrı bir sistem fanıdır. Şekil 3.17'de, ters havayla temizlenmiş bir torba haznesini göstermektedir.



Şekil 3.17. Ters hava ile temizleme [24]

3.5.3. Darbeli jet ile temizleme

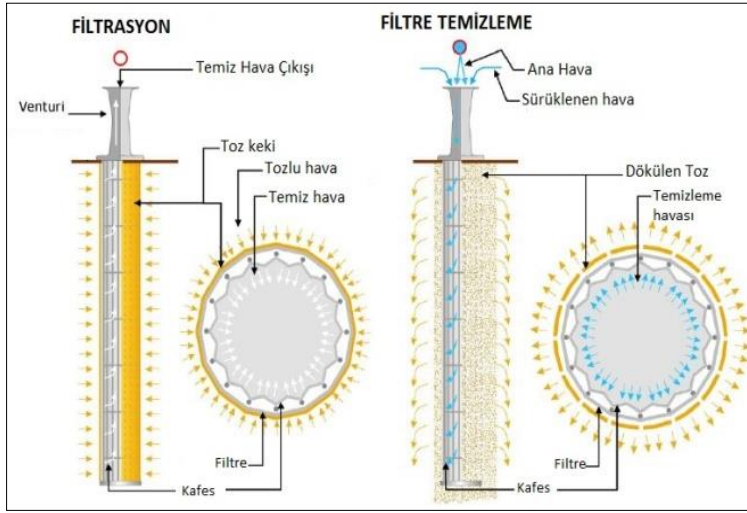
Egzoz gazı ile taşınan toz, filtrenin dış yüzeyinde toplanır, böylece “toz keki” olarak adlandırılır. Sürekli toz birikmesi nedeniyle toz kekinin periyodik olarak uzaklaştırılması gerekir. Darbeli jet temizliği, filtre çalışırken sık temizlik yapılmasını sağladığı için bu amaçla yaygın olarak kullanılır. Darbeli jet temizliğinde bir valf tarafından kısa bir pulse ile basınçlı hava serbest bırakılır ve bir temizleme borusundan çoklu nozulları dağıtılır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Darbeli Jet Temizleme sistemi şeması [10]

Her nozul, tek bir torbanın açık ucunun yukarısına yerleştirilen bir venturiye doğru yönlendirilir. Sıkıştırılmış hava, nozul boyunca genişler, böylece ana havanın atım püskürmesini oluşturur. Darbe jetinin etrafındaki yakın alan bölgesinde, ikincil hava, darbe jetini ventüri yönünde hareket ederken sürükler (Şekil 3.19).

Darbeli jet normal filtre işlemi sırasında baca gazı akışına ters yönde etki eder. Temizleme modunda, darbe jeti ventüri boyunca ve torbaya akar, burada kumaşın akışının tersine dönmesi ve yüksek direnç, darbe basıncı olarak adlandırılan bir iç basınç artışına neden olur. Sonuç olarak, torba kısa bir süre şişirilir ve toz keki çıkarılır [8].



Şekil 3.19. Normal filtrasyon sırasında (solda) birikme ve filtre temizlik sırasında tozun yerinden çıkması (sağda) [8]

Torbalar tipik olarak dokunmamış keçe veya polyester malzemeden yapılır. Dokuma malzemeler darbeli jet toplayıcılarda kullanılmaz etkili hava temizliği için sabit bir toz tabakası birikimi gerektirirler. Darbeli jet toplayıcılar torbaları agresif bir şekilde temizlediğinden, dokuma kumaşa aşırı toz partikülleri girebilir. Geleneksel silindirik torbaların yerine pileli filtreler de takılabilir. Pileli filtreler, geleneksel bir torbayla aynı alanda daha fazla yüzey alanı sunabilir. İlk yatırım maliyeti daha fazladır. Darbeli jet toplayıcılar, mekanik çalkalayıcı toplayıcılar gibi daha önce tartışılan toplayıcı tarzlarından daha uygun maliyetlidir. Daha yüksek A/C oranlarında çalışabilirler, bakımı yapılacak hareketli parçaları yoktur ve daha düşük kurulum maliyetleri içerirler [19].

4. TOZ TOPLAMA SİSTEMİ TEORİK ANALİZİ

Filtrasyon mekanizmalarını teorik olarak incelediğimizde, akış halindeki hava hızının, içerisindeki taneciklerin hızlarından büyük olduğunda bir kuvvet oluşmaktadır. Bu direnç kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Eş. (4.1) ile kuvvet hesaplanabilir [7].

$$(F_{y-direnç} = 3\pi\mu D(V_{y-gaz} - V_{y-toz})) \quad (4.1)$$

Atalet kuvveti ise Eş. (4.2) gibidir,

$$F_{y-atalet} = ma = \frac{\pi}{6}\rho D^3 \frac{dV_{y-toz}}{dt} \quad (4.2)$$

Tanecik hızının Y-doğrultusundaki değişimi için Eş. (4.3) elde edilir.

$$\frac{dV_{y-toz}}{dt} = \frac{18\mu(V_{y-gaz}-V_{y-toz})}{\rho D^2} \quad (4.3)$$

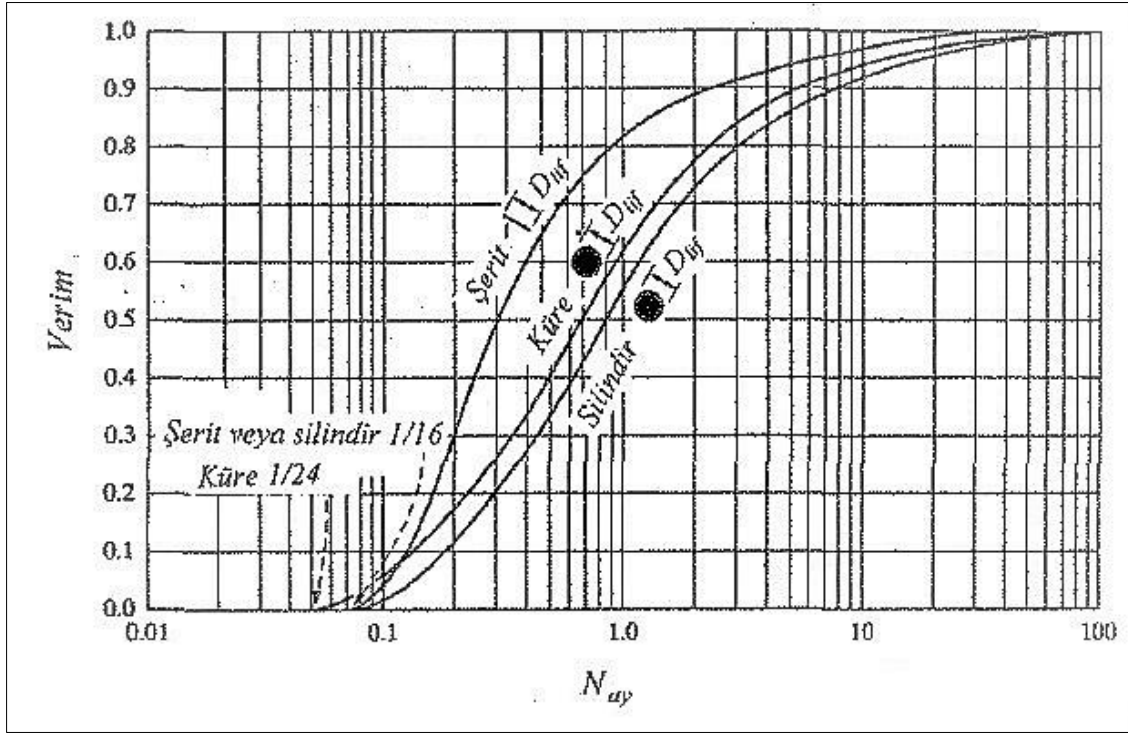
Bu denklemin integrasyonu alındığında Eş. (4.4) eşitliğini verir.

$$\int \frac{dV_{y-toz}}{(V_{y-gaz}-V_{y-toz})} = \frac{18\mu\Delta t}{\rho D^2} \quad (4.4)$$

Filtre materyalindeki lifin çapı D_{lif} ise lif etrafından tozun geçme süresi şeklinde olur. Eş. (4.4), Eş. (4.5) şekline gelir. N_{ay} boyutsuz büyüklüğü kaynaklarda ayrılma sayısı veya atalet sayısı olarak ifade edilmektedir [7].

$$\int_{y_2}^{y_1} \frac{dV_{y-toz}}{(V_{y-gaz}-V_{y-toz})} = \frac{18\mu D_{lif}}{\rho D^2 V} = \frac{1}{N_{ay}} \quad (4.5)$$

N_{ay} sayısına ve şekillerine göre(küre,silindir,şerit) filtre lifi verim değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir [41]. Burada verim atalet etkisi ile tutulmalarındaki değişimleridir.



Şekil 4.1. Nay sayısına göre, silindir, küre ve şerit şeklindeki lif verim değişimleri [41]

Yapılan teorik modeller ile difüzyon ve yakalama verim eşitlikleri, birçok kaynakta Eş. (4.6) ile verilmektedir [32].

$$n_{D+Y} = \frac{6\phi^{2/3}}{v^{1/6}D_{lif}^{1/2}V^{1/2}} + \frac{3D^2V^{1/2}}{v^{1/2}D_{lif}^{1/2}} \quad (4.6)$$

Bu eşitlikteki birinci terim difüzyon etkisini, ikinci terim ise yakalanma etkisini göstermektedir. terimi ise toz taneciklerin'in yayılımını göstermekte olup, bir gaz içinde asılı küresel tozlar için gazların kinetik teorisinden hareket edilerek, $k= 1,38 \times 10^{-23} \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$ K şeklinde Boltzman katsayısı, T (K) mutlak sıcaklığı, C= 1,16 Cunningham düzeltme katsayısı, μ (kg/ms) gazın dinamik viskozitesi değerleri kullanılarak, Eş. (4.7)'den yayılım bulunabilir.

$$\phi = \frac{kTC}{3\pi\mu D} \quad (4.7)$$

Yüksek bir filtreleme hızı çarpma yoluyla partikül yakalamayı destekler. Filtreleme hızı hava kumaş oranı ya da A/C oranı olarak da adlandırılır. Aşırı bir filtreleme hızı,

yakalanan malzemeyi kumaştan dışarıya veya kumaşın içinden uçuracaktır. Çoğu durumda kek için tek destek budur. Difüzyonla filtrelemeye gelince, daha yüksek bir hava-kumaş oranı partikül toplama için mevcut kalma süresini azaltır. “Normal” hava-kumaş oranları yaklaşık 3: 1'dir; "Yüksek" hava-kumaş oranları 6: 1 ve üzeridir [7].

Toz toplama sistemlerinde hava akımındaki tozu alması için toz toplama ünitesinin yeterli sayıda filtreye sahip olması gerekmektedir. Filtre sayısı toz toplama ünitelerinin parametrelerinden biri olan A/C oranını etkilemektedir.

