

# ENDÜSTRİYEL GAZ TEMİZLENMESİ VE HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜ\*

**Osman F. GENÇELİ**

1966 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesi'nden mezun oldu. Aynı Üniversite'de, 1973'de doktora, 1980'de doçent, 1988'de ise profesör unvanlarını aldı. 1977-79 arasında A.B.D. Michigan Üniversitesi'nde Misafir Öğretim Üyesi olarak bulundu. Isı Tekniği ve Optik Ölçmeler konusunda çeşitli makale ve kitapları bulunan Osman F. GENÇELİ, halen İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı Öğretim Üyesidir.

## ÖZET

Özellikle son yıllarda yoğun sanayileşmenin olduğu bölgelerde ortaya çıkan hava kirliliğinin insan sağlığını ve çevre dengesinin bozulmasını tehdit etmesi, ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli önlemlerin alınmasını gerekli kılmıştır.

Bu bildiriye öncelikle hava kirliliğine neden olan kirleticilerin fiziksel ve kimyasal özellikleri açıklanacak, tanımları ve sınıflanması verilecektir. Hava kirliliği konusundaki çeşitli ülkelere ait yönetmelik ve kanunlar kısaca değerlendirilecektir. Daha sonra hava kirlenmesinde önemli bir rol üstlenen değişik prensiplere göre çalışan

- Mekanik toz tutucular
- Elektrostatik toz tutucular
- Kuru ve ıslak filtreler

ile ilgili teorik ve pratik bilgiler verilerek, havadaki ve atık gazlarda bulunabilen kirletici taneciklerin özellikleri, kaynakları, boyut ve dağılımları yanı sıra, toz toplama sistemlerinin her birinin kullanılma aralığı, toz toplama verimi, bunların tasarımlarına ait özellikler ve çeşitli endüstri kolları için en uygun gaz temizleme yöntemleri açıklanmaya çalışılacaktır.

## 1. GİRİŞ

Çevre kirliliği, günümüzün en önemli sorunlarından birisidir. Doğada karşılaşılan değişik kirlenme cinsleri arasında hava kirliliği, insanı en çok rahatsız eden kirliliktir. Tarihsel açıdan insanoğlunun ilk karşılaştığı kirlilik, hava kirliliği olup, bu hususta alınan ilk önlemler, yasaklamalar, kanun ve yönetmelikler hava kirliliği konusunda yapılmıştır. Endüstrinin hızlı gelişimi, hava kirliliğinin giderek önem kazanmasına neden olmuştur. Başlangıçta bölgesel olarak görülen birçok hava kirliliği problemi, ozon tabakası, asit yağmurları, sera olayı gibi olayların ortaya çıkması ile uluslararası sorun haline gelmiştir. Özellikle son yıllarda yoğun sanayileşmenin olduğu bölgelerde ortaya çıkan hava kirliliğinin insan sağlığını ve çevre dengesinin bozulmasını tehdit etmesi nedeniyle, ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli önlemlerin alınmasını gerekli kılmıştır.

Tanım olarak hava kirliliği, havada katı, sıvı ve gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan sağlığına, canlı hayatına ve ekolojik dengeye zararlı olabilecek derişildik ve sürede bulunması olarak verilir (Olçay, 1991). Hava kirliliğinin insanlar, hayvanlar, bitkiler ve cansız yapılar üzerine etki şekli farklı derecelerde olabilmektedir. Ayrıca bu etki yaş ve cinsiyete göre de değişebilmektedir. Etki açısından canlıların ve cansızların hava kirliliğine maruz kalma süresi önemli olup, bazı kirleticilerin etkisi uzun zaman sonra ortaya çıkabilirken, bazı kirleticilerin etkisi ise kısa sürede önemli hasarlara neden olabilmektedir.

Hava kirliliğinin oluşumu ve çözümü çok sayıda mühendislik dalını yakından ilgilendirmektedir. Hava kirliliğinin daha başlangıçta oluşumu ve giderilmesi, özellikle makina ve tesisat mühendisliği açısından önem kazanmaktadır. Pratik açıdan bakıldığında, hava kirliliği konusunda çalışan makina ve tesisat mühendisleri esas olarak;

- Endüstriyel bir işlem için hava kirliliği yönetmelik ve kanunlarının öngördüğü koşulları gerçekleştirmek,
- Tozların çevrede bulunan canlılar, cihazlar, tesisatlar ve yapılar üzerine yaptığı olumsuz etkileri azaltmak,
- Çeşitli işlemler için gerekli olan temiz gaz veya havanın hazırlanmasını sağlamak,
- Yararlı madde, ısı veya enerji geri kazanmak,
- Yangın, patlama veya diğer tehlikeleri azaltmak,

fonksiyonlarından bir veya birkaçı için endüstriyel gaz temizleme tesisatları ile ilgilenirler.

Bu bildiriye öncelikle hava kirliliği konusundaki çeşitli ülkelere ait yönetmelik ve kanunlar ile ülkemizdeki durum değerlendirilecektir. Daha sonra, havadaki ve atık gazlarda bulunabilen kirletici taneciklerin özellikleri, kaynakları, boyut ve dağılımları, değişik prensiplere göre çalışan toz toplama sistemleri ile ilgili teorik ve pratik bilgiler verilerek, herbirinin kullanılma aralığı, toz toplama verimi bunların tasarımlarına ait özellikler ve çeşitli endüstri kolları için en uygun gaz temizleme yöntemleri açıklanmaya çalışılacaktır.

## **2. HAVADA BULUNAN KİRLETİCİ MADDELER**

Hava bileşiminde birçok gaz bulunmaktadır. Deniz seviyesindeki kuru ve temiz havanın gaz bileşenleri yaklaşık olarak %21 oksijen, %78 azot, %1 argon ve %0.03 karbondioksittir. Bunların dışında ayrıca hava içinde çok az oranlarda hidrojen, neon, kripton, helium, ozon ve ksenon gazları ile değişken miktarlarda su buharı ve sürekli atmosferik kirletici maddeler adı verilen mikroskopik veya daha küçük katı maddeler bulunur. Havanın bileşimi değişik yollarla doğal veya yapay olarak değiştirilebilir. Normal havada değişik miktarlarda yabancı maddeler (sürekli atmosferik kirletici maddeler), rüzgarın neden olduğu erozyon, deniz suyunun buharlaşması veya volkanik patlama gibi doğal olaylar sonucu meydana gelebildiği gibi, insanların çeşitli faaliyetleri sonucu da oluşabilir. Doğal olarak oluşan kirletici maddelerin derişiklikleri bölgeden bölgeye değişken olmakla beraber, genellikle insanların faaliyetleri nedeniyle ortaya çıkan kirlenmenin meydana getirdiği derişiklik seviyelerinden çok daha düşüktür.

İnsanların değişik faaliyetleri sonucu ortaya çıkan kirletici maddeler çok ve çeşitlidir. Elektrik üretilen termik santraller, çeşitli ulaşım yöntemleri, endüstriyel işlemler, maden ocakları, maden ergitme işlemleri, inşaat ve ziraat ile ilgili çeşitli faaliyetler çok miktarda kirletici madde üretimine neden olur. Kapalı hacimlerdeki havanın kirliliği açısından ise problem oluşturan birçok madde arasında sigara dumanı, radon gazı ve formaldehit de sayılabilir.

Havada bulunan kirletici maddeler, değişik kaynaklarda değişik şekillerde gruplandırılabilir.

- Tanecik veya gaz
- Organik veya inorganik
- Görülebilir veya görülemez

- Mikroskopik altı, mikroskopik veya makroskopik
- Zehirli veya zehirsiz
- Kararlı veya kararsız.

Havadaki kirleticilerin buldukları katı, sıvı veya gaz gibi faza ve oluşum yöntemlerine göre sınıflaması ise şu şekilde yapılabilir.

- Tozlar, metal buharı dumanları ve katı maddelerden oluşan dumanlar (duman içinde genellikle sıvı tanecikler bulunur)
- Buğular, sisler ve sıvı maddelerden oluşan dumanlar,
- Buharlar ve gazlar.

### **Tozlar, Metal Buharı Dumanları ve Dumanlar**

Tozlar, rüzgarlar, volkanik patlamalar ve depremler gibi doğal kuvvetler veya insanların endüstriyel faaliyetler sırasında yaptığı kırma, öğütme, yıkma, patlama, delme, kazıma, eleme ve süpürme gibi mekanik işlemler ile atmosfere yayılan katı taneciklerdir. Bu işlemlerdeki kuvvetlerin bir kısmı büyük katı kütleleri küçültürken tozları ortaya çıkarır, kuvvetlerin diğer kısmı ise zaten küçük olan tanecikleri etrafa saçarlar. Genel olarak çapları 100 µm değerinden küçük taneciklere toz adı verilir. Tozlar, kaya, metal veya kil gibi madensel; hububat, un, ağaç, pamuk veya polen gibi bitkisel; yün, kıl, ipek, tüy veya kösele gibi hayvansal esaslı olabilir. Metal buharı dumanları, katı madde buharlarının yoğunlaşması sonucu meydana gelen katı taneciklerdir. Çok küçük tanecikler hızla reaksiyona girebildiklerinden, ergimiş metallere çıkan metal buharı dumanları çoğunlukla oksit şeklindedirler. Metal buharı dumanları, ayrıca süblimasyon, distilasyon ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda da oluşabilir. Bu cins işlemler sonucu havada oluşan taneciklerin çapı 1 mm değerinden daha küçüktür. Ancak nemlenmesine müsaade edilen metal buharı dumanları birleşerek daha büyük parçacıklar oluşturabilir. Dumanlar ise, odun, kömür, yağ ve diğer karbon esaslı maddelerin tam yanmamaları halinde oluşan küçük katı ve/veya sıvı taneciklerden oluşur. Genel olarak, katı, sıvı ve gaz karışımlarına duman adı verilir. Ancak teknik yayınlarda is veya karbon tanecikleri, kül, cüruf, katranlı tanecikler, yanmamış gazlar ve gaz yanma ürünleri olarak da tanımlanabilir. Duman taneciklerinin çapı değişken olmakla beraber, en küçüğünün çapı 1 µm değerinden çok daha azdır. Çoğunlukla ortalama çapları 0.1 ila 0.3µm arasındadır.

### **Buğu ve Sis**

Normal sıcaklıkta ve basınçta havada bulunan sıvı damlacıklarına buğu adı verilir. Bunlar atomizasyon, sprey işlemi, karıştırma, şiddetli kimyasal reaksiyonlar, gazların sıvılardan çıkmaları veya basıncın düşmesi ile beraber gazın açığa çıkması sırasında oluşurlar. Hapşırma sırasında dışarı atılan veya atomize olan küçük damlacıklar da mikroorganizma içerdiklerinden, havayı kirleten cinsten bir buğudur.

Sis ise genellikle buharın yoğunlaşması ile oluşan, havada bulunan küçük sıvı damlacıklarına denir. Normal sprey cihazlarından çıkan buğuya göre, sis lülelerinden daha küçük damlacıklar oluşabilmesi nedeniyle bu ad verilmektedir. Sis ve bulut içindeki birçok damlacık mikroskopik veya daha küçük boyutlarda olup, daha büyük boyutlu buğu ve buhara geçişi sağlarlar.

Sıvıların buharlaşma özellikleri dolayısıyla, havada bulunan sıvı damlacıklarının boyutları küçülerek, hava sıvıya doyana kadar sırasıyla buğudan sis boyutuna ve buradan da doğal olarak buhar fazına geçerler. Eğer sıvı damlacıklar içinde erimiş veya asılı halde katı

maddeler var ise, bunlar havayı kirleten maddeler olarak kalırlar. Örnek olarak deniz suyundan oluşan sprey, çok hızlı bir şekilde buharlaşarak, atmosferde asılı halde kalan, birçok sayıda küçük tuz tanecikleri oluşturur.

Genel olarak hava kirliliği ile beraber anılan sisli duman (smog); rahatsız edici veya zararlı olmasının yanı sıra, görmeyi de zorlaştırır. Sisli duman birleşiminde duman tanecikleri, buğu ve sis damlacıkları bulunmaktadır. Birleşim zamana ve bölgeye göre değişir. Bu tanımlama otomobil egzozlarından çıkan maddelerin güneş ışığı ile fotokimyasal reaksiyonu sonucu oluşan puslu hava için de kullanılır. Çoğu zaman sisli duman, kirletici maddelerin atmosferde normal yayılımını, engelleyen ters sıcaklık dağılımı (sıcaklık inversiyonu) ile birlikte anılır.

## **Buhar ve Gazlar**

Bir maddenin genel halini belirlemek için sık sık gaz veya buhar terimleri kullanılır. Atmosferik havanın dışında, normal atmosferik şartlarda gaz fazında bulunan herhangi bir karışıma gaz adı verilir. Gaz tanımına örnek olarak oksijen, helium ve azot sayılabilir. Buhar ise normal atmosferik şartlarda, sıvı veya katı halde de bulunabilen, gaz fazındaki maddeleri tanımlama için kullanılır. Buhara örnek olarak benzin, benzen, karbon tetraklorür ve su verilebilir.