A/C oranı; filtreden geçirilen hava debisinin toplam filtreleme alanına oranıdır. A/C oranları teorik veya ampirik ilişkilere değil, endüstri ve kumaş filtresi satıcılarının kurulum deneyimlerine dayanmaktadır. Önerilen A / C oranları genellikle belirli bir toza ve belirli bir temizleme yöntemine bağlıdır.

$$A/ C = \frac{Q}{\Sigma A} \quad (4.8)$$

Toz toplama ünitelerinde bu oran bulunurken ilk önce her filtrenin filtreleme alanını hesaplanır ve ünitedeki filtre sayısı ile çarpılır. Sistemin hava debisi bulunan değere böldüğümüzde A/C oranı elde edilir.

Aynı miktarda filtreye sahip toz toplama sistemi, filtre kartuşundan daha fazla hava iterken, toplama verimliliği düşer. Yeterli A/C oranının muhafaza edilmesi, torbanın en yüksek verimlerde çalışmasını sağlar [42].

Teorik modeller dışında uygulamadaki filtrasyonda bir filtrenin verimliliği, filtre materyali ile tutulan hava kirletici miktarının yüzdesel değeri olarak ifade edilmektedir. Havadaki kirletici miktarı, kütleli, parçacık adedi ya da hacimsel olarak belirlenebilir. Filtrasyon verimliliği Eş. (4.9)'deki gibi ifade edilir [30].

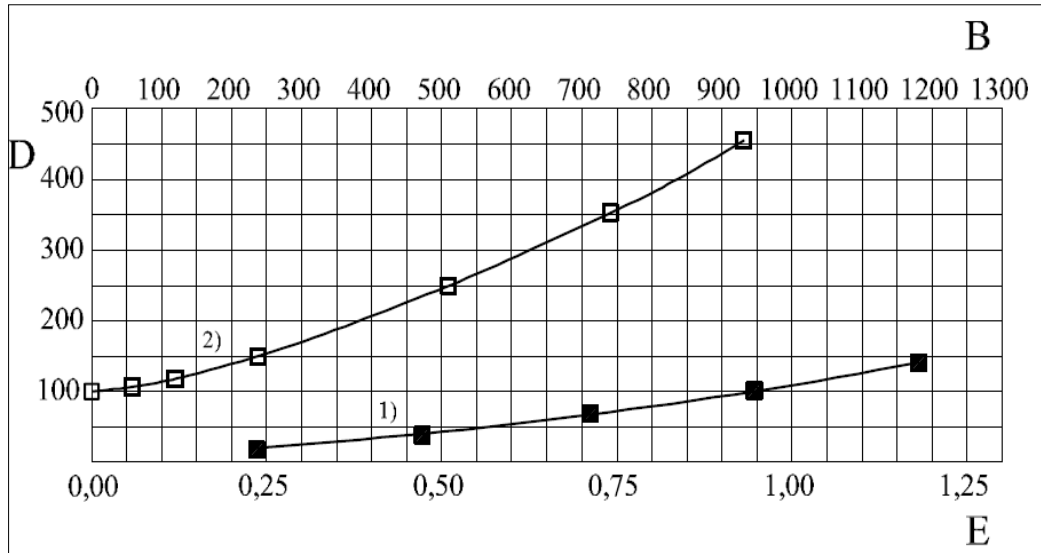
$$e = 100 \left[\frac{m_u - m_d}{m_u} \right] \quad (4.9)$$

Filtrasyon verimliliği e , mu, hava içindeki kirleticinin kirli olduğu üst akış alanındaki miktarı, m_d ise hava içindeki kirleticinin filtrelenmiş olduğu alt akış alanındaki miktarıdır [30].

Performansı etkileyen diğer bir parametrede basınç düşüştür. Basınç düşüşündeki değişiklikler genellikle ya gözeneklerin tıklandığını ya da filtrenin kırıldığını gösterir. Filtre testleri sırasında ölçülen tüm basınç kayıpları, standart hava koşullarına karşılık gelen $1,20 \text{ kg/m}^3$ referans hava yoğunluğuna düzeltilmelidir. (Sıcaklık 20°C , barometrik basınç $101,325 \text{ kPa}$, bağıl nem %50) Bununla birlikte, hava akımı $1,16 \text{ kg/m}^3$ ile $1,24 \text{ kg/m}^3$ arasında olduğu sürece herhangi bir düzeltme yapılmasına gerek yoktur. Bir filtrenin basınç kaybı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta P_{\text{filtre}} = k \mu^{2-n} \rho^{n-1} (Q)^n \quad (4.10)$$

Hava debisi ölçüm sisteminin okumaları, test edilen filtrenin girişinde geçerli olan koşullar altında hacimsel hava debisine toplanır. Bu hava debisi değerleri ve ölçülen basınç kayıpları ile, Eş. 10 'dan “n” üssü en az kare tekniği kullanılarak belirlenebilir [34].



Şekil 4.2. EN 779:2012 standardındaki örnek filtre için basınç düşüm eğrisi [34]

Test hava debisi $0,944 \text{ m}^3/\text{s}$ olan örnek filtrenin basınç düşüm eğrisi Şekil 4.2’de yer almaktadır. Çubuğu gram olarak toz yüklemesini, D çubuğu basınç düşüşünü Pa olarak, E çubuğu hava debisini m^3/s olarak belirtir. 1 eğrisi temiz filtre hava debisinin bir fonksiyonu

olarak basınç düşüşünü, 2 eğrisi test hava debisinde beslenen tozun bir fonksiyonu olarak basınç düşüşünü göstermektedir [34].

Temiz filtre debi basınç özellikleri tedarikçilerden temin edilebilir. Bununla birlikte, kararlı durum değerlerini ampirik ölçümlerle elde etmek en iyisidir. Genel olarak, düşük hızlarda, bez filtreden geçen gaz akışı viskozdur ve filtredeki basınç düşüşü, akışla doğru orantılıdır.

$$\Delta P_1 = K_1 \cdot v \quad (4.11)$$

Eş. (4.11)'de ΔP_1 kumaş boyunca basınç düşüşü, K_1 kumaşın direncidir ve v gaz akış hızıdır. Uygulamada, kumaş direnci K_1 genellikle deneysel olarak belirlenir. Kumaş ortamın özelliklerinden bu direnç katsayısının teorik bir değerini tahmin etmek mümkündür [43]. Darcy yasası şunu belirtir:

$$\Delta P_1 = -(v \cdot K / \mu) + \rho \cdot g \quad (4.12)$$

Eş. (4.12)'de K , Kozeny geçirgenlik katsayısı, μ viskozite, ρ yoğunluk ve g yerçekimi ivmesidir. Denklemi boyutsal olarak tutarlı hale getirmek için gerekli sabitlerin uygulanması gereklidir. Literatürde bulunan geçirgenlik katsayısı K değerleri 10–15 ve 10–8 m² arasında değişmektedir. K değerleri de ilişki kullanılarak tahmin edilebilir [43].

$$K = \frac{\varepsilon^3}{c \cdot S^2} \quad (4.13)$$

Eş. (4.13)'de ε gözeneklilik veya fraksiyon boşluk hacmi (boyutsuz), c bir akış sabitidir, K Kozeny katsayılarıdır ve S , gözenekli ortamın birim hacmi başına spesifik yüzey alanıdır [43].

Hava geçirgenliği belirli bir basınç düşünde hava akışının ölçümüyle belirlenir. Bu ölçüm için örnekten yönlendirilen hava sızdırmaz bir yere geçirilir ve hava akışının ölçüldüğü bir açıklıktan çıkar. Aynı zamanda filtre ortamının ve hava çıkışında bulunan manometrelerle basınç düşüşü ölçülür. Bu ölçümler hava akışının hesaplanması için kullanılır.

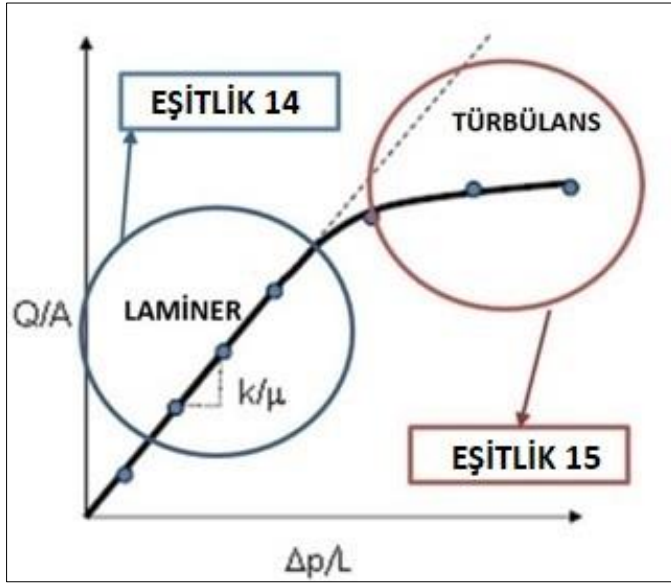
Ölçülen hava akışı Darcy kanununa göre hesaplanmaktadır. Laminar akışlarda, Darcy denklemindeki atalet terimi ihmal edilebilir ve Eş. (4.14) filtrasyon teorisinde yaygın olarak kullanılan şekli alır:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\mu}{K} \cdot v \quad (4.14)$$

$K = 1 / \alpha$ Darcy'in 1 m²'deki geçirgenlik katsayısı ve α ise geçirgenlik 1 / m² 'dir. Atalet terimi bunun yerine türbülanslı akışların varlığında gereklidir. Bu senaryoda, Eş. (4.15) halini alır. Şekil 4.3'te Darcy denklemleri arasındaki fark görülmektedir [10].

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\mu}{K} \cdot v + \rho \cdot \frac{K_{loss}}{2} \cdot v^2 \quad (4.15)$$

$$\frac{K_{loss}}{2} = 0,043(1 - \alpha)^{-2,13} \quad (4.16)$$



Şekil 4.3. Darcy denklemleri arasındaki fark [10]

Toz toplama sistemlerinde filtreler için laminar akış modelinin uygulanabilir görünmesine rağmen, pileli filtreden geçen akış aslında basit laminar değildir. Özellikle bazı hibrit sistemlerde, gaz akışı tamamen türbülanslı, geçişli ve laminar akışlı bir kombinasyondur. Bu nedenle, en uygun tasarım ve performans analizi için katlanmış filtre sistemine yerleştirilen türbülans akışını görselleştirebilen uygun bir model gereklidir [14].

Sistem çalıştırıldığında, kumaş üzerinde kek birikerek granül kek tabakasının özelliklerine orantılı olarak ek bir akış direnci oluşturur. Kek oluşumundan kaynaklanan sıvı akışına direnç, genellikle toplam akış direncinin önemli bir bölümünü oluşturur. Kek kalınlığı arttıkça bu direnç zamanla artar. Bu ek direnç (ΔP_2) tipik olarak artık dirençle (ΔP_1) aynı büyüklük düzeyindedir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta P_2 = K_2 \cdot v^2 \cdot L \cdot t \quad (4.17)$$

Eş. (4.17)'de ΔP_2 , zaman aralığı (cm H₂O), K_2 kek-kumaş filtre direnç katsayısıdır, sıvı hızı (m / dk), L giriş katı konsantrasyonu (kg / m³) ve t filtrasyon çevrim süresidir (dk). Granüler ortam boyunca akışı belirlemek için Kozeny-Carman prosedürü kullanılarak kek-kumaş filtre direnç katsayısı için bir ifade türetilmiştir.

$$K_2 = (3.2 \times 10^{-3}) \cdot \left(\frac{k}{g}\right) \cdot \left(\frac{\mu_f S^2}{\rho_p}\right) \cdot \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\right) \quad (4.18)$$

Eş. (4.18)'de k , yaklaşık 0.8'e eşit bir gözenekliliğe kadar çok çeşitli lifli ve taneli malzemeler için yaklaşık 5'e eşit olan Kozeny-Carman katsayısıdır, ε kek katmanındaki (boyutsuz) gözeneklilik veya fraksiyon boşluğu hacmidir, μ_f akışkan viskozitesidir. ρ_p katı malzemenin gerçek yoğunluğudur ve S , kek katmanındaki katıların özgül yüzey alanı / birim hacmidir. Bu denklem, filtrelenen partiküllerin çapı küçüldükçe kek gözenekliliğinin azaldığını ve sonuç olarak K_2 'nin arttığını göstermektedir. Daha büyük kek-kumaş filtre direnç katsayısının net sonucu, gözeneklilik azaldıkça basınç düşüşünün artmasıdır [43].

Toz-kumaş filtre direnç katsayısının değeri, yeni kumaş filtre kurulumlarında çalışma basıncı düşüşünü tahmin etmek için gereklidir. Filtreleme hızı ve temizleme döngüleri arasındaki süre ile bu bilgi, daha sonra hem kurulum hem de işletim giderlerini etkileyen optimum işletim prosedürlerini tahmin etmek için kullanılabilir.

Partikül yüklü bir hava akışı filtrelere sabit bir hızda (tipik olarak 2-6 cm/s) girdiğinde, partiküller yakalanır ve filtre yüzeyleri üzerinde bir toz keki oluşturur. Toz keki filtre yüzeyinde biriktikçe filtrelerin basınç düşüşleri artmaktadır. Eş. (4.19), $\Delta P'$ nin, filtre ortamından ve sabit yüzey hızının açıklığı altındaki toz kekinden gelen basınç düşüşlerinden oluştuğunu gösterir.

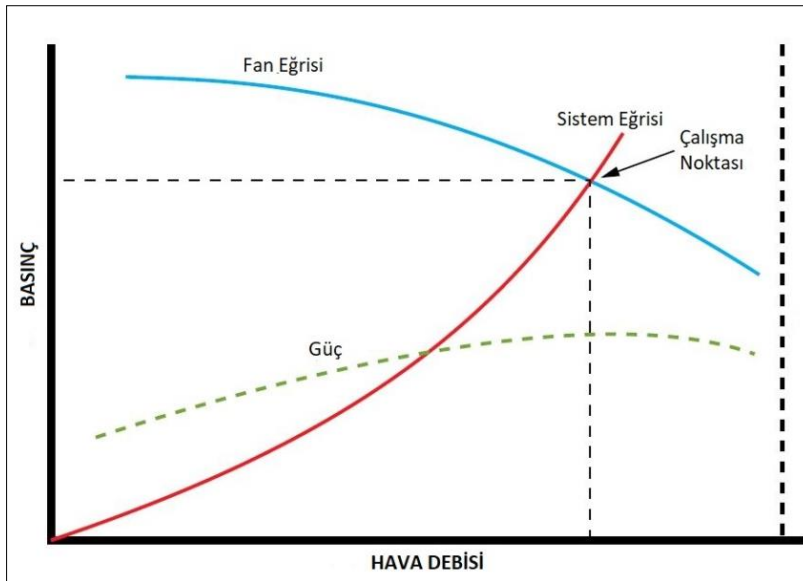
$$\Delta P_{toplam} = \Delta P_{filtre} + \Delta P_{kek} \quad (4.19)$$

Eş. (4.19)'de ΔP_{filtre} , darbeli jet temizlemesinden hemen sonra etkili artık basınç düşüşü olduğunda, bir birinci kullanım filtresinin basınç düşüşünden ve parçacık sızıntısından dolayı basınç düşüşünden oluşur. ΔP_{kek} , giriş tozu konsantrasyonuna, yüzey hızına ve çalışma filtrasyon süresine bağlı olarak toz kekinin basınç düşüşüdür.

Toz toplama sisteminde toplam basınç düşüşü; kanal cidarına sürtünme ile kanal bağlantı parçalarının, kullanılan ekipmanların ve diğer yan bağlantı elemanlarının gösterdiği dirençlerden oluşmaktadır. Eş. (4.20)'te görüldüğü gibi toz toplama ünitelerinde toplam basınç kaybı sistem fanlarının gücünü belirleyen parametrelerdendir. Toz toplama sistemlerinin enerji tüketimi hava debisi ve toplam basınç kaybıyla doğru orantılı artmaktadır.

$$P_{fan} = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_{fan}} \quad (4.20)$$

Fandan ihtiyaç duyulan güç ve verimliliği, hava debisine göre de değişir. Hava debisine karşı basınç, güç ve verimlilik eğrileri "fan eğrileri" olarak bilinir (bkz. Şekil 4.4). Fan üreticilerinin katalogları, bu eğrileri fanlarının her biri için sunar ve tasarımcının doğru fanı seçmesine yardımcı olacak bilgiler sağlar [21].



Şekil 4.4. Fan eğrisinin sistem eğrisi ile kesişimi [21]

"Sistem eğrisi", hava taşıyıcıdaki herhangi bir basınç için tasarım boyunca hareket ettirilen havanın hacmini gösterir. Tasarımcı, bu basınç farkında en azından bu hacimdeki havayı hareket ettirebilen bir hava taşıyıcı seçmelidir.

Tasarımcı, sistem ve fan eğrilerinin tasarım basıncı ve akış noktasında (çalışma noktası) kesişmesi için bir fan seçmelidir. Fan eğrisini hareket ettirmek için genellikle değişken bir kontrolör veya kısıtlama valfi kullanmak gerekir, böylece bu ve sistem eğrisi gerektiğinde kesişir.

"Çalışma noktası", sistem için fanı ve gerekli hava debisi için basıncı ve gücü belirleyen verileri verir. Çalışma noktasının optimum fan aralığı içinde olmasını sağlamak önemlidir. Bu aralığın dışında çalıştırma, gürültü ve güç tüketiminde artışa neden olur. Bu, fanı aşırı yükleyerek sistem arızasına neden olabilir [21].

Toz toplama sistemlerinde türbülanslı akış modelleri kullanılmaktadır. Eş. (4.21)'de verilen akış modellerini belirlemede en önemli parametre Reynolds sayısıdır. İç ve dış akışta farklı olmak üzere, akışın sahip olduğu Reynolds sayısı, kritik değerden küçükse akışın laminar, kritik değerden büyükse akışın türbülanslı olduğu kabul edilmiştir.

$$Re_L = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad L = x, d, d_h \quad (4.21)$$

$$Re_x \geq 500000, \text{ bir yüzey boyunca, dış akış}$$

$$Re_d \geq 20000, \text{ bir engel etrafında}$$

$$Re_{d_h} \geq 2300 \quad \text{ iç akış}$$

Türbülanslı akış için zaman ortalamalı yönetici denklemler, Navier – Stokes ve enerji denklemini içeren transport denklemleridir. Genellikle türbülanslı akış için problemler zamana bağlı olarak kabul edilir. Zaman ortalamalı transport denklemleri, türbülans sapmalarının net etkilerini sağlaması gerekmektedir.

Autodesk® CFD tarafından kullanılan türbülans modellerinin birçoğu, girdap viskozitesi ve girdap iletkenlik değişkenlerini belirlemek için iki denklemlilik bir model kullanır. İki denklem, türbülanslı kinetik enerjinin taşınmasını, K ve türbülanslı enerji dağılımını

tanımlar. Eş. (4.22)'de girdap viskozitesi ve Eş. (4.23)'de girdap iletkenliği şu şekilde hesaplanır [44]:

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4.22)$$

$$k_t = \frac{\mu_t \cdot C_p}{\sigma_t} \quad (4.23)$$

Burada σ_t türbülanslı bir Prandtl sayısı, genellikle 1,0 olarak alınır ve C_μ , ampirik bir sabittir. K ve ε için taşıma denklemleri, momentum denklemlerinin momentleri kullanılarak elde edilir. Varsayılan yüksek Reynolds sayılı k-epsilon türbülans modeli için bunlar:

Türbülans kinetik enerji (TKE) denklemi:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho U \frac{\partial K}{\partial x} + \rho V \frac{\partial K}{\partial y} + \rho W \frac{\partial K}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \varepsilon + \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

Türbülanslı enerji dağılımı (TED) denklemi:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \\ + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{K} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

Türbülanslı Schmidt sayıları, C_1 ve C_2 deneysel sabitlerdir. Bu modellerle ilişkili tüm modellenmiş sabitler aşağıdaki Çizelge 5. 1’de listelenmiştir. Bu iki denklemle, artık 9 bilinmeyen içinde 9 denklem vardır: $U, V, W, P, T, \mu_t, k_t, K, \varepsilon$ [44].

Açıklanan iki denklemlili türbülans modeli, çok sayıda uygulama için kullanılmıştır ve genellikle çoğu mühendislik uygulaması için oldukça iyi çalışır. Autodesk® CFD’de, sonlu elemanlar yöntemi, yönetilen kısmi diferansiyel denklemleri (pdes) bir dizi cebirsel denkleme indirgemek için kullanılır. Bu yöntemde, bağımlı değişkenler, küçük bir alan veya hacim (eleman) üzerinde çok terimli şekil fonksiyonları ile temsil edilir. Bu temsiller, yönetim pdeslerine ikame edilir ve daha sonra, bu denklemlerin eleman üzerindeki ağırlıklı integrali, ağırlık fonksiyonunun şekil fonksiyonu ile aynı olacak şekilde seçildiği yerde alınır. Sonuç, her elemandaki ayrı noktalarda veya düğümlerde bağımlı değişken için bir dizi cebirsel denklemdir [44].

Çizelge 4.1. Türbülanslı schmidt sayıları [44]

Sabit	Değeri	HAD İsmi	Artan Değerin Sonucu
C_μ	0.09	CMu	Daha fazla karıştırma, daha fazla kesme, basınçta daha büyük fark
C_1	1.44	CE1	Daha az karıştırma, daha düşük kesme, daha küçük basınç fark
C_2	1.92	CE2	Daha fazla karıştırma, daha fazla kesme, basınçta daha büyük fark
σ_K	1.0		(Kullanıcı değişikliği için mevcut değil)
σ_ε	1.3		(Kullanıcı değişikliği için mevcut değil)

Genel skaler taşıma denkleminin bir kaynak terimi olmadan da benzer bir formda olduğuna dikkat edilmesi gerekir. Yukarıda açıklanan sonlu eleman yöntemi doğrudan difüzyon ve kaynak terimleri üzerinde kullanılır. Bununla birlikte, sayısal kararlılık için, öneri terimleri, ağırlıklı integral yönteminin yanı sıra başka yöntemlerle işlenir. Autodesk® CFD’de kullanılan bu yöntemlerden dördü aşağıda açıklanmıştır:

ADV 1: Monoton Akış Çizgisi Yöntemi, Sayısal olarak kararlıdır. Akış yönüyle hizalanmış ağlar için önerilir. Akışla hizalı olmayan ağlar için sayısal olarak dağınıktır.