### **2.1 HAVADA BULUNAN KİRLETİCİ MADDELERİN ÖZELLİKLERİ**

Havada bulunabilen katı ve sıvı maddelerin boyut ve özellikleri Şek. 2.1 'de görülmektedir. 0.1mm çapından daha küçük tanecikler, aynen bir gaz molekülü gibi Brownian hareketler ile yer değiştirirler ve bunların ölçülebilir bir çökme hızları yoktur. 0.1 ila 1 mm arasındaki çaplarda ki taneciklerin hesaplanabilir bir çökme hızları vardır. Ancak bu hız çok küçük olduğundan genellikle ihmal edilir ve zaten normal hava akımları da bu çaptaki taneciklerin çökelmelerine engel olur. Tipik bir atmosfer havasında bulunan taneciklerin adet olarak %99 kadarı çapları 1 mm değerinden daha küçüktür. 1 ila 10 mm arasındaki çaplarda olan tanecikler, durgun havada sabit ve belirli bir hızla çöklerler. Ancak, normal hava akımları bu çaptaki tanecikleri, ihmal edilemeyecek bir süre havada asılı olarak tutarlar. Endüstriyel hijyen ile uğraşan araştırmacılar, insan ciğerlerinde tutulabilirle olasılığı fazla olan 2 mm çapından daha küçük tanecikler ile ilgilendirler (Morrow 1964). 8 ila 10 mm çapından daha büyük tanecikler üst solunum yolları tarafından ayrılır ve tutulurlar. Ara boyutlar akciğerin hava kanalları üzerine çökerek, buradan hızlıca temizlenerek yutulur veya öksürükle dışarı atılır. Nefes alınan havadaki taneciklerin %50 veya daha azı solunum yollarında çökler. 10 mm çapından büyük tanecikler oldukça hızlı bir şekilde çökerler ve sadece çıktıkları kaynak yakının da ve kuvvetli rüzgar altında havada asılı kalabilirler. İstisna olarak, büyük çaplı olmalarına rağmen, bazı ayrık otu tohumlarının parçaları gibi hafif elyaf maddeleri ve uçuntular havada daha uzun süre kalabilirler. 10 mm çapından büyük taneciklerin çoğu uygun aydınlatma ve kontrast olması halinde çıplak göz ile görülebilirler. Daha küçük tanecikler ancak yüksek derişiklikte olmaları halinde çıplak gözle görülebilirler. Buna en çok karşılaşılan iki örnek olarak, sigara dumanı (ortalama tanecik çapı 0.5 mm değerinden küçük) ve bulutlar verilebilir. Bir egzozun veya yanma gazlarının çıktığı bir bacanın yakınında veya kuvvetli bir hava kirliliğinin olduğu yerlerde çok daha büyük tanecik çapları görülür. Sis, metal buharı dumanları, buğu gibi daha küçük tanecikler havada daha uzun süre asılı kalırlar. Bu boyut aralığında, meteorolojik şartlar ve bölgenin topografik yapısı, taneciklerin fiziksel özelliklerinden daha önemlidir. Çökme hızları küçük olduklarından, atmosferin bu tanecikleri dağıtabilmeleri, büyük oranda yerel hava durumuna bağlıdır.

Boyut karşılaştırılmasında, endüstriyel tozların ve granül maddelerin sınıflandırılmasında kullanılan elek ölçülerinden faydalanılır. Değişik ülkelerde kullanılan standart elek ölçüleri ile mikrometre olarak tanecik çapları arasındaki bağıntı Tablo 2. 1 'de verilmiştir. 40 mm

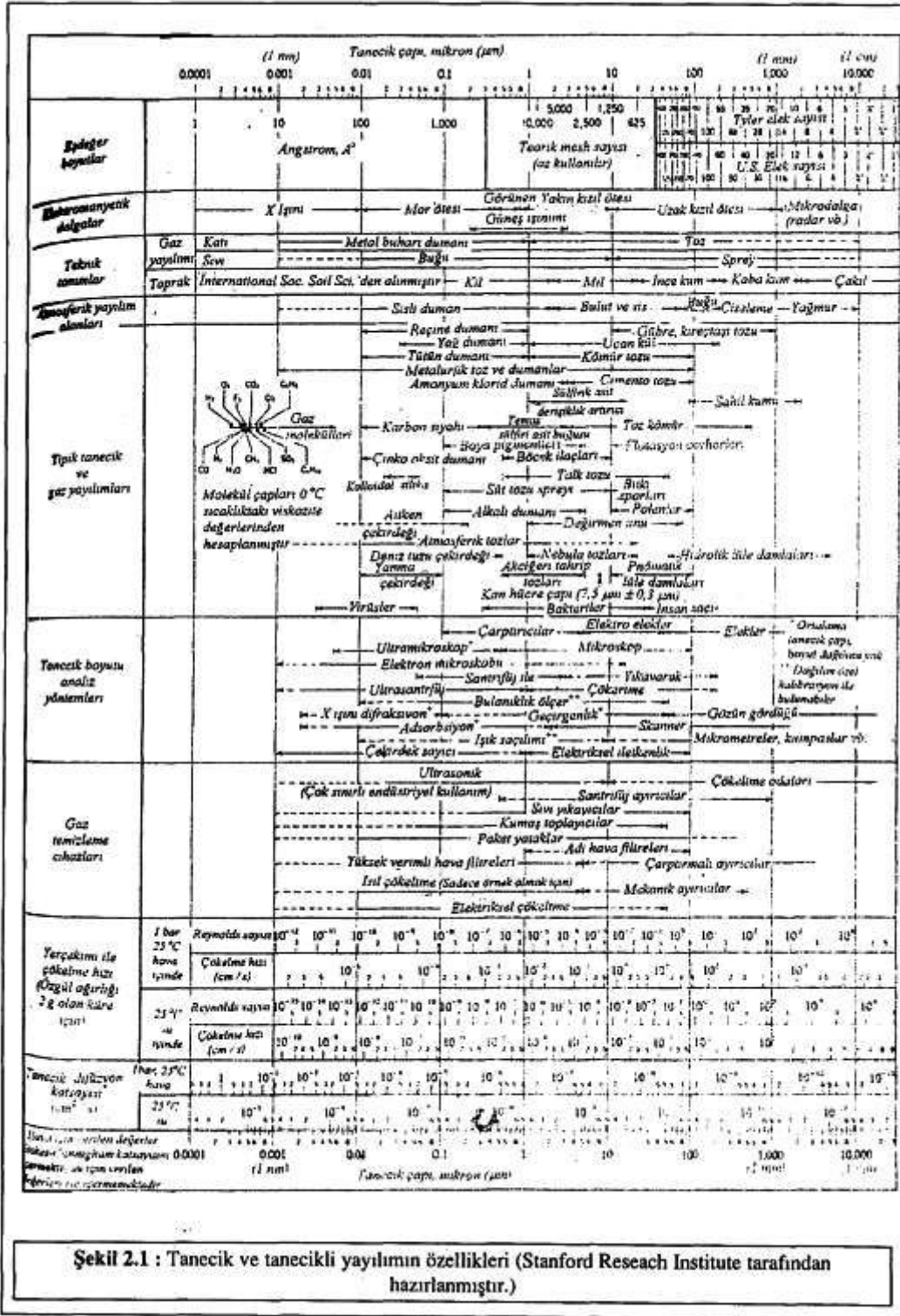
çapından daha büyük tanecikler, elek ölçüleri boyutunda, 40 mm çapından daha küçük tanecikler ise elek altı veya mikroskobik boyuttur.

Alman DIN elekleri		Fransız A.F.N.O.R.		İngiliz standartı		J.M.M.		A.B.D. Tyler		U.S. ve A.S.T.M.	
A	B, $\mu\text{m}$	A	B, $\mu\text{m}$	A	B, $\mu\text{m}$	A	B, $\mu\text{m}$	A	B, $\mu\text{m}$	A	B, $\mu\text{m}$
6	1000	31	1000	16	1003	12	1057	14	1168	18	1000
12	500	28	500	44	353	20	635	48	295	35	500
20	300	25	315	60	251	40	347	65	204	60	250
30	200	24	200	85	178	60	211	100	147	100	149
45	133	22	125	120	124	80	157	150	108	140	105
60	100	20	80	170	89	100	127	200	74	200	74
80	75	18	50	240	66	150	84	270	53	325	44
100	60	17	40	300	53	200	63	325	43	400	37

**Tablo 2.1 : Değişik ülkelerde kullanılan standart elek ölçüleri ile tanecik boyutları arasındaki bağıntı.**  
A= Elek ölçüsü B= Maksimum tane büyüklüğü,  $\mu\text{m}$

### Tanecik Boyut Dağılımı

Herhangi bir numunedeki tanecik boyutu dağılımı, verilen bir boyuttan daha küçük olan taneciklerin yüzdesi olarak tanımlanabilir. Şekil 2.2'de verilen en üstteki eğri (adet eğrisi), tipik bir atmosferdeki kirlilik için çizilmiştir (Whitby ve ark. 1955, 1957). Ortadaki eğride (alan eğrisi) ise verilen bir boyuttan daha küçük olan taneciklerin toplam projeksiyon alanlarının yüzdesi görülmektedir. En alttaki eğride (kütle eğrisi) ise verilen bir boyuttan daha küçük olan taneciklerin toplam kütlelerinin yüzdeleri gösterilmiştir.



Bu üç eğri ile verilen değerler arasındaki farka dikkat etmek gerekir. Örnek olarak 0.1 mm veya daha küçük çaptaki tanecikler (elektron mikroskopunun ölçebildiği en küçük çap olan 0.005 mm değerinin üzerinde olmakla beraber) atmosferde bulunan taneciklerin sayıca %80 kadarını kapsamakta, fakat kütesel olarak sadece %1 değerini almaktadır. Aynı zamanda 1 mm çapından daha büyük tanecikler sayıca ancak %0.1 iken, toplam kütlelerin %70 kadarını oluşturmaktadır. Bu ise küresel bir taneciğin kütlelerinin, çapının kübü ile artmasının bir sonucudur. Kirliliğin %80 kadarı, çapları 5 mm değerinden daha küçük taneciklerden meydana gelmektedir. En çok leke bırakıcılar ise 1 mm çapından daha küçük taneciklerdir.

Kent içindeki havada bulunan taneciklerin çapı, genellikle 1 mm (birim yoğunluktaki bir küreye eşit olarak tanımlanan) değerinden daha küçüktür ve yaklaşık olarak log-normal bir dağılım gösterir.

## Havadaki Taneciklerin Ölçülmesi

Havadaki tozun miktarı, tanecik adeti veya toplam kütle ile belirlenebilir. Dolaylı bir yöntem ise taneciklerin projeksiyon alanına dayalı optik yoğunluk ölçmektir. Toz tanecikleri standart bir mikroskop kullanılarak derecelendirilmiş skalalar veya optik karşılaştırma yöntemi ile boyutlandırılabilir. Kullanıcının görme kabiliyetine, tozun rengine ve mevcut kontrasta bağlı olarak, aydınlık bir taşınabilir mikroskop ile ölçülebilecek boyut alt sınırı 0.9 mm değerindedir. Yağ içine daldırma teknikleri kullanılarak, bu sınır 0.4 mm değerine kadar indirilebilir. Karanlık taşınabilir mikroskop teknikleri ile 0.1 mm çapına kadar tanecikler görülebilir. Bu tip mikroskopların ölçemediği daha küçük çaplı tozlar bir elektron mikroskobu ile ölçülerek, karşılaştırılabilir. Diğer ölçme tekniklerinde kalibrasyonlu, cihazlarda numune alma hızını ve laboratuvar cihazlarındaki gerçek çökeltme ölçümlerini dikkate alabilir. Elektron mikroskobu ve kaskat çarpıştırıcı gibi diğer çeşitli numune alma cihazları sis ve buğu dahil taneciklerin ölçümünde başarılı olmuş tekniklerdir. Havadaki kirleticilerin sürekli olarak sayılıp, boyutlandırılması için cihazlar geliştirilmiş ve çeşitli test yöntemleri tasarlanmıştır. Bu cihazlar ışığın saçılması prensibinden faydalanarak, cihaz modeline bağlı olarak 0.3 mm çapına kadar tanecikleri tespit edebilirler. Laser ışık kaynağı kullanan yöntemler ise 0.1 mm çapındaki tanecikleri tespit edebilirler (ASTM 1983). Bir yoğunlaşma çekirdeği sayıcı ise 0.01 mm çapına kadar mikron altı tanecikleri sayabilir. Bu cins taneciklerden atmosferde bol miktarda bulunur ve su buharının yoğunlaşması için çekirdek görevi yaparlar (Scala 1963). Tanecik boyut dağılımını ölçen bu değişik yöntemlerin her biri ile ölçülen değerler arasında farklılıklar görülebilir, çünkü her yöntemde ölçülen özellikler gerçekte farklıdır. Örnek olarak mikroskop ile en uzun boyut ölçülürken, çarpıştırıcı ile yapılan ölçümlerde aerodinamik davranış önemlidir (ACGIH 1987).

## 2.2 ENDÜSTRİYEL HAVA KİRLETİCİLER VE STANDARTLAR

Endüstriyel birçok işlem sonunda toz, duman, metal buharı, buğu, buhar ve gaz şeklinde hava kirleticiler çıkar. Bu kirleticilerin hem fabrika içinde yayılımını önlemek ve hem de zehirli derişiklik seviyelerinin artmasına engel olmak için, bu kirleticiler kaynaklarında kontrol altına alınmalıdır.

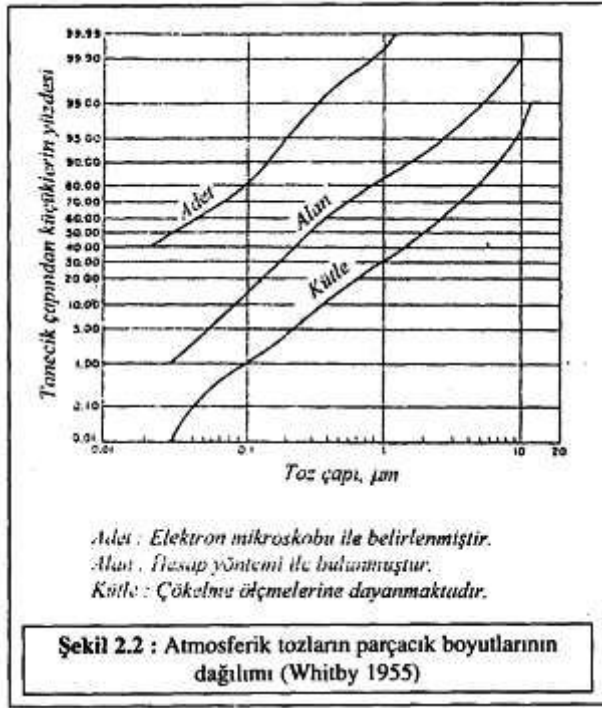
Bütün kirleticilerin derişikliklerinin sıfır olmasını sağlamak, ekonomik açıdan uygun değildir. Bütün kirleticilerin tamamen kontrolü da mümkün değildir ve bir zarar oluşmadan işyerinde çalışanlar, az miktarda zehirli maddeleri özümseyebilirler. Endüstriyel hijyen ile uğraşan ilim, havada bulunan kirleticilerin belirli bir süre için maksimum müsaade edilebilir sınırların üzerinde olması halinde zehirli madde (toksik) olması kavramı üzerine kurulmuştur.

Endüstriyel hava kirletici tipleri çok geniş bir spektrumu içermektedir. Bu nedenle birçok kirleticinin oluştuğu durumlarda bunların arıtılma işlemi çok güç olabilmektedir. Bu konudaki çalışmalar üretim teknolojilerinin daha az kirlenme oluşturacak şekilde yoğunlaşmıştır. Endüstriyel hava kirliliği kontrolü açısından Avrupa Topluluğu'nun yaklaşımı budur. Kirleticilerin öncelikle kaynaktan kontrolünü sağlayacak üretim teknolojileri geliştirilmesidir.