Çok sayıda iç engele sahip geometrilerde, ekstrüde ağlarda, yüzey parçalarına atanan dağıtılmış dirençlerde iyi çalışır.

ADV 2: Petrov-Galerkin Orta sayısal kararlılıktadır. (ADV 1'den az). Rastgele ağlar için daha az sayısal difüzyon içerir. Basınç tahrikli akışlar için önerilir. Sıkıştırılabilir akışlar için önerilir. Skaler ve enerji taşıma denklemleri için varsayılan yöntemdir.

ADV 3: Akış tabanlı şema, çoğu akış için sayısal olarak kararsızdır. Tavsiye terimleri oluşturmak için yukarı akışta birden çok öge kullanır. Sadece sıkıştırılamaz akışlar için kullanılabilir. Katı madde analizlerini taşımak için kullanılamaz. Sürüklenme veya harici akış sorunları için özel olarak ayarlanmıştır.

ADV 4: Min-Mod şeması, Petrov-Galerkin varyantıdır. Orta sayısal kararlılıktadır. (ADV 1'den az). Uzun dar kanallardaki akışlar için özel olarak ayarlanmıştır.

ADV 5: Değiştirilmiş Petrov-Galerkin, ADV 2'nin daha kararlı versiyonu. ADV 2 ile önerilen tüm uygulama türleri için uygundur, ancak tipik olarak daha ölçülü sonuçlar üretir. Devridaim ve ikincil akışlar için idealdir.

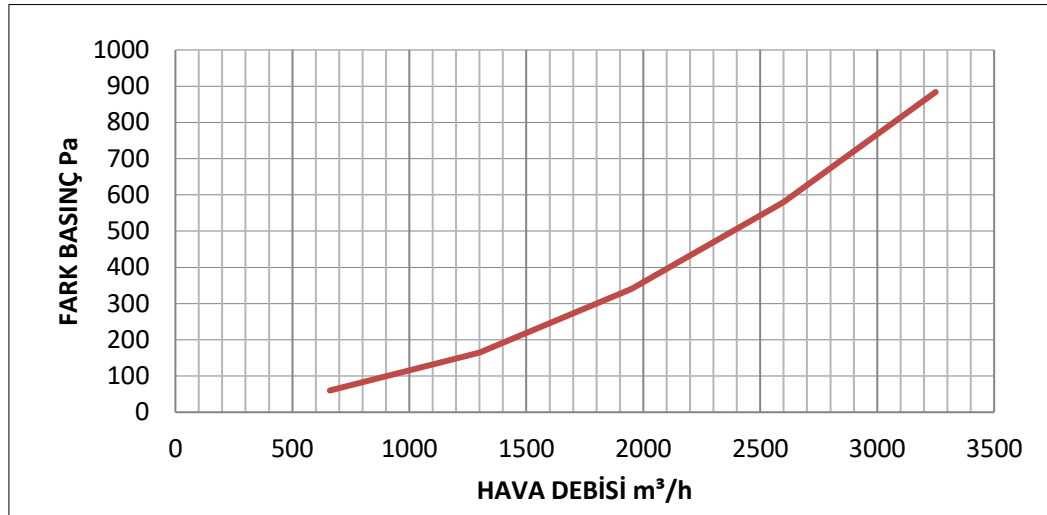
Doğru basınç düşüşü tahmini, doğal taşınım kararlılığı, sıkıştırılabilir akış doğruluğu ve kararlılığı, dönme ve hareket doğruluğu ve kararlılığı enerji dengesi kararlılığına sahiptir. Hacimlere atanan dağıtılmış dirençler için doğru çözümlemelere ulaşır.

İki analiz modu vardır: Kararlı durum ve geçici. Varsayılan seçim olan kararlı kurum, analizin zamandan bağımsız olmasına neden olur. Geçici, analizin zamana bağlı olmasına neden olur. Bir geçici analizin nasıl çalışacağını tanımlayan birkaç geçici parametre vardır. Bir analiz sırasında iki mod arasında geçiş yapmak mümkündür. Sınır koşulları iletişim kutusunda geçici sınır koşulları uygulanır. Tüm hareket analizlerinin (dönen makineler ve hareketli katılar) geçici olarak çalıştırılmaktadır [44].

5. TOZ TOPLAMA SİSTEM TASARIMI VE HAD ANALİZLERİ

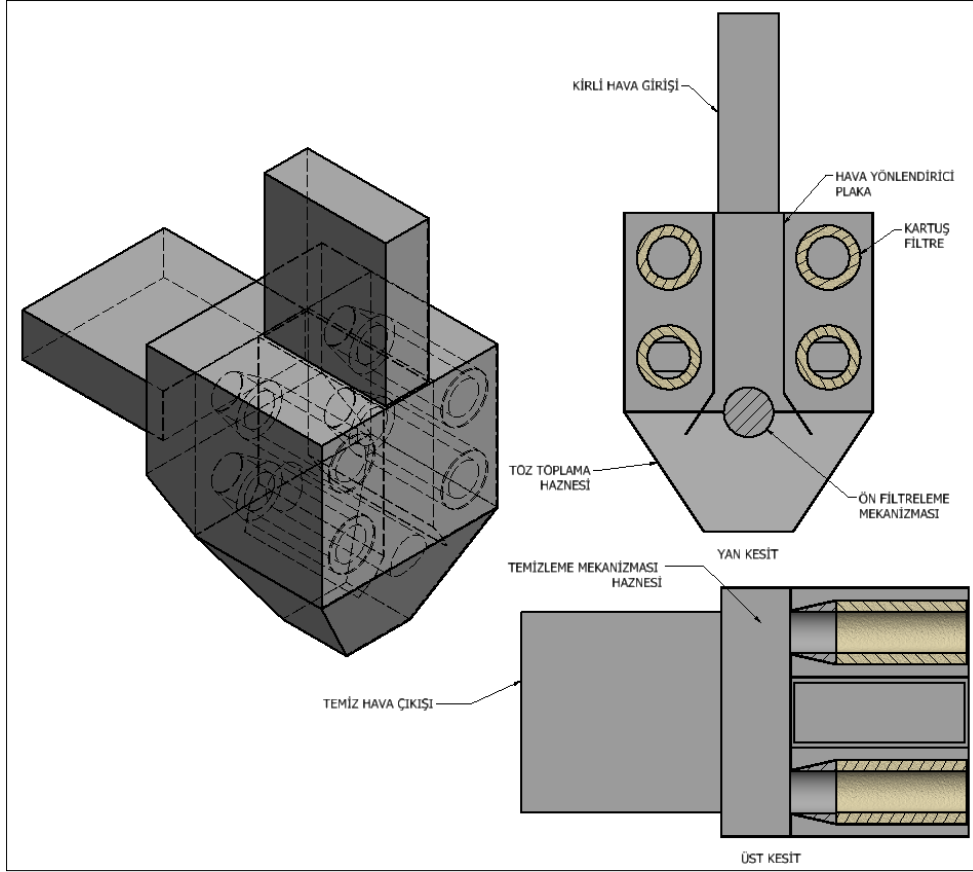
5.1. Toz Toplama Sistem Tasarımı

Toz toplama sistemi, tasarımı gerekli hava debisi belirlenerek başlamaktadır. Gerekli sistem hava debisi 4600 m³/h tozlu hava girişi olacak şekilde belirlenmiştir. Toz toplama sisteminin en önemli ekipmanlarından biri filtrelerdir. Bu nedenle gerekli hava debisine göre ilk olarak tasarımda kullanılacak filtre seçilmiştir. Filtre üreticisi tarafından yapılan testler sonucunda oluşan Fark basınç ve hava debisi grafiği Şekilde 5.1’de yer almaktadır. Bu hava debi kapasitesine sahip toz toplama sisteminde filtre eğrisine göre dört adet filtre kullanılmıştır.



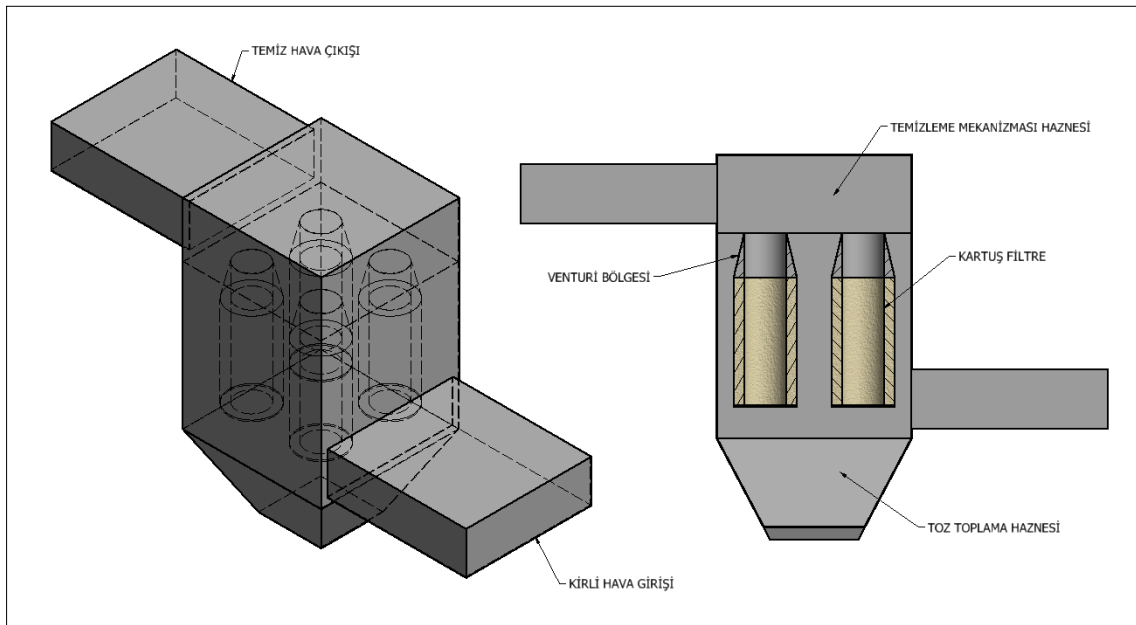
Şekil 5.1. Filtre fark basınç ve debi grafiği [45]

Toz toplama sistemi tasarımında filtrasyon verimliliğini artıran, hava hızlarının sabit ve düzgün kalmasını sağlayan bir toz toplama sisteminin oluşturulması amaçlanmıştır. Yeni sistem olarak tanımlanan bu sistemde hava girişi üst bölgeden yapıldıktan sonra ön filtrasyon mekanizması oluşturulan bir yapıya çarptırılmaktadır (Şekil 5.1). Ön filtrasyon mekanizması kaba partiküllerin dökülmesini sağlayarak hem filtrelerin ömrünü uzatmaktadır hem de filtrasyon verimliliğini artırmaktadır.



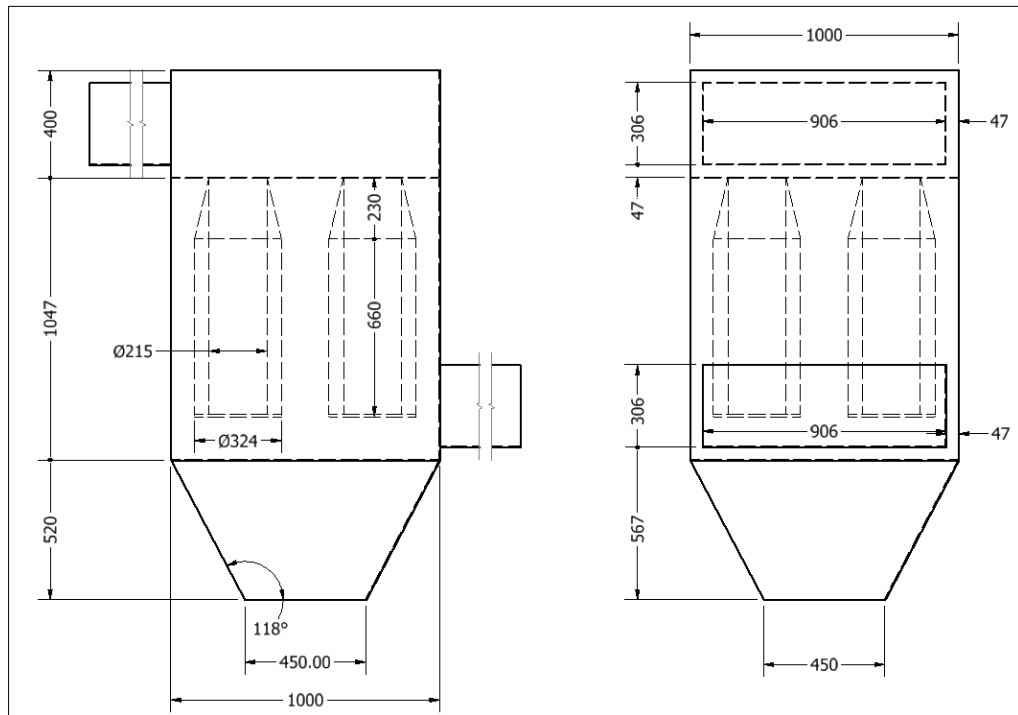
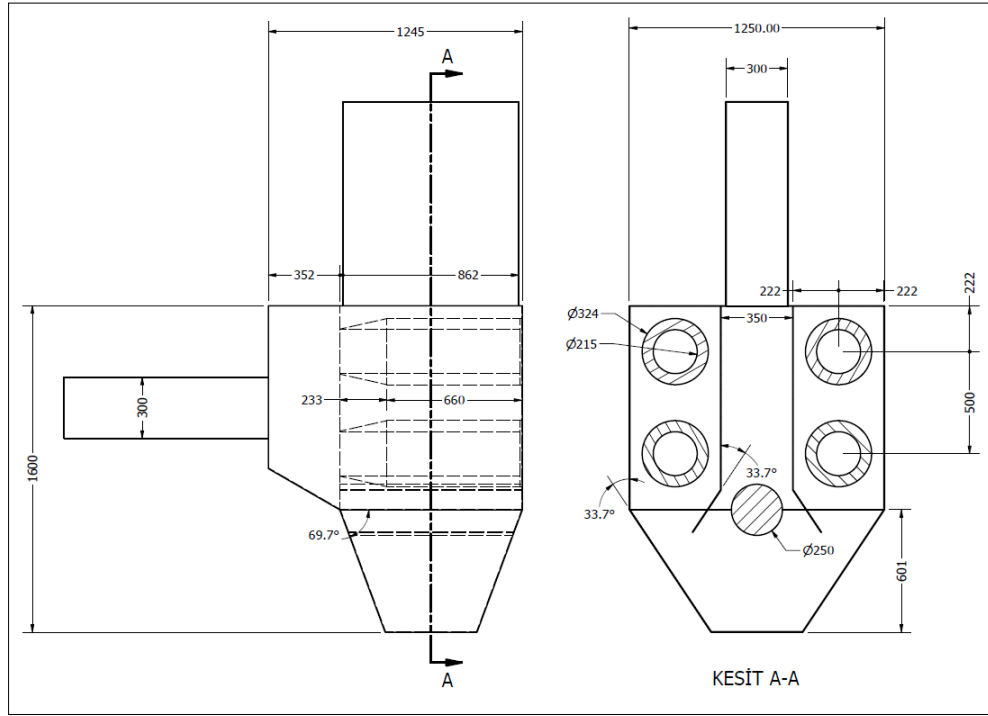
Şekil 5.2. Yeni sistem ekipmanları

Klasik sistemde hava girişi toz toplama ünitesinin altından, hava çıkışı üst kısmından gerçekleştirilir ve filtreler dikey konumlandırılmıştır (Şekil 5.2.).



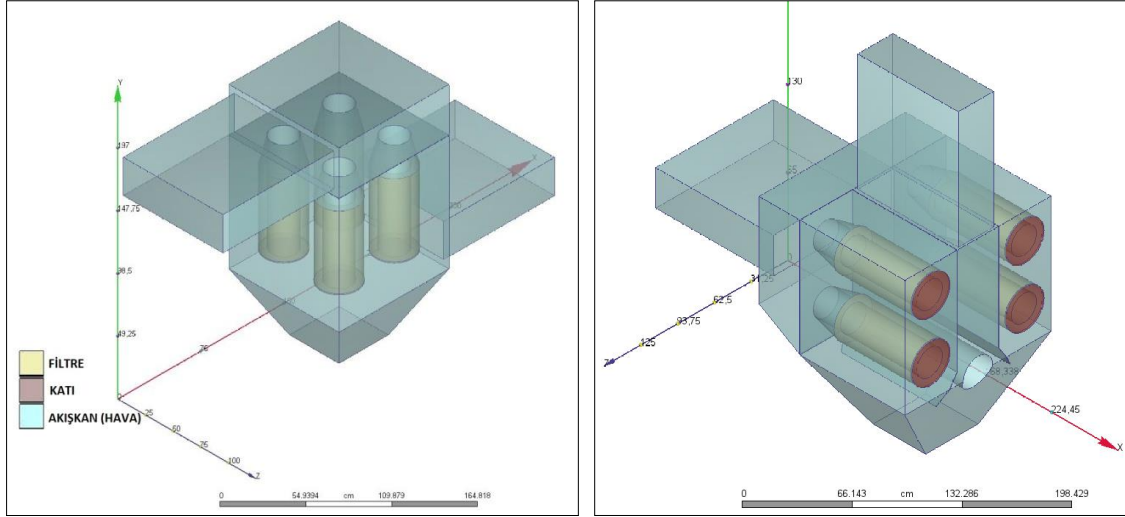
Şekil 5.3. Klasik sistem ekipmanları

İki sistemde de dört adet aynı filtre kullanılmıştır. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sistem ölçüleri yer almaktadır. Her iki sistemde yaklaşık aynı dış ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.



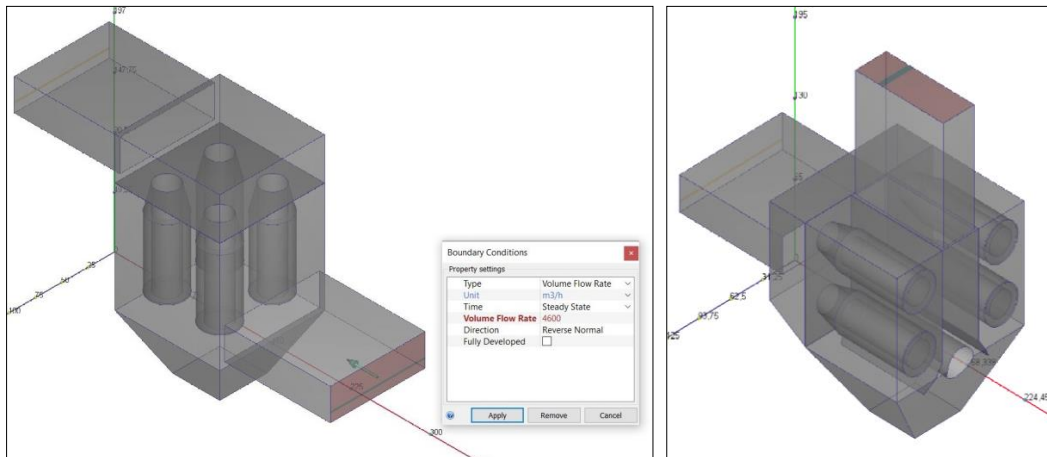
5.2. HAD Analizleri

Ölçüsel olarak birbirine yakın olacak şekilde tasarımları boyutlandırılmıştır. Sistemlerin analizi ilk olarak malzemelerin tanımlanmasıyla başlar. Tasarımda belirlenen malzemeler Şekil 5.6.'da gösterildiği gibi Autodesk® CFD 2019 programına tanımlanmıştır.



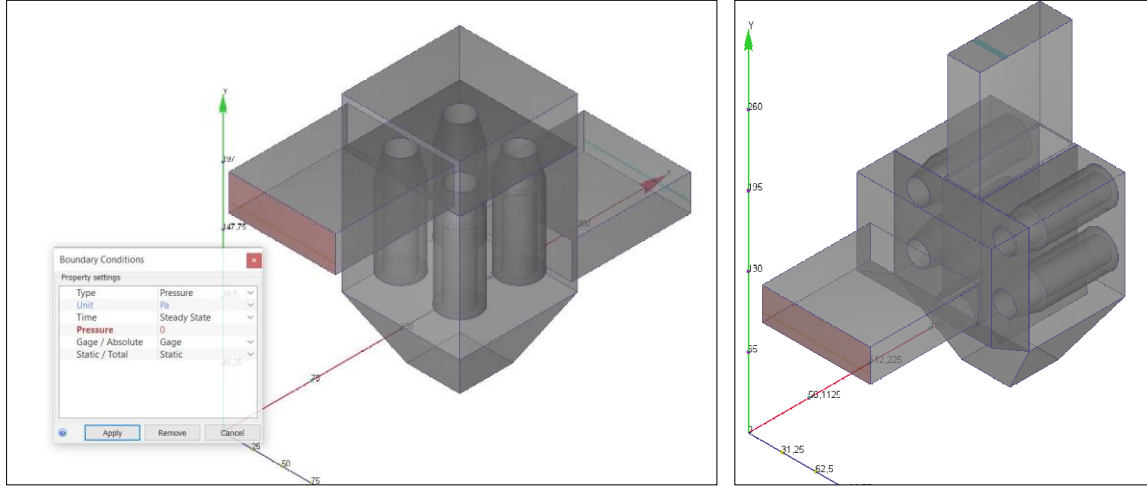
Şekil 5.6. Klasik ve yeni sistemler için HAD malzeme tanımlama

Çözümleme için malzeme özelliklerinin tanımlanmasından sonraki aşama sınır şartlarını belirlemektir. Tasarımda belirlenen hava giriş şartları Şekil 5.7'de gösterildiği gibi kırmızı ile gösterilen alanlara yeşil ok yönünde tanımlanmıştır. Klasik sistemler için aşağıdaki kanal ağzında, yeni sistemler için üst sağ taraftaki kanal ağzında hava debisi $4600 \text{ m}^3/\text{h}$ 'tır.