A.B.D.'de hava kirliliği açısından uyulması gerekli standartlar, Mesleki Emniyet ve Sağlık İdaresi (OSHA) tarafından yürürlüğe konulan, önceleri Federal Register tarafından ve daha

sonraları her yıl yeniden gözden geçirilerek Code of Federal Regulations (29 CFR 1910.1000) tarafından yayınlanmaktadır. OSHA tarafından yürürlüğe konan standartların çoğu, daha önce American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ve American Industrial Hygiene Association tarafından önerilir. Bu standartların esasını oluşturan sağlık koşulları, bu kuruluşların yayınlarında bulunabilir (ACGIH 1987). National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) tarafından önerilen, OSHA standartlarının gözden geçirilmiş halleri bir seri özel durum belgesi olarak yayınlanmaktadır. ASHRAE Standart 62-1989'a göre, endüstride çalışmayıp, ofislerde çalışan bazı hassas insanların korunabilmesi için, iç mekanlardaki kirlilik derişiklikleri ACGIH sınır değerlerinin altında tutulmalıdır.

Ülkemizdeki hava kirliliği ile ilgili uygulama, 2 Kasım 1986 tarihinde yayınlanan yönetmelik ile sağlanmaktadır (Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği, 1986). Bu yönetmelikte endüstri tesisleri için (1) kirletici vasfı yüksek tesisler, (2) izne tabi tesisler ve (3) izne tabi olmayan tesisler olmak üzere, üç kaynak grubu tanımlanmıştır. İzne tabi olan ve olmayan tesisler için emisyon kısıtlaması bakımından bir fark yoktur. Kirletici vasfı yüksek tesisler için genel kısıtlamalar getirilmiştir.



Yeryüzünde değişik bölgelerde havayı kirleten maddelerin derişiklik seviyeleri çok değişkendir. Çeşitli istatistik bilgilerden değişik kent merkezlerindeki veya endüstriyel sahalardaki hava kirletici maddelerinin yıllık ortalama değerlerini elde etmek mümkündür. Birçok ülke bazı kirleticiler için öncelikli standartlar çıkarmışlardır. Diğer taraftan, insanların bulunduğu mahallerde kokulu gazlar da istenmez. Tasarım yapan mühendis, mevcut hava kirliliğini dikkate alarak, cihaz seçimini yapmalı ve bu tasarıma uygun yeterli bir kontrol sistemini de gerçekleştirmelidir. Endüstriyel hava kirletici maddeler söz konusu olduğunda, mühendis iyi uygulamanın gereksimi ve mevcut standart ve yönetmeliklere uygun hem faydalı malzemelerin emilip atılmasını minimum değere indirirken, hem de atmosfere atılan maddeleri toplayarak, minimum değere getiren, yerel egzoz sistemlerinin tasarımını da yapmalıdır.



$$m\ddot{a} = \rho_{pw} \left( \frac{\pi}{6} \right) D^3 g - \rho_a \left( \frac{\pi}{6} \right) D^3 g - F_d \quad (3.1)$$

### 3. TEORİK ESASLAR

Şekil 2.2'de çeşitli çaptaki ve özellikteki taneciklere yerçekimi kuvvetinin etkisi altındaki çökme hızları da verilmiştir. Bu çökme hızı Stokes kanunu yardımı ile aşağıdaki şekilde bulunabilir. Şekil 3. 1'de yerçekimi ivmesinin etkili olduğu küçük bir küresel parçacığa etki eden dış kuvvetler görülmektedir. D çapında, m kütledeki bu parçacık için Newton'un hareket kanunu uygulanır ise;

$$m\ddot{a} = \rho_{pw} \left( \frac{\pi}{6} \right) D^3 g - \rho_a \left( \frac{\pi}{6} \right) D^3 g - F_d \quad (3.1)$$

yazılabilir. Burada Ppar parçacığın, Pak parçacığın içinde hareket ettiği akışkanın yoğunluklarını, g yerçekimi ivmesini, denklemin sol tarafındaki ma terimi parçacığın düşey doğrultudaki ivmelenmesini gösterirken, sağ tarafındaki üç terim sırasıyla parçacığa etki eden yerçekimi, kaldırma ve direnç kuvvetlerini göstermektedir. Bu parçacığa ait çökme hızının bulunuşunda, ivmelenmenin sıfır olduğu göz önüne alındığında dış kuvvet

$$F_d = \left( \frac{\pi}{6} \right) D^3 g (\rho_{pw} - \rho_a) \quad (3.2)$$

şeklinde dir. Dış kuvvet ile çökme hızı arasındaki ilişki, Stokes'un çalışmalarından

$F_d = 3\pi\mu DV$  (3.3) olarak verilebildiğinden, çökme hızı için

$$V_s = gD^2 \frac{\rho_{pw} - \rho_a}{18\mu}$$

elde edilir. Bu eşitlikteki  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini göstermektedir. Bu bağıntı yardımı ile hava içinde çeşitli çap ve yoğunluktaki parçacıkların çökme hızları hesaplanmış olup, Tablo 3.1 'de verilmiştir

Yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	Parçacık çapı, $\mu\text{m}$									
	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
50	1,8E-6	7,0E-6	4,0E-5	1,6E-4	7,0E-4	4,0E-3	1,6E-2	5,5E-2	2,3E-1	5,1E-1
100	3,7E-6	1,4E-5	8,0E-5	3,2E-4	1,4E-3	8,0E-3	3,0E-2	1,1E-1	3,9E-1	8,3E-1
200	7,4E-6	2,8E-5	1,6E-4	6,4E-4	2,8E-3	1,6E-2	5,9E-2	1,9E-1	6,5E-1	1,30
500	1,8E-5	7,0E-5	4,0E-4	1,6E-3	7,0E-3	3,9E-2	1,4E-1	4,2E-1	1,21	2,50
1000	3,7E-5	1,4E-4	8,0E-4	3,2E-3	1,2E-2	7,6E-2	2,5E-1	7,0E-1	1,95	3,90
2000	7,3E-5	2,8E-4	1,6E-3	6,4E-3	2,5E-2	1,4E-1	4,5E-1	1,14	3,10	6,25
5000	1,8E-4	7,0E-4	4,0E-3	1,5E-2	6,4E-2	3,5E-1	9,7E-1	2,23	5,75	11,0
10000	3,7E-4	1,4E-3	8,0E-3	3,1E-2	1,2E-1	6,0E-1	1,66	3,52	8,90	17,3

Tablo 3.1 : Parçacıkların çökme hızları, m/s (ASHRAE 1996) Not:E-6=10<sup>6</sup>



#### 4. TOZ TUTUCU TİPLERİ

Toz tutucular, çeşitli kaynaklarda değişik şekillerde sınıflanabilmektedir. En uygun bir sınıflama;

##### (1) Cidar tipi toz toplayıcı cihazlar

- Ağırlık etkili (çökeltme odaları)
- Santrifüj etkili (siklonlar)
- Elektrostatik

##### (2) Filtre edici cihazlar

- Yüzeysel
- Hacimsel

##### (3) Yıkayıcı tip cihazlar

olarak verilebilir (Noel de Nevers 1995). Birinci grup içindeki cihazlar genel olarak, taneciği bir cidar üzerinde yerçekimi ivmesi, santrifüj ve elektrostatik gibi bir dış kuvvet yardımı ile tutarlar. İkinci grup cihazlar yüzeysel bez filtre veya hacimsel olarak da dolgu tabakalı ve üçüncü grup cihazlar ise filtre edilecek gazın bir sıvı damlacıkları veya kütlesi içinden geçirildiği yıkayıcı tipten toz tutucuları içerir.

Pratikteki çeşitli uygulamalarda, toz filtre edici bu cihazların çeşitli tipleri ile karşılaşılr. Tablo 4.1'de karakteristik bazı toz tutucu cihazların performans değerleri, Tablo 4.2'de ise çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılan cihazlar verilmiştir. Bu tablolardaki değerler bir tasarım yapmaktan çok bu cihazların seçim kriterlerini vermesi açısından önemlidir.

Toz tutucu cinsi	Toz çapı $\mu\text{m}$	Max giriş $\text{g/m}^3$	Verim % küt.	Basınc Gaz Pa	kayıp Sıvı kPa	$\text{m}^3$ (gaz)/s için ihtiyaç	İzafi enerji	Hız m/s	Kapasite $\text{m}^3/\text{s}$	İzafi yer
<b>Kuru tip toz tutucular</b>										
Çökeltme odaları	>40	>10	50	25-125	-	-	1	1,5-3	yok	büyük
Şaşırtmalı odalar	>20	>10	50	125-625	-	-	1,5	5-10	yok	orta
Pancurmalı tip	>10	>2	80	75-500	-	-	1,5-6	10-20	14	orta
Siklon	>15	>2	85	125-750	-	-	1,5-9	10-20	24	orta
Multisiklon	>5	>2	95	500-2500	-	-	6-20	10-20	94	küçük
Çarpmalı tip	>10	>2	90	250-500	-	-	3-6	10-20	yok	küçük
Dinamik tip	>10	>2	90	gerekli	-	0,75-1,5 kW	10-20	-	24	-
Elektrostatik	>0,01	>0,2	99	50-250	-	0,1-0,6 kW	4-11	0,5-3	5-940	büyük
Bez filtreler	>0,08	>0,2	99	500-1500	-	-	6-20	0,005-0,1	94	büyük
<b>Yıkayıcı tip filtreler</b>										
Yerçekimi tip	>10	>2	70	25-250	140-690	70-270 L/s	5	0,5-1	47	orta
Santrifüj tip	>5	>2	90	500-2000	140-690	0,14-1,4 L/s	12-26	10-20	47	orta
Çarpmalı tip	>5	>2	95	500-2000	140-690	0,14-0,7 L/s	9-31	15-30	47	orta
Dalgıç	>5	>0,2	90	125-2500	35-210	0,7-70 L/s	4-34	0,5-1,5	24	orta
Dinamik	>2	>2	95	gerekli	35-210	0,14-0,7 L/s	30-200	15-20	24	küçük
Su delirmeli diyalram	>2	>0,2	90	500-1500	yok	2,25-15 kW pompalama	9-21	15	24	orta
Jet tipi	>2	>0,2	90	gerekli	345-610	7-14 L/s	15-30	10-100	47	küçük
Venturi tipi	>0,1	>0,2	99	2500-7500	35-210	0,4-1,4 L/s	30-300	60-210	47	küçük

Tablo 4.1 : Toz tutucu cihazların performans ölçüleri (ASHRAE 1996)

## 5. CİDAR TİPİ TOZ TOPLAYICI CİHAZLAR

### 5.1 AĞIRLIK ETKİLİ CİHAZLAR (ÇÖKELME ODALARI)

Bu filtrelerde parçacıklardan temizlenmek istenen gaz, nispeten yavaş bir hızla uzun kapalı bir çökeltme hacmi içerisinden geçirilir. Gazların bu kapalı çökeltme hacmi geçişi esnasında, içindeki taneciklerin tabana çökmesine imkan verecek kadar bir zaman dilimine müsaade edilir. Eski bir yöntem olup, konstrüksiyonu çok basittir ve bakımı kolaydır. Özellikle maden ergitme fırınları ve bazı metalurjik işlemlerde olduğu gibi çok kirletici gazların açığa çıktığı durumlarda uygulama alanı bulur.

Ağırlık etkili toz filtrelerin prensip şeması Şekil 5.1'de görülmektedir. Bu tip cihazların toz tutma kapasitesi ve etkinliklerin teorik analizi için genel olarak karışmamış akış ve karışmış akış olarak adlandırılabilen iki basit yöntem kullanılır. Pratikteki gözlemler bu iki yöntemin arasında sonuçlar vermektedir. Her iki yöntemde de gazın kapalı hacim içindeki ortalama yatay hızı

$$V_m = \frac{Q}{WH} \quad (5.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada Q akışkanın hacimsel debisini, W ve H ise çökeltme hacminin enini ve yüksekliğini göstermektedir.

Karışmamış akış modelinde

1) Dikdörtgen bir kesit içinde yatay gaz hızının gerçekte

$$V = V_{ort} \left( \frac{6}{H^3} \right) (zH - z^2) \quad (5.2)$$

olmasına karşılık, her noktada Vort olduğu,

2) Gaz içindeki toz parçacıklarının yatay hızının her zaman Vort hızına eşit olduğu,

3) Toz parçacıklarının düşey hızının yerçekimi ivmesi nedeniyle oluşan  $V_c$  çökeltme hızına eşit olduğu,

4) Toz parçacıkları hacmin tabanında bir kere çökdikten sonra, tekrar akışa karışmadığı kabul edilir. Bu kabullere göre karışmamış akış modelinde, gazların çökeltme hacmini geçiş süresi

$$t = \frac{L}{V_{en}} \quad (5.3)$$

ve bu geçiş süresinde toz parçacıkların çökeltme hızı nedeniyle bu toz parçacıklarının kat ettikleri düşey yol

$$S = tV_f = V_f \frac{L}{V_{en}} \quad (5.4)$$

şekillerinde verilir. Toz parçacığının çökeltme hacmine girişte tabandan olan yüksekliği bu düşey yoldan az ise, bu parçacık çökeltme hacminin sonuna gelmeden tabana çökelecektir. Karışmamış akış modeli için göz önüne alınan çökeltme hacminin

verimi

$$\eta = \frac{LV_f}{HV_{en}} \quad (5.5)$$

eşitliğinden bulunabilir. Stokes kanuna göre Denk. (3.4) ile verilen ve Pak akışkan yoğunluğunun parçacığın yoğunluğu yanında ihmal edilmesi halinde, elde edilen çökeltme hızının bu eşitliğe taşınması ile

$$\eta = \frac{Lg D^2 \rho_p}{18\mu H V_{en}} \quad (5.6)$$

elde edilir.