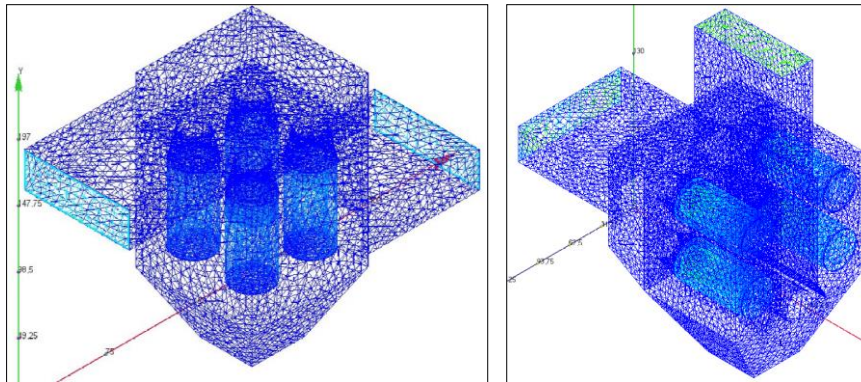


Şekil 5.7. Klasik ve yeni sistemler için HAD sınır giriş şartı

Tasarımda belirlenen hava giriş şartları Şekil 5.8’de gösterildiği gibi kırmızı ile gösterilen alanlara tanımlanmıştır. Klasik sistemler için yukarıdaki kanal ağzında, yeni sistemler için üst sol taraftaki kanal ağzında statik basınç 0’dır.



Şekil 5.8. Klasik ve yeni sistemler için HAD sınır çıkış şartı



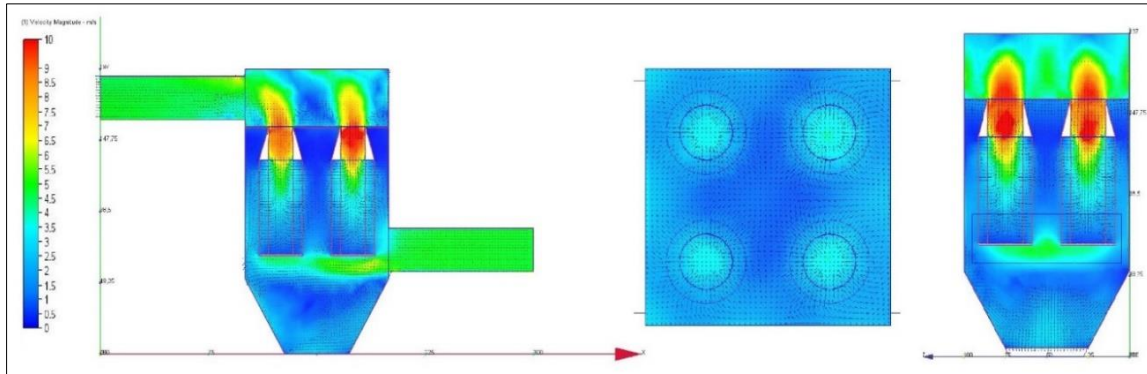
Şekil 5.9. Klasik ve yeni sistemler için çözüm ağı

Çözümün doğruluğu büyük ölçüde çözüm ağı yapısına bağlıdır. Bu çözümlemede ince ağı oluşturmak için otomatik ağı şeması (Autodesk® Simulation CFD tarafından sağlanır) ve ardından gelişmiş ağı geliştirme kullanıldı [46]. Yüzey bölümlenmesi ve sınır tabakası bölümlenmesi de tanıtılmış ve ağı yapıları iyileştirilmiştir. Ağı Geliştirme, tüm akışkan-katı ara yüzler boyunca eleman katmanları eklemektedir. Bu sınır tabakası ile ağı oluşumu, hız dağılımının daha kesin sonucuna ulaşmasını sağlamaktadır. Her iki sistem içinde aynı ağı geliştirme kullanılmıştır.

Klasik sistem için yapılacak çözümlemedeki ağ yapısında 53632 çözüm noktası ve 184177 element bulunmaktadır. Bu ağ yapısı Şekil 5.9 sol tarafta gösterilmiştir. Yeni sistem için yapılacak çözümlemedeki ağ yapısında 57363 çözüm noktası ve 184925 element bulunmaktadır. Bu ağ yapısı Şekil 5.9 sağ tarafta gösterilmiştir.

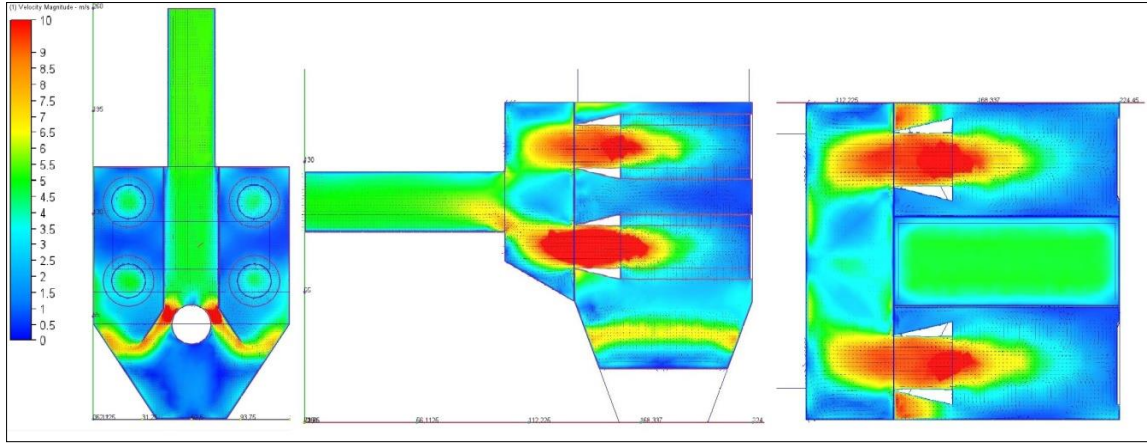
Ağ yapılarını oluşturduktan sonra fiziksel ayarlarda akış aktif hale getirilmiştir. Akışkanımız hava olduğu için sıkıştırılamaz akış çözümü gerçekleştirilecektir. Akış türbülanslı olarak seçilmiştir. Çözümleyici ayarlarında çözümleme modu kararlı olarak seçilmiştir. Yönetim şeması sistemimize en uygun olan ADV 5 ve türbülans modeli k-epsilon olarak tanımlanmıştır. Klasik sistem 1054 iterasyonda yakınsarken, yeni sistem çözümü 969 iterasyonda yakınsamıştır.

Toz toplama sistemlerinde kritik öneme sahip hava hızı ve basınç dağılımları HAD sonuçlarıyla incelenmiştir. HAD sonuçlarında filtre bölgeleri dikkate alınarak aşağıdaki kesitler oluşturulmuştur.



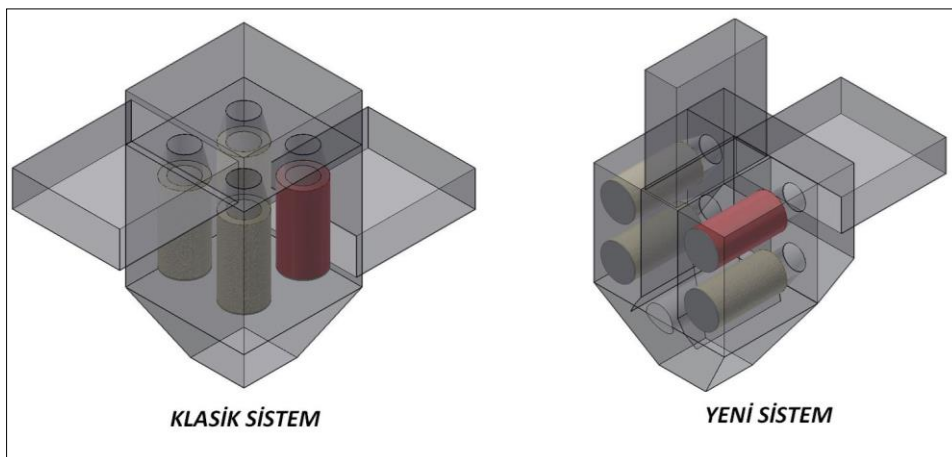
Şekil 5.10. Klasik sistem hava hızları dağılımı

Şekil 5.10 'da Klasik sistemdeki filtrelerin orta noktasından alınan kesitlerdeki hava hızı sonuçları görülmektedir. Solda xy, ortada xz, sağda yz yönündeki kesit yer almaktadır. Klasik sistem hava hızlarını incelediğimizde alt bölgeden hava yaklaşık ortalama 5 m/s hava hızıyla toz toplama sistemine girmektedir. Filtreden geçen havanın hızı ortalama 2 m/s değerine düşmektedir, Filtrenin orta bölgelerine gelen hava yaklaşık 3m/s hızlardadır. Ventüri bölgesinde hava kesiti daraldığı için hava 11 m/s hızlara ulaşarak emiş kanalına yönlenebilmektedir. Kesit alanının artmasıyla hava hızları 5 m/s 'ye düşmektedir.



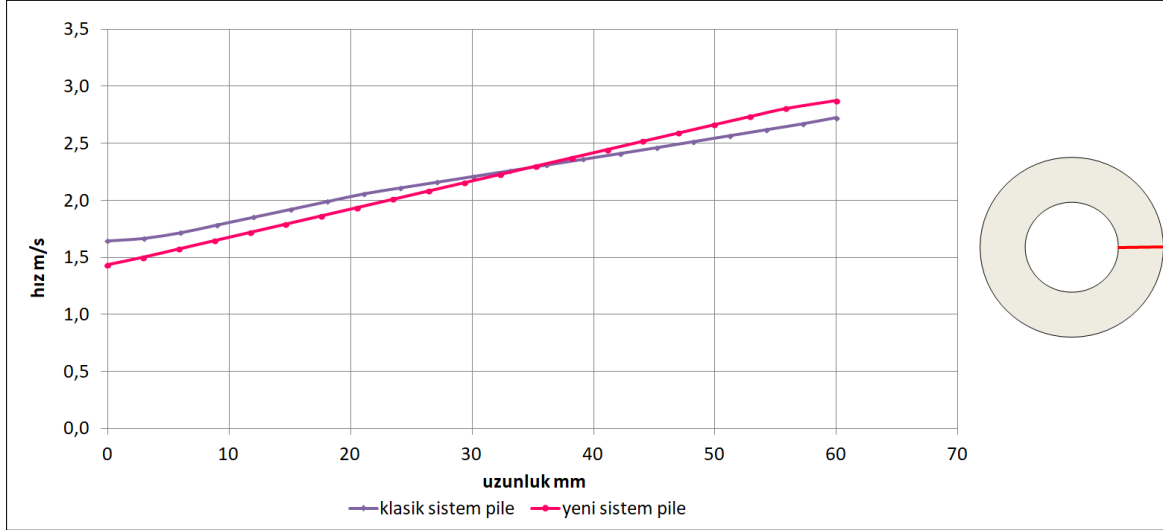
Şekil 5.11. Yeni sistem hava hızları dağılımı

Şekil 5.11 'de Yeni sistemdeki filtrelerin orta noktasından alınan kesitlerdeki hava hızı sonuçları görülmektedir. Solda yz, ortada xy, sağda xz yönündeki kesit yer almaktadır. Yeni sistem hava hızlarını incelediğimizde üst bölgeden hava yaklaşık ortalama 5 m/s hava hızıyla toz toplama sistemine girmektedir. Daha sonra kaba parçaların ayrışacağı ön filtreleme bölgesine çarpan hava 10 m/s havanın hızına ulaşmaktadır. Yeni sistemde hava yönlendirici kanatlar hızlanan havanın filtreye yönlenmesini sağlamaktadır. Filtreden geçen havanın hızı ortalaması düşmektedir, Klasik sistemde olduğu gibi ventüri bölgesinde hava kesiti daraldığı için hızlanarak emiş kanalına yönlenmektedir. Kesit alanının artmasıyla hava hızları düşmektedir.



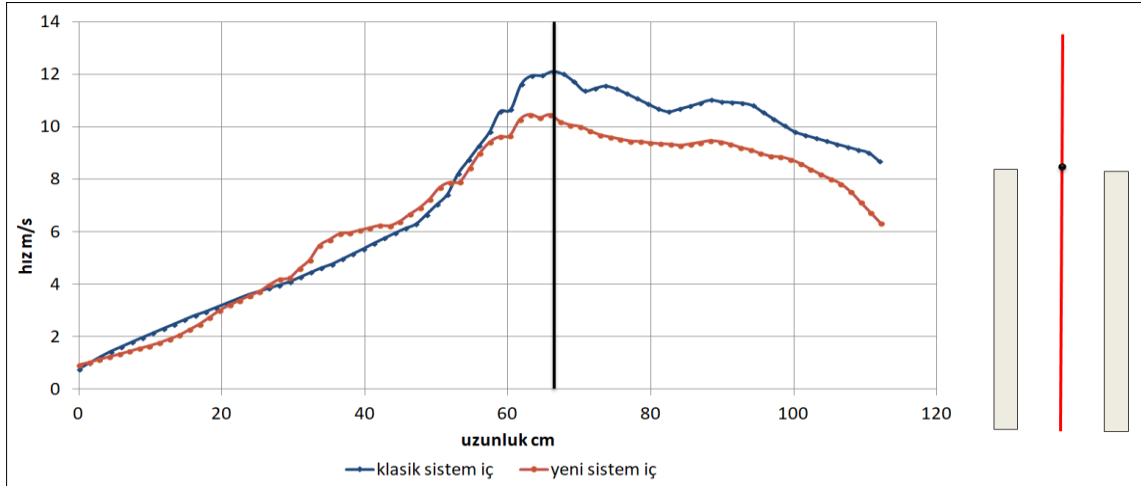
Şekil 5.12. Sistemlerde ölçüm alınan filtreler

Sistemlerdeki filtre hızları pilede, filtrenin iç merkez bölgesinde ve filtre dışında iki bölgede incelenmiştir. Bu incelemeler için sistemlerde seçilen filtreler Şekil 5.12’de kırmızı olarak belirtilmiştir.



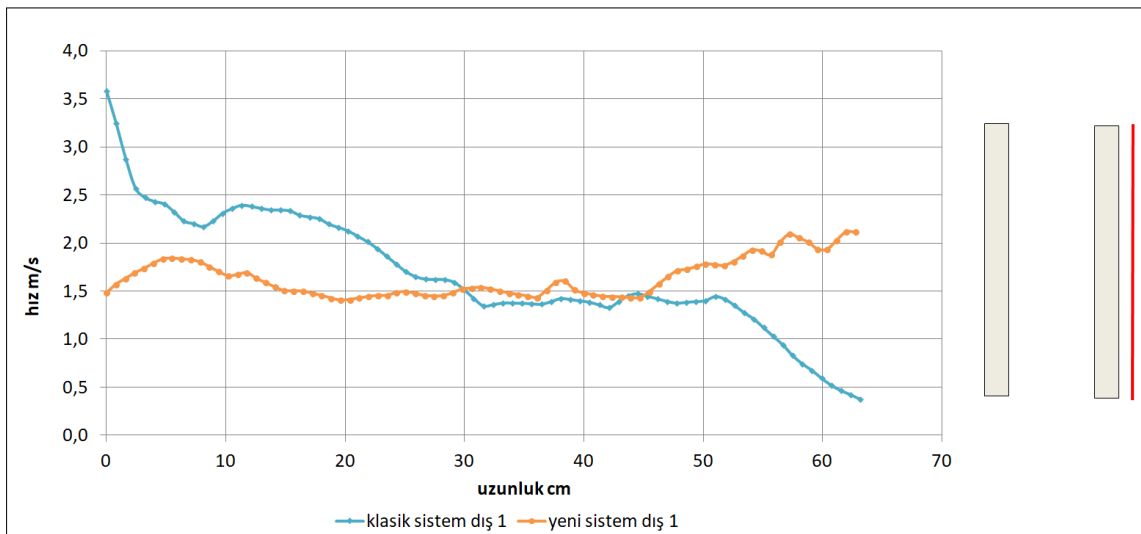
Şekil 5.13. Filtre pile hava hızları dağılımı

Filtre pilesindeki hava hızı dağılımları sol tarafta grafik ve sağ tarafta ölçüm noktalarının yeri Şekil 5.13’te gösterilmektedir. Ölçümde iki sistemde de kesit için filtrenin uzunluğundan merkez noktası seçilmiştir. Pile kesitindeki filtreleme giriş hızları minimum hızlardır, klasik sistemde 1,65 m/s iken yeni sistemde 1,44 m/s’dir. Çıkış hızları ise maksimum hızlardır, klasik sistemde 2,73 m/s iken yeni sistemde 2,88 m/s olduğu görülmektedir. Ortalama hızlara baktığımızda çok az fark vardır. Klasik sistemde pile kesitindeki ortalama hız 2,19 m/s, yeni sistemde 2,16 m/s’dir. Pile kesitinin 33 mm’sinde yani yaklaşık ortasında hava hızları eşit olduğu görülmektedir. Klasik sistem ve yeni sistem pile kesitindeki hızlar aynı homojen yapıya sahip olduğu görülmektedir.



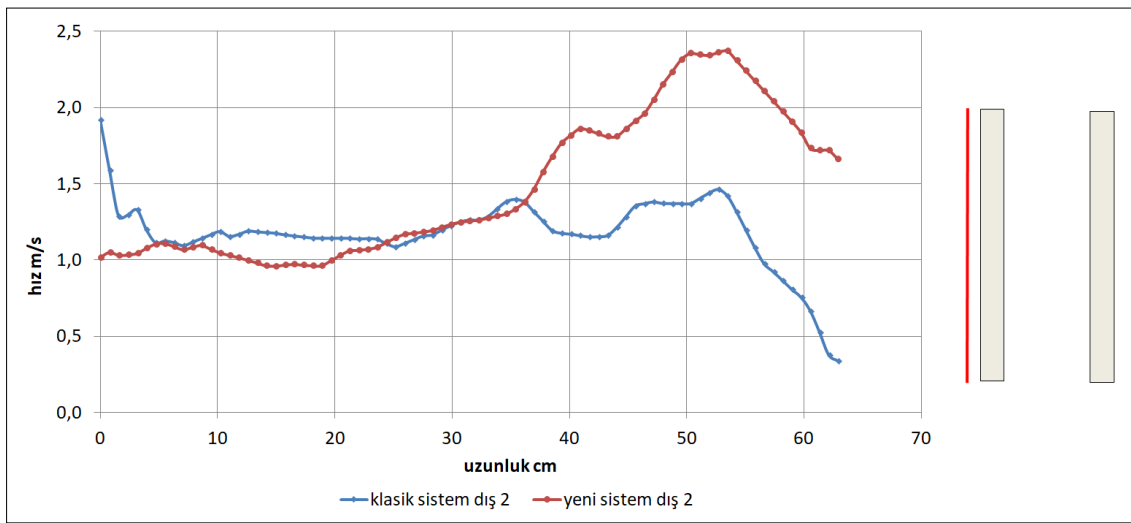
Şekil 5.14. Filtre iç merkez hava hızları dağılımı

Filtre iç merkezindeki hava hızı dağılımları sol tarafta grafik ve sağ tarafta ölçüm noktalarının yeri Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Filtrenin iç merkezinden alınan değerleri incelediğimizde emiş yönüne doğru havanın hızlandığını görülmektedir. Klasik sistemde maksimum noktası 12 m/s iken, yeni sistemde 10,5 m/s olarak görülmektedir. Siyah çizgi ile belirtilen maksimum noktalar filtrenin bittiği emiş kanalının başladığı noktalar olup hava hızının belirli bir noktaya kadar azaldığı bölgelerdir. Filtreleme iç bölgesinde iki sistemde de hız profillerinin aynı olduğu görülmektedir. Filtrenin iç bölgesindeki minimum değerlere baktığımızda klasik sistemde 0,75 m/s iken yeni sistemde 0,92 m/s dir. Ortalama hızlar ise iç bölgede klasik sistemde 7,38 m/s ve yeni sistemde 6,69 m/s'dir.



Şekil 5.15. Filtre dış 1. bölge hava hızları dağılımı

Filtre dış 1. bölge hava hızları dağılımı sol tarafta grafik ve sağ tarafta ölçüm noktalarının yeri Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Filtrelerin birinci dış bölgesindeki hız dağılımını incelediğimizde klasik sistemde minimum hava hızı 0,37 m/s, maksimum hava hızı 3,58 m/s, ortalama hız 1,69 m/s'dir. Yeni sistemde ise minimum hava hız 1,40 m/s, maksimum hava hızı 2,12 m/s, ortalama hız 1,64 m/s'dir. Klasik sistemde hava hızı profili azalan bir eğri şeklindeyken yeni sistemde daha ortalama düz bir eğri olarak görülmektedir. Bu durum filtrelerin klasik sistemde dikey, yeni sistemde yatay konumlandırılmasıyla ilişkilidir. Yeni sistemde birinci dış bölgede homojen hız dağılımı toz toplama performansını olumlu etkilemektedir.