Karışmış akış modelinde ise gazın z doğrultusunda tamamen karıştığı fakat x doğrultusunda karışmadığı kabul edilir. Toz parçacıkları, dx kalınlığındaki hacim elemanını

$$dt = \frac{dx}{V_{en}} \quad (5.7)$$

zamanında geçer. Bu kalınlıkta toplanan parçacık oranı

$$f = \frac{V_f dt}{H} \quad (5.8)$$

yazılabilir. Bu kısımda derişiklik azalması ise

$$dc = -f.c = -\frac{V_f dt}{H} c = -\frac{V_f dx}{H V_{en}} c \quad (5.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikten de

$$\frac{dc}{c} = - \frac{V_{\dot{c}}}{HV_{ort}} dx \quad (5.10)$$

elde edilir. Bu denklem gazın çöktürme hacmine giriş çıkışı arasında,  $x=0$  ile  $x=L$  arasında integre edilir ise karışmış akış modeli için

$$\ln \frac{c_2}{c_1} = - \frac{V_{\dot{c}}L}{HV_{ort}} \quad (5.11)$$

bulunabilir. Burada  $c_1$ , ve  $c_2$  sırasıyla, giriş ve çıkıştaki derişiklikler anlamlarındadır. Bu durumda etkenlik

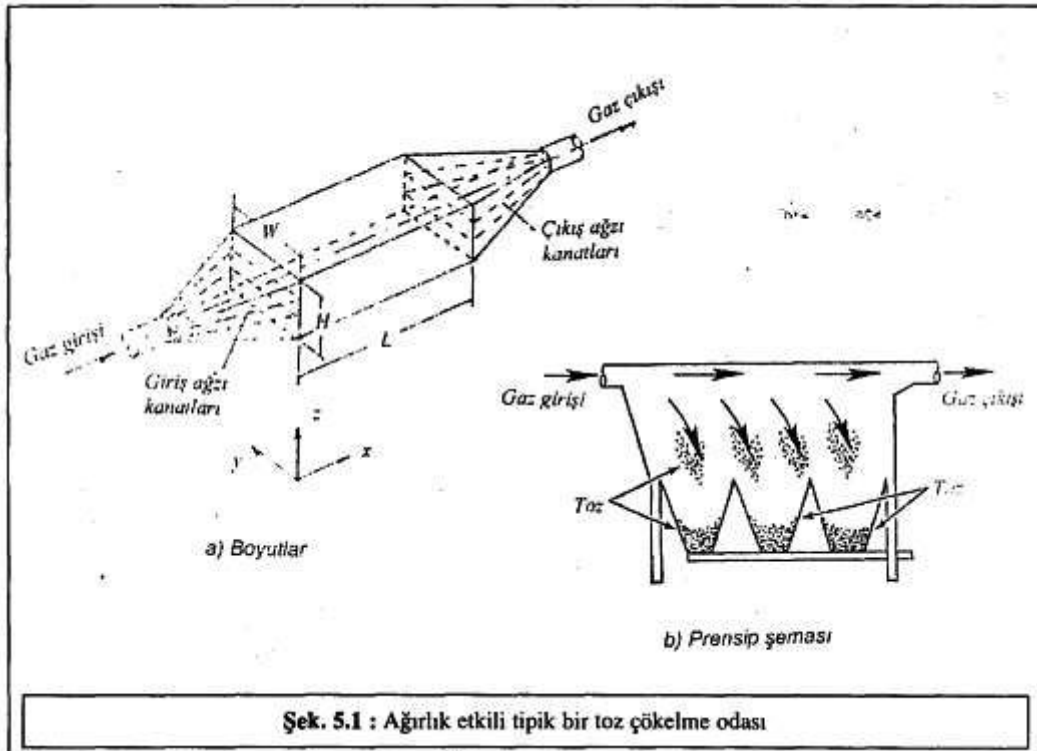
$$\eta = 1 - \frac{c_2}{c_1} = 1 - \exp \left[ - \frac{V_{\dot{c}}L}{HV_{ort}} \right] \quad (5.12)$$

bağlantısı ile verilebilir. Gazın yoğunluğunun parçacık yoğunluğu yanında ihmal edilmesi durumunda Stokes kanunu yardımı ile bu bağıntıdaki çöktürme hızı konular ise

$$\eta = 1 - \exp \left[ - \frac{LgD^2\rho_{par}}{HV_{ort}18\mu} \right] \quad (5.13)$$

elde edilir.

Çöktürme odalarının etkenliklerini artırmak ve kapladıkları hacimleri küçültmek için, Şekil 5.2'de gösterildiği gibi pratikte şaşırtmalı ve pancurlu tip odalara da rastlanılabilmektedir. Bu tip odalarda basınç kaybı biraz daha fazladır.



İşlem	Değişiklik	Toz Boyutu	Siklon	Yüksek Verimli Santrifüj	Islak Toz Tutucu		Dokuma Filtre	Elektrostatik
					Orta Basınç	Yüksek Basınç		
<b>SERAMİK</b>								
a. Ham madde eldesi	Az	İnce	Nadir	Seyrek	Sıkça	Y/K	Sıkça	Y/K
b. Şekil verme	Az	İnce/orta	Nadir	Ara sıra	Sıkça	Y/K	Sıkça	Y/K
c. Refrakter ilacı	Çok	Kaba	Seyrek	Ara sıra	Sıkça	Nadir	Sıkça	Y/K
d. Sir ve emaye spreyleri	Orta	Orta	Y/K	Y/K	Çoğu	Y/K	Ara sıra	U/D
e. Cam eritme	Az	İnce	U/D	U/D	Ara sıra	Y/K	Ara sıra	Çoğu
f. Cam eritme ayırma	Az	İnce	U/D	U/D	Y/D	Ekseri	Ekseri	Ekseri
g. Fiberglass oluşumu	Az	İnce	U/D	U/D	Ara sıra	Y/K	Y/K	Çoğu
<b>KİMYASAL</b>								
a. Malzeme eldesi	Az/orta	İnce/orta	Ara sıra	Sıkça	Sıkça	Sıkça	Sıkça	Y/K
b. Ezmek, öğütme	Orta/çok	İnce/kaba	Ekseri	Sıkça	Sıkça	Ara sıra	Sıkça	Y/K
c. Pnömatik taşıma	Çok fazla	İnce/kaba	Çoğu	Ara sıra	Nadir	Nadir	Çoğu	Y/K
d. Fırın, soğutucu	Çok	Orta/kaba	Ara sıra	Çoğu	Çoğu	Sıkça	Nadir	Ekseri
e. Abık yakma fırını	Az/orta	İnce	Y/K	Y/K	Y/K	Sıkça	Nadir	Sıkça
<b>KÖMÜR MADENCİLİĞİ ve ELDESİ</b>								
a. Malzeme eldesi	Orta	Orta	Nadir	Ara sıra	Ara sıra	Y/K	Çoğu	U/D
b. Bunker havalandırma	Orta	İnce	Ara sıra	Sıkça	Ara sıra	Y/K	Çoğu	U/D
c. Toz alma	Çok	Orta/kaba	Ara sıra	Sıkça	Ara sıra	Y/K	Çoğu	U/D
d. Kurutma	Orta	İnce	Nadir	Ara sıra	Sıkça	Ara sıra	Y/K	U/D
<b>UÇAN KÖL</b>								
a. Kömür yakma								
Zincir ızgara	Az	İnce	U/D	Nadir	Y/K	Y/K	Sıkça	Y/K
Stoker	Orta	İnce/kaba	Nadir	Nadir	Y/K	Y/K	Sıkça	Nadir
Toz kömür	Çok	İnce	U/D	Sıkça	Y/K	Y/K	Sıkça	Çoğu
Akışkan yataklık	Orta	İnce	Çoğu				Sıkça	Sıkça
Kömür çamuru	Az						Ekseri	Ekseri
b. Odun talaşı	Değişken	Kaba	Çoğu	Çoğu	Y/K	Y/K	Ara sıra	Ekseri
c. Şehir çöpü	Az	İnce	Y/K	Y/K	Ara sıra	Y/K	Çoğu	Sıkça
d. Yağ	Az	İnce	Y/K	Y/K	Y/K	Y/K	Çoğu	Ekseri
e. Biyolojik	Orta	İnce/kaba	Y/K	Y/K	Ara sıra	Y/K	Çoğu	Sıkça
<b>DOKÜMHANE</b>								
a. Eleme	Az/orta	İnce	Nadir	Nadir	Nadir	Seyrek	Çoğu	Y/K
b. Kum eldesi	Orta	İnce/orta	Nadir	Nadir	Çoğu	Y/K	Nadir	Y/K
c. Döner değirmen	Orta	Orta/kaba	U/D	U/D	Sıkça	Y/K	Çoğu	Y/K
d. Aşındırıcı temizleme	Orta/çok	İnce/orta	U/D	Ara sıra	Sıkça	Y/K	Çoğu	Y/K
<b>TAHİL TAŞIMA, UN VE YEM DEĞİRMENİ</b>								
a. Tahil eldesi	Az	Orta	Çoğu	Ara sıra	Nadir	Y/K	Sıkça	U/D
b. Tahil kurutma	Az	Kaba	U/D	U/D	Y/K	Y/K		U/D
c. Un tozu	Orta	Orta	Nadir	Ekseri	Ara sıra	Y/K	Çoğu	U/D
d. Yem değirmeni	Orta	Orta	Ekseri	Ekseri	Ara sıra	Y/K	Sıkça	U/D
<b>METAL ERİTME</b>								
a. Yüksek fırın	Çok	Değişik	Sıkça	Nadir	Sıkça	Sıkça	Y/K	Sıkça
b. Konverter	Orta	İnce/orta	U/D	U/D	U/D	Ekseri	Nadir	Sıkça
c. Elektrik ark ocağı	Az	İnce	U/D	U/D	U/D	Ara sıra	Çoğu	Nadir
d. Demir kupol ocağı	Orta	Değişik	U/D	U/D	Sıkça	Ekseri	Sıkça	Ara sıra
e. Demir olmayan ocak	Değişken	İnce	U/D	U/D	Nadir	Ara sıra	Çoğu	Y/K
f. Demir olmayan pota	Az	İnce	U/D	U/D	Nadir	Nadir	Ara sıra	Y/K
<b>MADENCİLİK ve KAYA ÜRÜNLERİ</b>								
a. Malzeme eldesi	Orta	İnce/orta	Nadir	Ara sıra	Çoğu	Y/K	Önemli	Y/K
b. Kurutucular, fırınlar	Orta	Orta/kaba	Sıkça	Ara sıra	Sıkça	Ara sıra	Y/K	Ara sıra
c. Çimento kaya kurutucu	Orta	İnce/orta	U/D	Sıkça	Ara sıra	Nadir	Y/K	Ara sıra
d. Çimento fırını	Çok	İnce/orta	U/D	Sıkça	Nadir	Y/K	Çoğu	Çoğu
f. Çimento öğütme	Orta	İnce	U/D	Nadir	Y/K	Y/K	Çoğu	Nadir
g. Çimento soğutucu	Orta	Kaba	U/D	Ara sıra	Y/K	Y/K	Ara sıra	Y/K

Tablo 4.2 : Endüstriyel toz tutucular (Kane ve Alden, 1967).

İşlem	Değişiklik	Toz Boyutu	Siklon	Yüksek Verimli Santrifüj	Islak Toz Tutucu		Dokuma Filtre	Elektrostatik
					Orta Basıncı	Yüksek Basıncı		
<b>METAL İŞLEME</b>								
a. Öğütme, fırçalama, pas giderme	Az	Kaba	Ara sıra	Sıkça	Önemli	Y/K	Önemli	Y/K
b. Parlatma	Az	Değişik	Sıkça	Nadir	Sıkça	Y/K	Nadir	Y/K
c. Alet odası	Az	İnce	Sıkça	Sıkça	Sıkça	Y/K	Sıkça	Y/K
d. Dökme demir işleme	Orta	Değişik	Nadir	Sıkça	Önemli	Y/K	Önemli	Y/K
<b>İLAÇ ve BESİN İMALATI</b>								
Karıştırma, öğütme, tartma, paketlenme	Az	Orta	Nadir	Sıkça	Sıkça	Y/K	Sıkça	Y/K
<b>PLASTİK</b>								
a. Ham madde işlemleri	Kimyasal bölümdeki işlemlere bkz.							
b. Plastik yüzey işleme	Az/orta	Değişik	Sıkça	Sıkça	Sıkça	Y/K	Sıkça	Y/K
<b>KAĞIT ENDÜSTRİSİ</b>								
a. Likör kazanı								
Doğrudan temaslı	Çok	Orta	Y/K	Y/K	Y/K	Y/K	Ara sıra	Çoğu
b. Kireç fırını	Çok	Kaba	Y/K	Y/K	Y/K	Y/K	Ekseri	Ekseri
c. Yonga kurutma	Çok	İnce/kaba	Y/K	Y/K	Y/K	Y/K	Ara sıra	Ekseri
<b>LASTİK ENDÜSTRİSİ</b>								
a. Karıştırma	Orta	İnce	U/D	U/D	Sıkça	Y/K	Çoğu	Y/K
b. Pişirme silindri	Az	İnce	U/D	U/D	Çoğu	Y/K	Sıkça	Y/K
c. Talk tozlama	Orta	Orta	U/D	U/D	Sıkça	Y/K	Çoğu	Y/K
d. Öğütme	Orta	Kaba	Ekseri	Ekseri	Sıkça	Y/K	Ekseri	Y/K
<b>SUNTA İMALATI</b>								
Parbükül kurutucuları	Orta	İnce/ kaba	Çoğu	Ara sıra	Sıkça	Ara sıra	Nadir	Ara sıra
<b>AHŞAP İŞÇİLİĞİ</b>								
a. İşleme makineleri	Orta	Değişik	Sıkça	Ara sıra	Nadir	U/D	Sıkça	U/D
b. Zamparalama	Orta	İnce	Çoğu	Ara sıra	Ara sıra	U/D	Sıkça	U/D
c. Artıkların taşınımı	Çok	Değişik	Çoğu	Nadir	Ara sıra	U/D	Ara sıra	U/D