Şekil 5.16. Filtre dış 2. bölge hava hızları dağılımı

Filtre dış 2. bölge hava hızları dağılımı sol tarafta grafik ve sağ tarafta ölçüm noktalarının yeri Şekil 5.16'da gösterilmektedir. Filtrelerin ikinci dış bölgesindeki hız dağılımını incelediğimizde klasik sistemde minimum hava hız 0,34 m/s, maksimum hava hızı 1,92 m/s, ortalama hız 1,18 m/s'dir. Yeni sistemde ise minimum hava hız 0,96 m/s, maksimum hava hızı 2,37 m/s, ortalama hız 1,47 m/s'dir. Bu bölgede hız profillerinin benzer olduğu görülmektedir. Yapısal farklılıklardan dolayı yeni sistemde hava hızı yeni sistemde orta bölgeden sonra daha fazla artmıştır.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Klasik ve yeni tasarlanan sistem incelendiğinde toz toplama sistemlerinde tasarımın sistem performansını etkilediği görülmüştür. Yapılan HAD çalışması sonucunda klasik sistem ve yeni sistem ortalama filtreleme hava hız profilleri benzerlik gösterirken belirli noktalarda farklı olmaktadır. Analizler sonucunda toz toplama sistemindeki filtre iç merkez hava hızları klasik sistemde 7,38 m/s, yeni tasarlanan sistemde 6,69 m/s olduğu görülmektedir. Tasarlanan yeni sistemdeki daha homojen bir hız yapısı filtrasyon mekanizmasını olumlu etkilemektedir. Bu tasarımda bulunan kaba partiküllerin dökülmesini sağlayan ön filtreleme sistemi filtre performansını ve ömrünü artırmaktadır.

Bu çalışma sonucunda toz toplama sistemlerinin performansı etkileyen parametrelerin birbirleriyle etkileşim halinde olduğu sonucunu görülmektedir. Filtrasyonda, filtre malzeme özelliklerinin değişmesi toz toplama miktarını belirleyen bir parametredir ve filtre veriminin toz toplama sisteminin verimine etki etmektedir. Tozlar toplandıkça zamanla basınç düşüşünde artış meydana gelir. Sistem tasarımında kullanılan hava kanalları ve boyutlandırılması da basınç düşüşünü etkilemektedir. Basınç düşüşündeki artış toz toplama sistemleri performansını azaltıcı yönde etki etmektedir. Hava geçirgenliği akışın belirlenmesinde kullanılan bir parametredir. Hava hızı ve basınç düşümünün bir fonksiyonu olarak toz toplama sistemlerine etki etmektedir. Hava filtreleme alanı(A/C) olarak da bilinen filtreleme hava hızlarının sabit ve düzgün kalması toz toplama performansını artırmaktadır. Toz toplama sistemlerinde filtre üzerinde zamanla artan kek tabakasını yüksek basınçla temizleyerek performansı artırmaktadır. En uygun şekilde belirlenen temizleme basıncı filtre kullanım süresinde verimliliği sağlayacaktır.

Enerji tüketimi, sistemdeki gerekli hava debisini sağlayan egzoz fanıyla ve temizleme mekanizmasında kullanılan basınçlı hava sistemiyle doğrudan ilişkilidir. Toz toplama performansına etki eden parametreler fan gücüne de ve basınçlı hava sistemine de etki etmektedir. Fan gücü kendi elektriksel veriminin dışında hava debisi ve basınç düşüşüne de bağlıdır. Hava debisindeki ve basınç düşüşündeki artış enerji tüketimini artırmaktadır. Temizleme mekanizması içinde uygun hava basıncının belirlenmesi enerji tüketiminde azalmayı sağlamaktadır.

Toz toplama sistemlerindeki parametrelerden herhangi birinde yapılan iyileştirme, enerji verimliliği sağlarken, çevre partikül emisyon oranını da düşürecektir. Böylelikle işçiler açısından daha sağlıklı ortamlar sağlanırken, makineler açısından da toza bağlı arızaların azalması ve üretim açısından kalite artışı sağlanabilecektir. Tasarlanan yeni sistemin üretilmesiyle deneysel çalışmalar yapılabilir ve performansı etkileyen faktörler deneysel sonuçlara göre analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Namlı, A., Ankara Üniversitesi. URL: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/81428/mod_resource/content/0/3.%20Hava%20kirlili%C4%9Fi.pdf , Son Erişim Tarihi: 17.03.2021.
2. İnternet: EPA, Particulate Matter. URL: <https://www.epa.gov/pm-pollution>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2021.
3. ASHRAE “Indoor Environmental Health” Handbook CD in Fundamentals-2001, Chapter 9, Atlanta, USA, 2003. Owen, M.S. (Editor). (2009). *ASHRAE Handbook Fundamentals* (Inch-Pound Edition). Atlanta: ASHRAE Inc., 203-204.
4. Alptekin, O. (2007). *Binalarda iç hava kalitesi ve toz partiküllerinin iç mekan hava kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22-25.
5. İnternet: Bulgurcu, H., Deneysan. URL: http://deneysan.com/Content/images/documents/havalandirma-1_46167331.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.03.2021
6. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. (2008, 6 Haziran). Resmi Gazete (Sayı: 26898). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/06/20080606-6.htm>
7. de Nevers, N. (2017). *Air Pollution Control Engineering* (Third edition). USA: Waveland Press Inc., 127-144.
8. Andersen, B.O., Nielsena, N.F. and Walther J.H. (2016). Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters. *Powder Technology*, 291, 284–298.
9. Xie, B., Li, S.H., Jin, H., Hu, S., Wang, F. and Zhou, F. B. (2018). Analysis of the performance of a novel dust collector combining cyclone separator and cartridge filter. *Powder Technology*, 339, 695–701.
10. Solari, F., Tagliavini, G., Montanari, R., Bottani, E., Malagoli, N. and Armenzoni, M. (2017). *CFD Model Validation of a Bag Filter for Air Filtration in a Milling Plant*. Proceedings of the International Food Operations and Processing Simulation Workshop, Spain.
11. Saleem, M., Krammer, G. (2007) . Effect of filtration velocity and dust concentration on cake formation and filter operation in a pilot scale jet pulsed bag filter. *Journal of Hazardous Materials*, 144, 677–681.
12. Kim, J., Hwangb, J., Choi, H. and Lee, M. (2017). Effective filtration area of a pleated filter bag in a pulse-jet bag house. *Powder Technology* 311, 522–527.
13. Xi, Y., Dai, Y., Xiao, Y., Cheng, K., Xiao, T., and Zhao, S. (2017). Internal Flow Field Uniformity Study of Dust Collector for A Street Vacuum Sweeper Based on CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 272, ICMM 2017. October 25–27, USA.

14. Feng, Z., Long, Z. and Chen, Q. (2014). Assessment of various CFD models for predicting airflow and pressure drop through pleated filter system. *Building and Environment*, 75, 132-141.
15. Li, J., Li, S. and Zhou, F. (2015), Effect of cone installation in a pleated filter cartridge during pulse-jet cleaning. *Powder Technology*, 284, 245–252,
16. Morgan, L. (1999). *Air Filter Assembly*, U.S. Patent No. 5.972.059.
17. İnternet: Morgan, L., Camfil. URL: <https://camfilapc.com/download/gold-cone-workwell>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2021
18. İnternet: Donaldson DFE Brochure EU GB. URL: <https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/dust-fume-mist/literature/north-america/equipment/dust-collectors/cartridge/downflo-evolution/f118005/Downflo-Evolution-Dust-Collector.pdf>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2021
19. Cecala A. B., O'Brien A.D. , Schall J., Colinet J.F., Franta R.J., Schultz M.J., Haas E.J., Robinson J., Patts J., Holen B.M., Stein R., Weber J., Strebel M., Wilson L., and Ellis M. (2019). *Dust control handbook for industrial minerals mining and processing* (Second edition). Pittsburgh PA: NIOSH, 98-111
20. WHO (1999). *Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust*, Switzerland: World Health Organization, 103-105.
21. Health and Safety Executive (2011). *Air Cleaners: Particles, Controlling Airborne Contaminants at Work* (Second edition). England: HSE Books, 54-60.
22. Yang C., (2012). Aerosol Filtration Application Using Fibrous Media an Industrial Perspective, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(1) 1-9.
23. Palazzo, L., J. Woolston, and P. Ristevski, 1994 *Retrofitting Shaker Baghouses to Cartridge Pulse Jet Technology in The User and Fabric Filtration Equipment -VII*. Pittsburgh: Air and Waste Management Association, 3-5.
24. Mussatti, D. C. (2002), *EPA Air Pollution Control Cost Manual* (Sixth Edition). North Carolina: Air Quality Strategies and Standards Division Office of Air Quality Planning and Standards, 570-600
25. Sutherland, K. (2008). *Filters and Filtration Handbook* (Fifth Edition). USA: Elsevier 27-150
26. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (2010), *Industrial ventilation: a manual of recommended practice for design* (27th ed.). Cincinnati, OH.
27. International Union of Pure and Applied Chemistry (1990). Glossary of atmospheric chemistry terms., *Applied Chemistry Division, Pure and Applied Chemistry*, 62 (11), 2167-2219.
28. Genceli, O. F. (1997). Endüstriyel Gaz Temizlenmesi ve Hava kirliliğinin Kontrolü, *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, 265-301.

29. Lapple, C. E. (1961). Characteristics of Particles and Particle Dispersoids. *Stanford Research Institute Journal*, 5, 95
30. National Air Filtration Association, (2014). *NAFA Guide To Air Filtration*.USA: NAFA, 65-91.
31. Hutten, I. M. (2007). *Handbook of Non-Woven Filter Media* (First edition). USA: Elsevier, 29-33.
32. Beachler, D.S., Joseph, J. and Pompelia, N. (1995). *Fabric filter operation review*. North Carolina: North Carolina State University, 14-19.
33. İnternet: Precision Filtration Products. URL: <https://www.precisionfiltration.com/products/dust-collectors/>, Son Erişim Tarihi: 18.04.2021
34. Standart European (2012). *Particulate Air Filters For General Ventilation-Requirements, Testing, Marking* (EN 779:2012)
35. Standart European (2012).*Air filters for general ventilation(2016). Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)* (ISO 16890-1:2016)
36. Standart American (2012). *Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size* (ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012)
37. Hill M., Bleier F.P. (1998). *Fan Handbook: Selection, Application, and Design*. New York: McGraw-Hill, 128-136.
38. İnternet: Fan Products. URL: <http://www.bvnair.com/products/>, Son Erişim Tarihi: 05.02.2021
39. Hartman, H.L., Mutmanský, J.M., Ramani, R.V. and Wang, Y.J. (1997). *Mine ventilation and air conditioning* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
40. U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy (2003). *Improving Fan System Performance: A Sourcebook for Industry*. United States: The United States Department of Energy Air Movement and Control Association International, Inc, 19-24.
41. Langmuir, I., Blodgett, K. (1946). *A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories*, USA: Army Air Forces Technical Report No: 5418.
42. İnternet: Dalsanto, D. How to Design and Size a Baghouse Dust Collection System URL: https://www.baghouse.com/wp-content/uploads/2019/04/How-to-Design-and-Size-Your-Dust-Collection-System-1.1-Baghouse.com_.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.09.2019
43. Wang, L. K., Pereira, N. C. and Hung, Y. (2004). *Air pollution control engineering book*. USA: Humana Press, 59-197.

44. İnternet: Autodesk® Simulation CFD 2019 Online Help. URL: <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/>, Son Erişim Tarihi: 23.02.2021
45. Mikropor, (2012). *MTF-324660-F9SG Test Raporu*, Türkiye: Mikropor A.Ş.
46. Autodesk® Simulation CFD 2019, Commercial CFD Software, © 2019 Autodesk Inc.

EKLER



GAZİ GELECEKTİR..