Tablo 4.2 : Devam

## 5.2 SANTRİFÜJ ETKİLİ TOZ FİLTRELERİ (SİKLONLAR)

Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, r yarıçapında  $V_s$  çevresel hızı ile dairesel olarak hareket eden m kütledeki bir parçacığa etki eden santrifüj kuvvet

$$F_{cs} = \frac{mV_s^2}{r} = m\omega^2 r \quad (5.14)$$

bağlantısından bulunabilir. Bu bağıntıda  $\omega = V_s/r$  şeklinde, ifial hızı göstermektedir. Stokes kanununda çökelmeye etki eden g yerçekimi ivmesi yerine,  $V_s^2/r$  veya  $\omega^2 r$  değerleri konularak, santrifüj kuvvetin etkisi ile olan  $V_{cs}$  çökeltme hızı

$$V_{cs} = \frac{V_s^2 D^2 \rho_{par}}{18 \mu r} \quad (5.15)$$

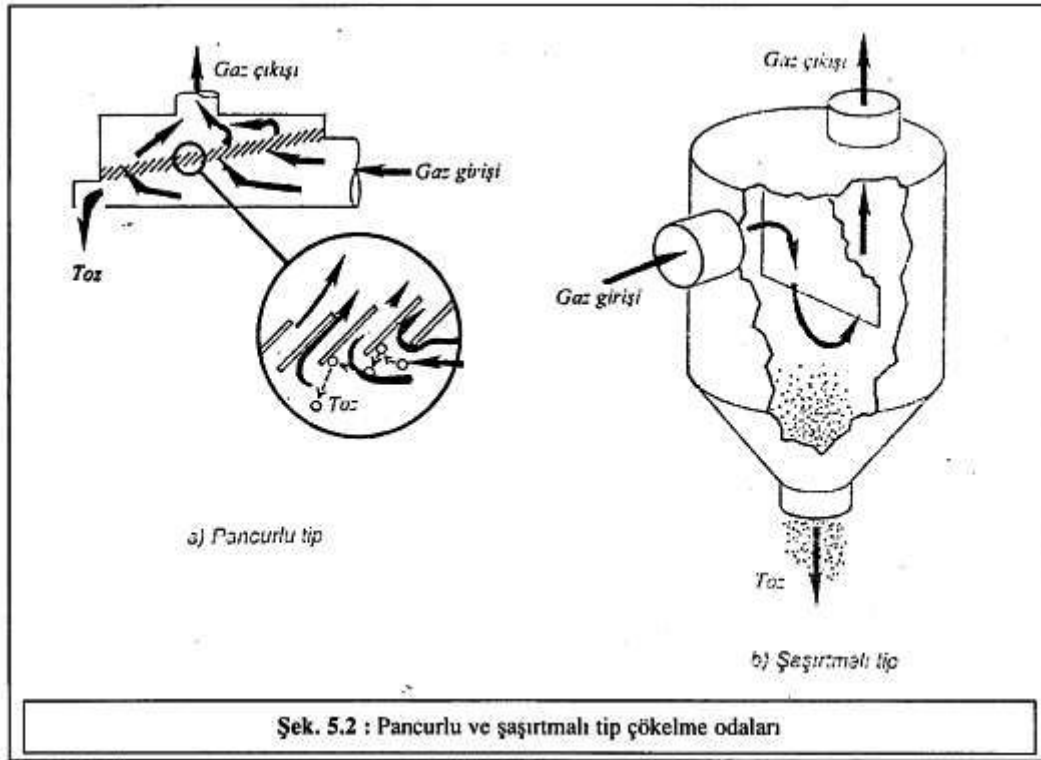
olarak bulunabilir. Yaklaşık 0.3 m yarıçapında, 20 m/s çevresel hızında hareket eden bir parçacığa etki eden santrifüj kuvvet, yerçekiminin teki ettiği kuvvetin 100 katından daha fazladır. Bu nedenle santrifüj etkili filtrasyon sistemlerindeki pratik uygulamalarda, yerçekiminden olan çökeltme hızı, santrifüj kuvvetten olan çökeltme hızı yanında ihmal edilebilir. Bu özellikten yararlanılarak santrifüj etkili toz filtreleri geliştirilmiştir. Siklon ayırıcılar adı da verilen bu filtrelere ait bir şema Şek. 5.4'te görülmektedir. Bu sistem içinde

tozlu gazın akışı iç içe aynı merkezli iki helis boyunca olur. Gazın dıştaki helis boyunca hareketi esnasında içindeki tanecikleri bırakır, temizlenmiş gaz ise içteki helis boyunca yukarı doğru hareket eder. Dıştaki helis prensip olarak ağırlık etkili toz filtrelerine benzer. Denk. (5.6) ve (5.13)'te ağırlık etkili toz filtrelerinde karışmamış ve karışmış akış modelleri hallerindeki verim bağıntılarında, L akış yolu yerine  $N\pi D_0$ , H filtre yüksekliği yerine  $W_i$  değerleri alındığında, santrifüj etkili toz filtrelerin verimleri için

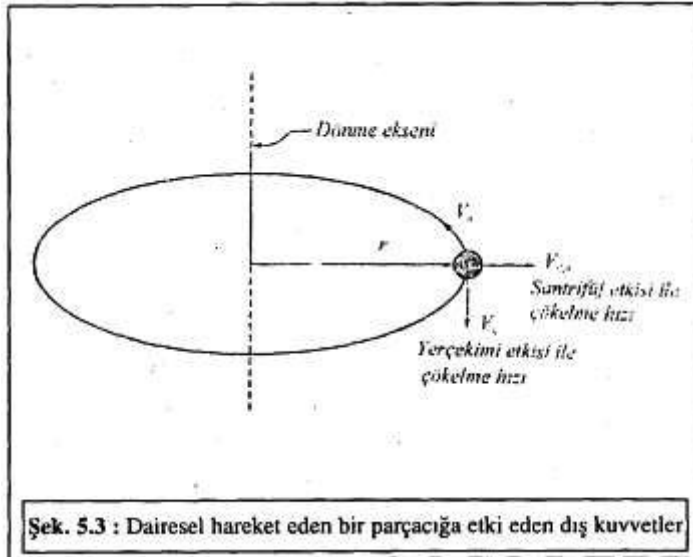
$$\text{karışmamış akış modeli} \quad \eta = \frac{\pi N V_i D^2 \rho_{\text{toz}}}{9 W_i \mu} \quad (5.16)$$

$$\text{karışmış akış modeli} \quad \eta = 1 - \exp \left( - \frac{\pi N V_i D^2 \rho_{\text{toz}}}{9 W_i \mu} \right) \quad (5.17)$$

bağıntıları elde edilebilir. Bu bağıntılarda, N siklon içinde dış helisteki dönme sayısını,  $W_i$  ise Şek. 5.4'te görüldüğü gibi giriş kesiti enini göstermektedir.







Kritik çap, toz filtrelerini karakterize eden ve çok kullanılan bir büyüklüktür. Bu büyüklük, toz filtrede tutulan ve filtreden geçen parçacıkların ölçüsünü verir. Uluslararası literatürde ve çevre kirliliğinde, ilk defa Rosin-Rammeler (1932) tarafından verilen bir filtrede tutulan tozların kritik çap tanımı, bu filtrede verimin %50 değerine karşı gelen toz parçacığı çapı olarak göz önüne alınır. Denk. (5.6), (5.13), (5.16) ve (5.17) eşitlikleri kullanıldığında, kritik parçacık çapları ve bu çaplara göre tanımlanmış verim ifadeleri tablo 5.1'de, bu ifadelerin D/D<sub>k</sub> oranına göre değişimleri Şek. 5.5'te görülmektedir. Ayrıca Şek. 5.5'te pratik olarak kullanılabilen ve deneyler ile uyum içindeki

$$\eta = \frac{(D/D_k)^2}{1 + (D/D_k)^2} \quad (5.18)$$

deneysel bağıntısı da çizilmiştir.

Birçok araştırmacı, siklon tasarımı için değişik boyutlar vermişlerdir. Bu tasarım önerilerine ait bazı karakteristik boyutlar Tablo 5.2'de görülmektedir. Genel amaçlı veya yüksek verimli siklon tasarımları bu tablodan yararlanılarak yapılabilir.

Pratikte sıkça karşılaşılabilecek bir siklon için, W<sub>i</sub>= 0.2 m, V<sub>s</sub>= 20 m/s, N= 5, PPar= 2000 kg/m<sup>3</sup> ve havanın dinamik viskozitesi μ= 1.8 x 10<sup>-5</sup> kg/m.s değerleri göz önüne alındığında, Tablo 5.1 yardımı ile kritik toz çapı hesaplanır ise

$$D_k = \left[ \frac{(9)(0.2)(1.8 \times 10^{-5})}{2\pi(5)(20)(2000)} \right]^{1/2} = 5 \times 10^{-6} \text{ m} = 5 \mu\text{m}$$

elde edilir. Bu değere göre genel amaçlı bir siklon ile pratik olarak filtre edilebilecek kritik toz çapı 5 μm mertebelerindedir. Daha küçük çaplı tozların siklon tipi filtrelerde tutulması istendiğinde, Tablo 5.1'deki kritik çap bağıntısından görüleceği gibi, ya W<sub>i</sub> boyutu küçültülmeli ya da V<sub>s</sub> hızı artırılmalıdır. Hızın artması siklondaki yük kaybını artırdığından, genellikle tercih edilen yöntem, W<sub>i</sub> boyutunun küçültülmesidir. Bu da Şek. 5.6'da görüldüğü gibi, multisiklon adı verilen çok sayıda küçük siklonların paralel olarak birarada yapılması ile gerçekleşir. Bu tip siklonlarda W<sub>i</sub> boyutunun 0.2 m değeri yerine 0.05 m alınması durumunda kritik toz çapı için 2.5 μm bulunabilir. Şek. 5.7'de görüldüğü gibi, pratikteki bazı santrifüj toz tutucular dinamik olarak çalışırlar. Bu durumda sistemdeki fan ile toz tutma kısmı tek bir birim halinde gerçekleştirilmiştir. Fanın kanatları tozları ayıracak biçimde ve ayrılan bu tozların salyangozdaki bir yarıktan toz toplama kısmına gönderecek şekilde tasarımı yapılmıştır. Bu sistem ile 5 μm çapından küçük toz tanecikleri tutulamaz, sistemin en büyük

üstünlüğü kompakt olmasıdır.

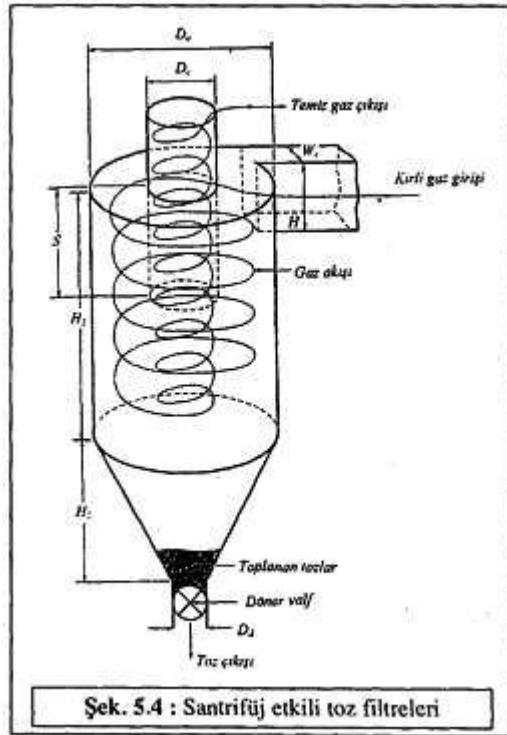
### Basınç Düşümü

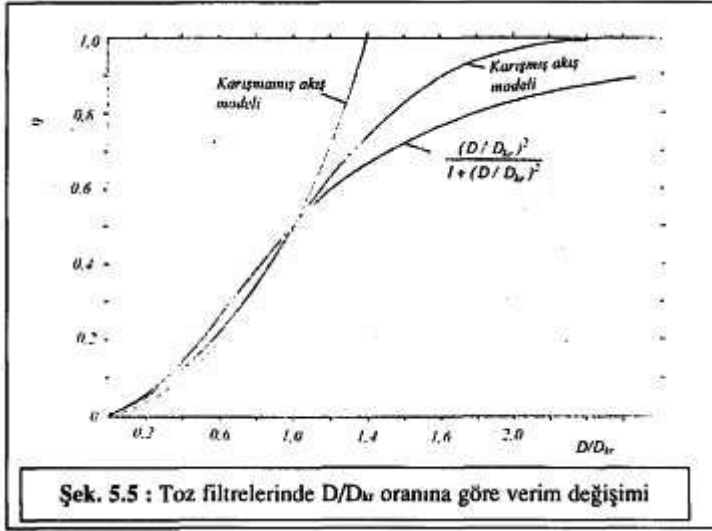
Genel olarak herhangi bir akış bozucu elemandaki basınç düşümü için, K boyutsuz bir katsayı olmak üzere

$$\Delta p = K \frac{\rho V_1^2}{2} \quad (5.19)$$

eşitliği yazılabilmektedir. Siklonların da birer akış bozucu eleman olduğu göz önüne alınırsa, bu durumda Denk. (5.19)'da verilen K katsayısı, birçok santrifüj siklon için yaklaşık 8 değerindedir.

Toz filtresinde oluşan bu basınç kaybı, bir flan ile karşılanmalıdır. Sisteme böyle bir fan, toz filtresinden önce veya sonra konulabilir. Fanın filtreden önce konulmasının en büyük sakıncası, fanın tozlu ortamda çalışması nedeniyle kanatlarında toplanabilecek tozların sistemin balansını bozabilmesidir. Fanın filtreden sonra konulmasının sakıncası ise, filtrenin vakum altında kalması nedeniyle contalarındaki sızdırmazlığın iyi olmaması durumunda ortamdaki hava ve toz emebilmesidir. Bu tip cihazlar uçan külün, plastik ve ağaç endüstrisindeki tozların tutulmasında yaygın bir uygulama alanı bulabilmektedir.





### 5.3 ELEKTROSTATİK TOZ FİLTRELERİ

Bu tip toz filtrelerinde, gaz içindeki toz tanecikleri bir elektrik alanının etkisi ile çöktürülürler. Ağırlık etkili ve siklon tipi filtrelerde, toza etki eden dış kuvvetin daha fazla arttırılamaması nedeniyle yaklaşık 5 µm çapındaki tanecikler tutulabilmektedir. Elektrostatik toz filtreleri de prensip olarak ağırlık ve siklontipi toz filtrelerine benzer. Fakat bunlardaki dış kuvvetin çok daha büyük olması nedeniyle, oldukça küçük çaplı tozlar çöktürülebilir. Şekil 5.8'de iki levha arasına yerleştirilmiş tellerden oluşan bir tel-levha tipi elektrostatik filtrenin prensip şeması görülmektedir. İçinde toz tanecikleri bulunan gaz kütlesi, elektrik gerilimleri sıfır olan topraklanmış iki levha arasından geçirilir. Levhalar arasında, gerilimi -40.000 volt olan tel sırası yerleştirilir. Tellerin bu gerilimle yüklenmesi ve levhaların topraklanması, gaz içindeki serbest elektronların yüklenmesine neden olur ve bunların levhalara doğru bir kuvvet ile çekilmelerini sağlar. Gaz temizlenmiş olarak levhalar arasından çıkarken, tozlar levha üzerinde birikerek, bir kek oluşturur. Zaman zaman elektrik akımı kesilerek bu kekin levhadan uzaklaştırılması sağlanır.

Böyle bir elektrik alanında bulunan toz parçacığına etki eden  $q$  elektrik yükü

$$q = 3\pi \left( \frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \epsilon_0 D_0 E \quad (5.20)$$

bağıntısı ile verilebilmektedir. Bu bağlantıda,  $\epsilon$  toz taneciğinin dielektrik sabitini,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  C/V.m serbest uzayın permitivity değerini,  $D_0$  toz parçacığının çapını,  $E$  (V/m) ise yerel elektrik alanını göstermektedir. Tipik katı toz parçacıkları için  $\epsilon$  dielektrik sabiti 4 ile 8 arasında değişir,  $q$  elektrik yüküne sahip toz parçacığına etki

$$F = qE = 3\pi \left( \frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \epsilon_0 D_0^2 E^2 \quad (5.21)$$

şeklinde yazılabilir (de Nevers 1995). bu parçacığa etki eden ivme

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3\pi \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon+2}\right) \epsilon_0 D^3 E^2}{\frac{\pi}{6} D^3 \rho_{par}} = \frac{18 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon+2}\right) \epsilon_0 E^2}{D \rho_{par}} \quad (5.22)$$

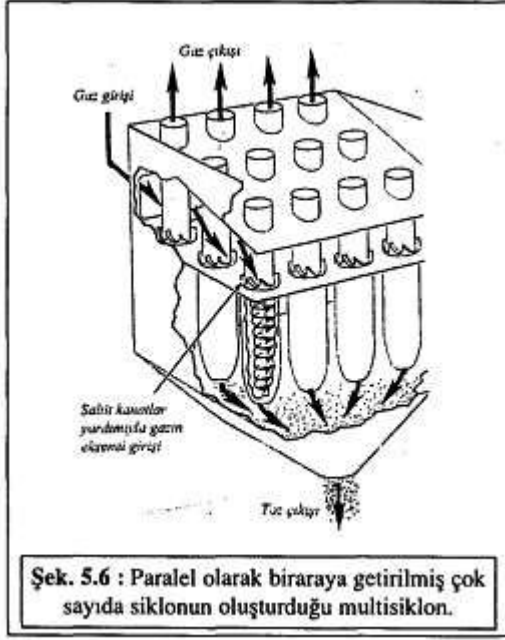
olur. Denk (3.4)te verilen çökme hızı bağıntısında g yerçikimi ivmesi yerine Denk. (5.22)'deki ivmesi ve Ppar >> Ppak olduğu göz önüne alınır ise, elektrik alanındaki tozların çökme hızı olarak

$$V_f = \frac{D \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon+2}\right) E^2}{\mu} \quad (5.23)$$

Bulunur. Örnek olarak D = 1 Mm çapında, dielektrik sabiti  $\epsilon = 6$  olan bir taneciğin E=400 kV/m elektrik alanında  $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$  kg/m.s dinamik viskoziteye sahip hava içindeki çökme hızı olarak

$$V_f = \frac{(10^{-6}) (8.85 \times 10^{-12}) (400 \times 10^3)^2 \left(\frac{6}{6+2}\right)}{1.8 \times 10^{-5}} = 0.057 \text{ m/s} \quad (5.24)$$

elde edilebilir. Dikkat edilirse ağırlık etkili (çökme odaları) veya santrifüj etkili filtrelerin aksine, elektrostatik filtrelerde çökme hızı, diğer filtrelerdeki gibi birden azalmaz. Bu nedenle elektrostatik filtrelerde 0.01  $\mu\text{m}$  çapından daha küçük tanecikler kolayca tutulabilir. Değişik toz cinsleri için pratik olarak bir elektrostatik filtredeki çökme hızları Tablo 5.3'te verilmiştir.



	<b>Kritik çap</b>	<b>Verim</b>
Ağırlık etkili toz tutucu (karışmamış akış modeli)	$\left( \frac{9\mu HV_{ort}}{Lg\rho_{par}} \right)^{1/2}$	$\eta = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{D_{kr}} \right)^2$
Santrifüj etkili toz tutucu (karışmamış akış modeli)	$\left( \frac{9W_{1,\mu}}{2\pi NV_{1,\rho_{par}}} \right)^{1/2}$	$\eta = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{D_{kr}} \right)^2$
Ağırlık etkili toz tutucu (karışmış akış modeli)	$\left( \frac{9\mu HV_{ort}}{Lg\rho_{par}} \right)^{1/2}$	$\eta = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{D}{D_{kr}} \right)^2 \right]$
Santrifüj etkili toz tutucu (karışmış akış modeli)	$\left( \frac{9W_{1,\mu}}{2\pi NV_{1,\rho_{par}}} \right)^{1/2}$	$\eta = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{D}{D_{kr}} \right)^2 \right]$

**Tablo 5.1:** Kritik çap ve kritik çapa göre verim ifadeleri

Sembol Şek. 5.4'e bkz.	Yüksek verimli		Genel amaçlı		
	Stairmand (1951)	Swift (1960)	Lapple (1967)	Swift (1960)	Peterson (1965)
$D_0$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$H$	0,5	0,44	0,5	0,5	0,583
$W_1$	0,2	0,21	0,25	0,25	0,208
$S$	0,5	0,5	0,625	0,6	0,583
$D_0$	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
$H_1$	1,5	1,4	2,0	1,75	1,333
$H_2$	2,5	2,5	2,0	2,0	1,84
$D_0$	0,375	0,4	0,25	0,4	0,5

**Tablo 5.2:** Teçet girişli siklonlara ait çeşitli araştırmacıların önerdiği tasarım karakteristikleri.

Şekil 5.8'de gösterilen elektrostatik filtrenin toz toplama levhalarından birinin alanı  $A=L h$ , bu filtreden akan hacimsel debi  $Q=H h$  Vort şeklinde alındığında, bu değerlerin Denk (5.6) ile Denk (5.13)'e taşınması ile

karışmamış akış modeli için  $\eta = \frac{V_f A}{Q}$

karışmamış akış modeli için

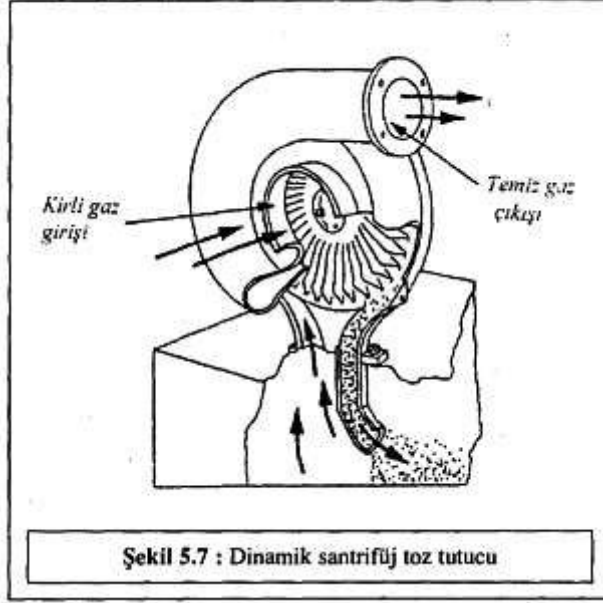
karışmış akış modeli için  $\eta = 1 - \exp\left(-\frac{V_f A}{Q}\right)$

karışmış akış modeli için

elde edilebilir. Bir önceki örnekteki toz için  $A/Q = 30$  s/m olması halinde elektrofiltrenin karışmış akış modeli için verimi

$\eta = 1 - \exp(-0.057 \times 30) = 0.82$  bulunur. Değişik toz çapları için bu örnekteki elektrofiltredeki çökeltme hızları ve bu çaplardaki karışmış akış modeline ait verim değerleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

(6.1)



Şekil 5.7 : Dinamik santrifluj toz tutucu

## 6. FİLTRE EDİCİ CİHAZLAR

İçinde toz tanecikleri bulunan gazlar, geçirgenliği uygun olan bir ortamdan geçirildiği takdirde içlerindeki tanecikler bu ortamlar tarafından tutulabilir. Bu tip cihazlar yüzeysel olarak bez filtreler ile gazı temizleyebildikleri gibi, gazın dolgu tabakaları içinden geçirilmesi ile hacimsel olarak da gazı filtre edebilirler. Prensipte bez filtrelerde toz tutma işlemi, filtrenin kirlili akışkanın bulunduğu yüzeyde biriken ve kek adı verilen toz tabakası olurken; hacimsel filtrelerde toz, liflerden yapılmış bir hacim içerisinde tutulur. Bez filtrelerin periyodik olarak temizlenmelerine karşılık, hacimsel filtreler kirlendiklerinde yenisi ile değiştirilirler.

Genel olarak bütün filtre malzemelerinden;

- Verimlerinin yüksek olması
- Büyük filtrasyon hızlarında, küçük basınç kayıplarına sahip olması
- Mekanik kuvvetlere, fazla sıcaklığa, kimyasal maddelere ve korozyona karşı dayanıklı olması.

gibi özellikler istenir. Filtreleme işlemlerinde, değişik özelliklere sahip, doğal ve yapay olmak üzere çok çeşitli elyaflar kullanılabilir.

### 6.1 YÜZEYSEL FİLTRELER

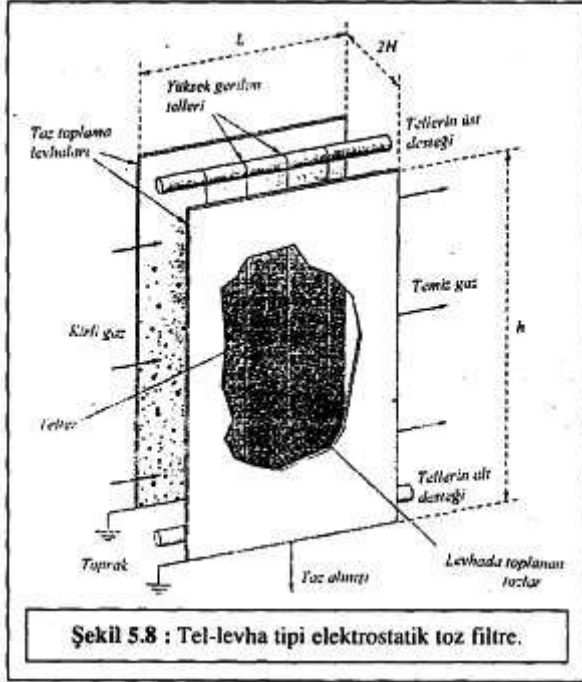
Doğal veya yapay elyaflardan dokuma yoluyla elde edilen yüzeysel filtrelerde, esas toz tutma işlemi Şek. 6.1 'de gösterilen filtre yüzeyine zamanla biriken ve kek adı verilen toz tabakası yardımı ile olur. Burada filtre ortamının esas görevi kek oluşumunu sağlamaktır. Günümüzde kullanılan çeşitli dokuma yüzeysel filtrelerle ait örnekler ve bunların bazı karakteristikleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Hem kek tabakasının hem de filtre malzemesinin gözenekli ortam olmaları nedeniyle, laminar akış halinde bunlarda oluşan toplam basınç kaybı

$$\Delta p_{top} = \Delta p_{kek} + \Delta p_{filtre} = \left[ \mu \frac{\Delta x}{k} \frac{Q}{A} \right]_{kek} + \left[ \mu \frac{\Delta x}{k} \frac{Q}{A} \right]_{filtre} \quad (6.1)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu bağlantıda  $\mu$  gazın dinamik viskozitesini,  $k$  kek ve filtrenin geçirgenliğini (permeability),  $\Delta x$  kek ve filtrenin kalınlıklarını,  $Q$  gazın hacimsel debisini,  $A$  ise filtre yüzeyini göstermektedir. Kek ve filtrenin geçirgenliği  $k$  katsayısı, kürelerden oluşan bazı basit sistemler için akışkanlar mekaniği prensiplerinden hareket ederek hesaplanabilir. Pratikteki karmaşık durumlar genellikle deneysel olarak bulunur. Çoğunlukla

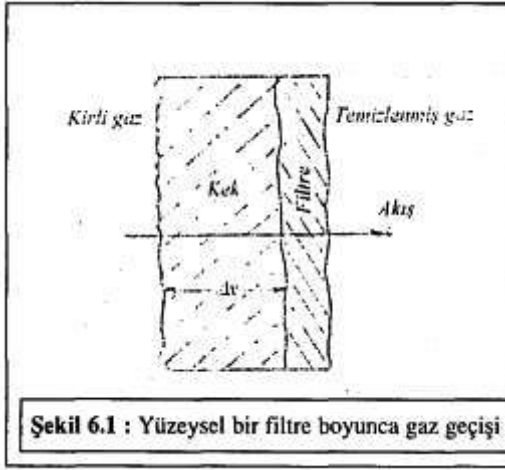
kek kısmında oluşan basınç kaybının filtreden çok fazla olması nedeniyle, çoğu zaman filtredeki basınç kaybı ihmal edilebilir. Bazı kaynaklarda filtredeki toplam basınç kaybı  $\Delta P_{top} = K V_i W = K W Q / A$  (6.2) şeklinde de ifade edilir (ASHRAE 1966). Bu bağıntıda K (Pa/m/s) (g/m<sup>2</sup>) birim gaz hızında, kek kütlelerinin birim alanındaki özgül basınç düşümünü;  $V_i$  (m/s) gaz hızını, W (g/m<sup>2</sup>) birim alandaki kek kütlelerini göstermektedir.



Uygulama alanı	Çökelme hızı, $V_c$ (m/s)
Toz kömür (uçan kül)	0,1 - 0,13
Kağıt endüstrisi	0,076
Açık ocak	0,056
Maden eritme fırını	0,13
Alçı üretimi	0,16 - 0,19
Sıcak fosfor	0,03
Asit buharı ( $H_2 SO_4$ )	0,056 - 0,076
Asit buharı ( $TiO_2$ )	0,056 - 0,076
Portland çimento üretimi (ıslak yöntem)	0,1 - 0,11
Portland çimento üretimi (kuru yöntem)	0,056 - 0,071
Katalizör toz	0,076
Kupol ocağı ( demir-kök oranı = 10)	0,03 - 0,036

**Tablo 5.3 : Değişik toz cinsleri için elektrostatik filtrelerde yaklaşık çökelme hızları (ASHRAE 1966).**





$D (\mu\text{m})$	$V_f (m/s)$	$\eta$
0,01	0,006	0,16
0,5	0,029	0,57
1	0,057	0,82
3	0,171	0,994
5	0,285	0,999

**Tablo 5.4 : Tipik bir elektrostatik filtrede toz çapına göre çökelme hızları ve karışmamış akış modeline ait verim değişimleri ( $\epsilon=6$ ,  $E=400$  kV/m,  $A/Q=30$  s/m,  $\mu=1.8 \times 10^{-5}$  kg/m.s)**

Kek kalınlığının zamanla artması nedeniyle, basınç kaybı arttığından, belirli periyotlarda bu filtrenin temizlenmesi gerekir. Şek. 6.2'de gösterildiği gibi, sistem periyodik olarak çalışır. Yüzeysel toz filtreleri yapılarına (torba veya düz gibi) ve temizlenme şekillerine göre gruplandırılır. Pratikten seçilmiş bazı örnekler Şek. 6.3'te görülmektedir.

Örnek 1: Çapları 0.2 m, boyları 6.5 m, aktif alanları 4 m<sup>2</sup> olan 112 adet torba filtreden yapılmış 6 bölümlü endüstriyel bir toz temizleme tesisinde, 40 m<sup>3</sup>/s debisindeki gazın temizlenmesi istenmektedir. (Ensor 1976). Temizlenecek gaz içinde 30 g/m<sup>3</sup> toz bulunmakta, sistemin temizleme verimi %99, oluşan kekin yoğunluğu 1000 kg/m<sup>3</sup>, kekin geçirgenliği  $k=7.5 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup> ve tesisdeki altı bölümden birisi daima temizleme periyodundadır. Gazın kinematik viskozitesi  $2 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, yoğunluğu 1 kg/m<sup>3</sup> olduğuna göre, bir saatte birim yüzeyde biriken kek miktarını ve filtredeki basınç kaybının ihmal edilmesi durumunda bu kekteki basınç kaybını bulunuz.

Çözüm: Filtredeki ortalama  $V_f$  hızı

$$V_f = \frac{Q}{A} = \frac{40}{(5)(112)(4)} = 0.018 \text{ m/s}$$

1 saatte birim filtre yüzeyinde biriken toz miktarı

$$\frac{m}{A} = C \cdot V_f \cdot m \cdot t = (30 \text{ g/m}^3)(0.018 \text{ m/s})(0.99)(3600 \text{ s/h}) = 1925 \text{ g/m}^2$$

$$\Delta x_{\text{kek}} = \frac{m/A}{\rho_{\text{kek}}} = \frac{1.925 \text{ kg/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3} = 1.925 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Bu kek kalınlığı için basınç kaybı, Denk. (6.1) yardımıyla

$$\Delta p_{\text{tek}} = V_i \Delta x_{\text{tek}} (v_p) / k =$$

$$(0.018 \text{ m/s}) (1.925 \times 10^{-3} \text{ m}) (2 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{s})$$

$$(1 \text{ kg/m}^3) (7.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2) = 924 \text{ Pa}$$

elde edilir.

## 6.2 HACİMSEL FİLTRELER

Bu tip filtrelerde tutulacak toz taneciklerinin çapı ile filtre edici cihazı oluşturan ortamın elyaf çapına bağlı olarak, filtrasyon mekanizmasına Şek. 6.4'te görüldüğü gibi; elek, atalet, yakalama ve difüzyon etkileri rol oynar (Özkaynak 1994). Tanecik çapının büyük olması durumunda; elek, atalet ve yakalama etkileri önem kazanırken, difüzyon etkisi azalır. Buna karşılık tanecik çapı küçüldüğünde de difüzyon etkisi ön plandadır. Belirli bir filtre yapısı ve belirli bir gaz hızı için, Şek. 6.5'te gösterildiği gibi, bu gaz içindeki taneciklerin çapına bağlı olarak bu dört etkinin sonucunda oluşan toplam filtre verimi bir minimumdan geçecek şekilde değişebilmektedir.

Elek etkisi, en basit filtrasyon mekanizması olup, iki elyaf iplikliği arasındaki açıklıktan daha büyük çaplı taneciklerin tutulması olayıdır (Şek. 6.4a). Bu mekanizmada çapları, filtre elemanı olarak kullanılan iki elyaf arasındaki açıklıktan daha büyük toz tanecikleri tutulur.

Atalet etkisi, akış içinde sürüklenen taneciklerin ceryan çizgilerini takip edemeyip, atalet kuvvetlerinin etkisi ile elyaf yüzeyine yapışmasıdır (Şek. 6.4b). Genel olarak bu tip bir akış halinde gazın hızı, toz taneciklerinin hızlarından daha büyük olduğundan Denk. (3.3) yardımı ile taneciğe etki eden direnç kuvveti

$$F_{y\text{-direnç}} = 3\pi\mu D (V_{y\text{-gaz}} - V_{y\text{-tan}}) \quad (6.3)$$

şeklinde yazılabilir. Atalet kuvveti ise

$$F_{y\text{-atalet}} = ma = \frac{\pi}{6} \rho D^3 \frac{dV_{y\text{-tan}}}{dt} \quad (6.4)$$

olduğundan, y-doğrultusundaki ivme için

$$\frac{dV_{y\text{-tan}}}{dt} = \frac{18\mu (V_{y\text{-gaz}} - V_{y\text{-tan}})}{\rho D^2} \quad (6.5)$$

elde edilebilir. Bu denklemin integrasyonu

$$\int \frac{dV_{y\text{-tan}}}{(V_{y\text{-gaz}} - V_{y\text{-tan}})} = \frac{18\mu\Delta t}{\rho D^2} \quad (6.6)$$

eşitliğini verir. Lif çapı  $D_{\text{lif}}$  alındığında, bu lif etrafından tozun geçme süresi  $\Delta t = D_{\text{lif}}/V$  olduğundan, bu son eşitlik

$$\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV_{y\text{-tan}}}{(V_{y\text{-gaz}} - V_{y\text{-tan}})} \propto \frac{18\mu D_{\text{lif}}}{\rho D^2 V} = \frac{1}{N_p} \quad (6.7)$$

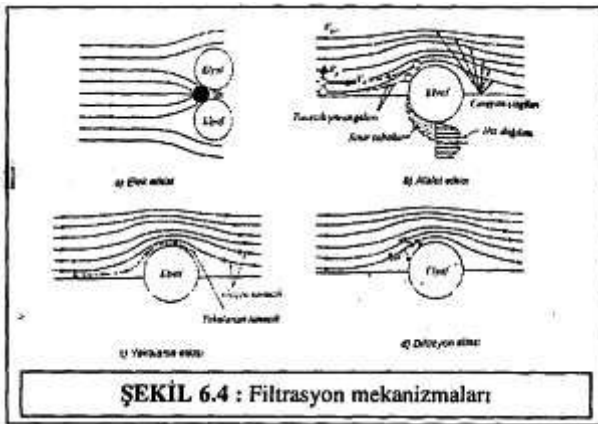
şekline gelir. Bu konudaki kaynaklarda,  $N_p$  ay. boyutsuz büyüklüğü, ayrılma sayısı veya atalet sayısı olarak adlandırılır, (de Nevers 1995).  $N_p$  sayısına göre, silindirik, küre ve şerit şeklindeki lif elemanlarında atalet etkisi ile tutulmalarındaki verim değişimleri Şek. 6.6'da verilmiştir. (Langmuir 1946).

	Max. sürekli çalışma sıcaklığı, °C	Aside karşı direnci	Alkaliye karşı direnci	Bükülme özelliği	Pamuğa göre fiyatı
Pamuk	82	zayıf	çok iyi	çok iyi	1,00
Yün	93	iyi	zayıf	orta/iyi	2,75
Nylon	93	zayıf	mükemmel	mükemmel	2,50
Nomex	200	orta	çok iyi	çok iyi	8,00
Akrilik	127	iyi	orta	iyi	3,00
Polipropilen	82	mükemmel	mükemmel	çok iyi	1,75
Poliyeten	62	mükemmel	mükemmel	çok iyi	2,00
Teflon	218	mükemmel	mükemmel	çok iyi	30,00
Cam elyafı	260	orta/iyi	orta/iyi	orta	5,00
Polyester	135	iyi	iyi	çok iyi	2,50
Selüloz	82	zayıf	iyi	iyi	-

Tablo 6.1: Yüzeysel filtreler ve bazı karakteristikleri (ASHRAE 1996).

D (µm)	N <sub>50</sub>	Şek.6.6 η <sub>st</sub>	Şek.2.1 v (m <sup>2</sup> /s)	η <sub>D+Y</sub>	η	η <sub>1</sub> sıra	η <sub>toplam</sub>		
							5 mm n = 100	25 mm n = 500	50 mm n=1000
0,1	0,006	0,01	60x10 <sup>-11</sup>	0,009	0,019	0,004	0,33	0,87	0,98
0,5	0,154	0,12	6x10 <sup>-11</sup>	0,008	0,128	0,0256	0,93	0,9999	1,0
1,0	0,617	0,47	2,8x10 <sup>-11</sup>	0,026	0,496	0,099	0,9999	1,0	1,0

Tablo 6.2: Örnek 2'ye ait sonuçlar



Yakalama etkisi, tanecik çapı çok küçük ise tanecik gaz ile beraber elyaf iplikçisi etrafında bir yörünge takip edebilir. Ancak bu yörünge, elyafa tanecik yarıçapından daha yakın bir yerden geçiyor ise, tanecik elyaf tarafından yakalanır. (Şek. 6.4c). Difüzyon etkisi ise, tanecik çaplarının 1 mm değerinden küçük olması durumunda, Brownien hareketleri sonucunda bu taneciklerin elyafa yapışması mekanizmasıdır (Şek. 6.4d). Yapılan teorik modeller ile bu iki etki halindeki verim eşitlikleri, birçok kaynakta

$$\eta_{D+Y} = \frac{6 \beta^{2/3}}{v^{1/3} D_{Bf} V^{1/3}} + \frac{3D^2 V^{1/2}}{v^{1/2} D_{Bf}^{3/2}} \quad (6.8)$$

eşitliği ile verilmektedir (de Nevers 1995). Bu eşitlikteki birinci terim difüzyon etkisini, ikinci terim ise yakalanma etkisini göstermektedir,  $\phi$  terimi ise toz taneciklerinin yayılımını göstermekte olup, bir gaz içinde asılı küresel tozlar için, Şek.2.1'den veya gazların kinetik teorisinden hareket edilerek

$$\phi = \frac{kTC}{3\pi\mu D} \quad (6.9)$$

eşitliğinden bulunabilir. Bu eşitlikte  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ kg.m}^2/\text{s}^2.\text{K}$  şeklinde Boltzman katsayısını,  $C = 1.16$  Cunningham düzeltme katsayısını,  $T$  (K) mutlak sıcaklığı,  $\mu$  (kg/m.s) gazın dinamik viskozitesini göstermektedir. **bakınız: 62**

Örnek 2: Liflerin eksenleri arasında  $50 \mu\text{m}$  mesafe bulunan,  $D_{\text{lif}} = 10 \mu\text{m}$  çapındaki silindirik liflerden yapılmış bir filtrede  $1, 0.5$  ve  $0.1 \mu\text{m}$  çaplarındaki tozlar tutulmak isteniyor. Gaz hızının  $1 \text{ m/s}$ , gaz dinamik viskozitesinin  $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ , gaz kinematik viskozitesinin  $\nu = 1.49 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , toz yoğunluğunun  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ , filtre kalınlığının  $5, 25$  ve  $50 \text{ mm}$  olması durumlarında her toz çapı için filtre verimlerini hesaplayınız.  $D = 1 \mu\text{m}$  çapındaki toz ve  $5 \text{ mm}$  kalınlığındaki filtre ortamı için hesaplar yapıldığında; Ayrılma katsayısı

$$N_{\text{at}} = \frac{\rho D^2 V}{18 \mu D_{\text{at}}} = \frac{(2000 \text{ kg/m}^3) (10^{-6} \text{ m})^2 (1 \text{ m/s})}{18 (1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}) (10^{-3} \text{ m})}$$

$$\approx 0.617$$

olduğundan, Şek. 6.6'dan  $\eta_{\text{at}} = 0.47$  bulunabilir. Şek.2.1'den bu çaptaki toza ait difüzyon katsayısı  $\phi = 2.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  olduğundan, Denk. (6.8)'deki değerler yerine konulursa

$$N_{\text{D+Y}} = \frac{6 (2.8 \times 10^{-11})^2}{(1.49 \times 10^{-5})^2 + (10^{-6})^2 + (1)^2} + \frac{3 (10^{-5})^2 (10)^2}{(1.49 \times 10^{-5})^2 + (10^{-6})^2} = 0.001 + 0.025 = 0.026$$

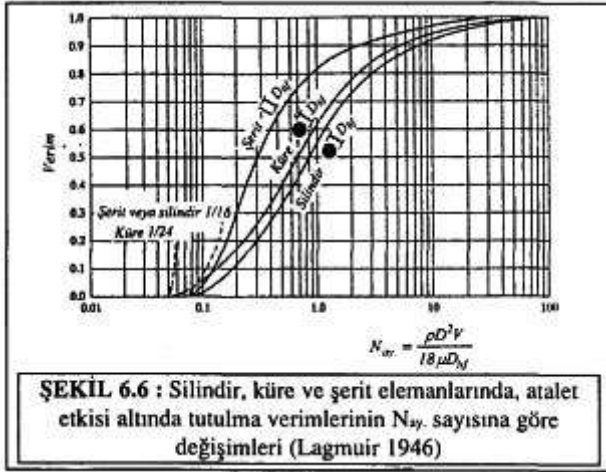
elde edilir. Atalet, difüzyon ve yakalanma verimleri toplamı

$\eta = \eta_{\text{at}} + \eta_{\text{D+Y}} = 0.47 + 0.026 = 0.496$  olur. Lif eksenleri arasında  $50 \mu\text{m}$  mesafe olduğundan iki lif arasındaki net toz tutma alanı  $10/50 = 0.2$  alınabilecektir. Bu durumda bir lif sırası için toz toplama verimi  $\eta_1 \text{ sıra} = 0.2\eta = 0.099$  bulunur. Arka arkaya liflerin toz toplama verimleri ise

$\eta_{\text{toplam}} = 1 - (1 - \eta_1 \text{ sıra}) \eta$  bağıntısı yardımı ile bulunabilir.  $5 \text{ mm}$  kalınlığındaki bir lifli ortamda, arka arkaya  $n = 5000/50 = 100$  lif olduğundan

$\eta_{\text{toplam}} = 1 - (1 - 0.099)^{100} = 0.9999 = \%99.99$  sonucuna ulaşılabilir.

Benzer hesaplar, farklı kalınlıklardaki lifli ortamlar ve farklı çaplardaki tozlar için yapılırsa Tablo 6.2'deki sonuçlar elde edilebilir.



## 7. ISLAK FİLTRELER

Bir gaz içinde bulunan tozların ıslatılarak bu gazdan uzaklaştırma işlemi uzun yıllardan beri uygulanan bir yöntemdir. Bu tip filtrelerde temizleme işlemi prensip olarak ağırlık etkisiyle oluşur. Basit bir siklon ile 5 mm çapından daha küçük taneciklerin tutulması çok güçtür. Daha küçük parçacıkların bulunduğu gaz ortamı, bir yıkama sıvısı içinden geçirilirse, bu parçacıkların kütleleri artacağından ağırlık etkisi ile kolayca tutulabilir. Pratikte yıkama sıvısı olarak genellikle su kullanılır. Bu prensibe göre çalışan bir sistemin şeması Şek. 7.1'de görülmektedir.

Islak filtrelerde toz tutma verimine etki eden belli başlı hususlar

- Sıvı damlacıkları ile toz tanelerinin birbirine göre hızları
- Tozların biçimi, büyüklüğü, gaz içindeki derişikliği ve sıvıyı emebilme özelliği
- Sıvı damlacıklarının büyüklükleri dağılımları şeklinde sıralanabilir.

### 7.1 ISLAK FİLTRELERDE TEORİK ESASLAR

Bu kısımda ıslak filtrelerin değişik düzenleme şekillerindeki toz tutma mekanizmasına ait teorik bilgiler verilmeye çalışılacaktır. İlk olarak yağmurlama sistemi ile durgun bir gaz hacmi içindeki tozların derişikliğinin azaltılma prensibi açıklanacak, daha sonra gaz ile sıvı damlacıklarının çapraz, ters ve paralel akışları halindeki durumlar incelenecektir.

#### Yağmurlama Sistemi ile Filtrasyon

Şek. 7.2'de görüldüğü gibi,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  ve  $\Delta z$  boyutlarındaki durgun bir gaz hacmi içinde  $c$  ( $gr/m^3$ ) derişikliğinde toz parçacıkları bulunsun. Bu hacim içinde  $D_d$  çapındaki bir sıvı damlacığı düşey doğrultuda aşağı doğru düşsün. Bu damlacığın düşerken süpürdüğü hacim

$$V_{\text{her damla}} = \frac{\pi}{4} D_d^3 \Delta z \quad (7.1)$$

olacaktır. Bu hacim bir lif gibi düşünülüğünde, Kısım 6.2'deki esaslar göz önüne alınır ise, bu sıvı damlacığının tuttuğu toz kütlesi

$$m_{\text{her damla}} = \frac{\pi}{4} D_d^3 \Delta z c \eta \quad (7.2)$$

eşitliğinden bulunabilir.  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  boyutlarındaki hacim içinde birim zamandaki damlacık sayısı  $ND$  ise, bu sayıdaki damlacıklar ile temasa gelen gazın içindeki toz derişikliğinin zamana bağlı değişimi için

$$\frac{dc}{dt} = \frac{(\pi/4) (D_p^3 \Delta z c \eta N_D)}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (7.3)$$

yazılabilir.  $Q_s$  (m<sup>3</sup>/s) birim zamandaki sıvı damlacıklarının hacmi olarak alınır ise, Denk (7.3)'ün yeniden düzenlenmesi ile

$$\frac{dc}{dt} = \frac{3}{2} \frac{c \eta Q_s}{D_p A} \quad (7.4)$$

elde edilebilir Bu eşitlikte  $A = \Delta x, \Delta y$  yatay alanı göstermektedir. Denk (7.4)'ün integrali ile belirli bir  $\Delta t$  zamanı sonunda bu hacimdeki derişiklik değeri için

$$c = c_0 \exp \left[ - \frac{3}{2} \frac{\eta Q_s}{D_p A} \Delta t \right] \quad (7.5)$$

bulunabilir (de Nerves 1995).

#### Çarpraz akımlı Islak Filtre

Şekil 7.3a'da görüldüğü gibi, QG hacimsel debisindeki gaz  $\Delta x \Delta y \Delta z$  hacmi içindeki gaz, sıvı damlacıklarına çarpraz olarak aksın. Gazın bu hacmi süpürme zamanı

$$\Delta t = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{Q_G}$$

olduğundan, bu değer Denk (7.5)'te yerine konular ise çarpraz akımlı ıslak filtre çıkışındaki derişiklik değeri

$$c = c_0 \exp \left[ - \frac{3}{2} \frac{\eta Q_s}{D_p A} \Delta z \right] \quad (7.6)$$

bulunur.



#### Ters ve Aynı Yönlü Akımlı Islak Filtreler

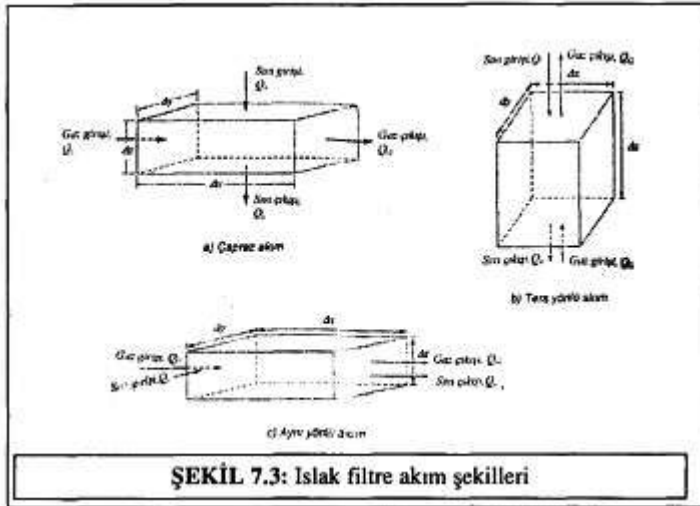
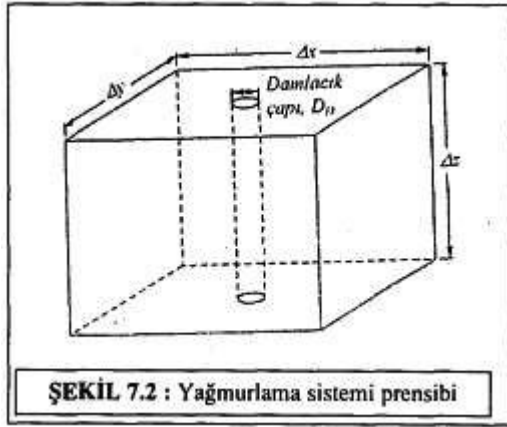
Şek. 7.3b ve 7.3c'de görülen ters ve aynı akımlı ıslak filtreler için, Noel de Nevers (1995) tarafından yapılan benzer teorik analizler sonucunda, filtre çukışındaki toz derişiklikleri için Ters akım için

$$c = c_0 \exp \left[ - \frac{3}{2} \frac{\eta Q_L V_G}{D_b Q_G V_G - V_G} \Delta x \right] \quad (7.7)$$

Aynı yönlü akım için

$$c = c_0 \exp \left[ - \frac{3}{2} \frac{\eta Q_L V_R}{D_b Q_G V_G - V_R} \Delta x \right] \quad (7.8)$$

bağlantılarını vermiştir. Bu bağıntılarda  $V_G$  toz çökme hızını,  $V_s$  gazın hızını,  $V_R$  ise gazın sıvı göre izafi hızını göstermektedir.

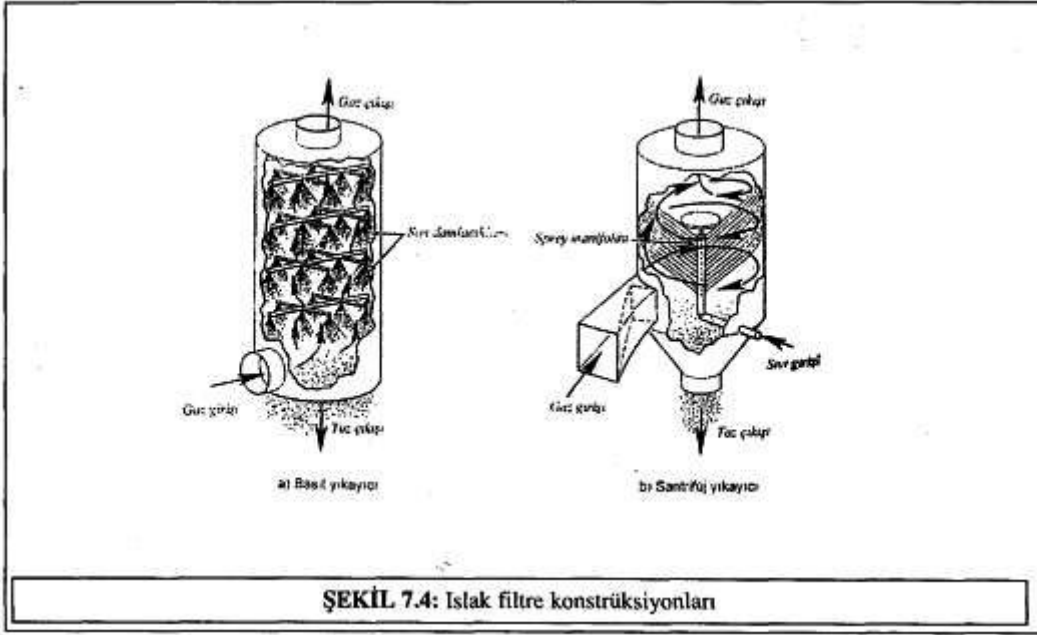


## 7.2 ISLAK FİLTRE TİPLERİ

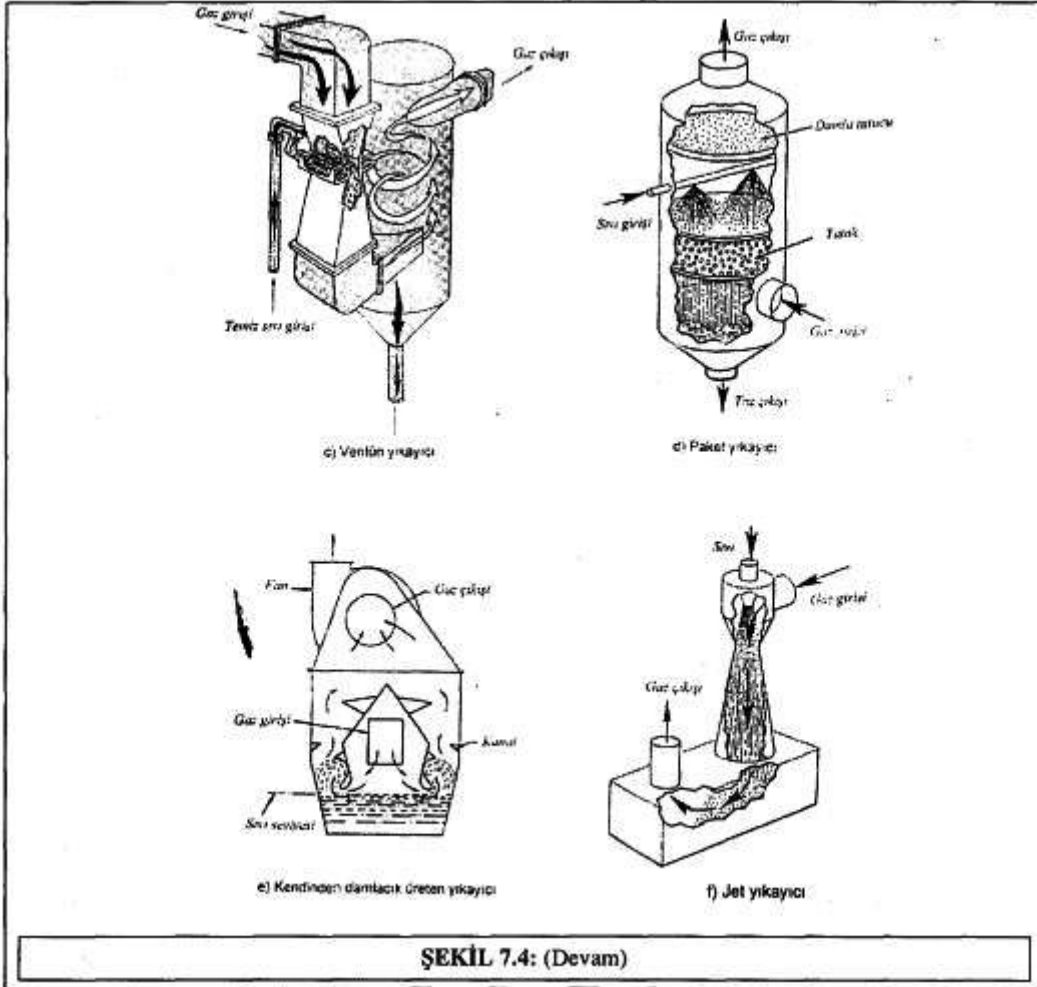
Pratikte basit yıkayıcı, girdaplı ve ventüri etkili olmak üzere çok değişik ıslak filtre tasarımları ile karşılaşılabilir. Bunlarda elektrofiltrelerdeki toz tutma verimlerine ulaşılabilir. Bu filtrelerde toz tutma işleminden başka, uygun püskürtme sıvıları kullanılarak kirletici gazların da tutulması sağlanabildiği gibi, gazların soğutulması da gerçekleştirilebilir. İlk yatırım maliyetleri az olmasına karşılık, yıkama sıvısının devri nedeniyle, ıslak filtrelerin işletme masrafları diğer filtrelerden daha fazladır. Islak filtrelerle ait bazı konstrüksiyonlar Şek. 7.4'te verilmiştir.

Basit yıkayıcılarda sıvı damlacıkları ile toz tanecikleri arasındaki hız farkı küçük olduğundan, teorik analizlere göre yüksek dereceden toz tutma verimi sağlanamaz. Girdaplı yıkayıcılarda değişken hızlar elde edilebildiğinden

verim bir miktar artabilir fakat bu durumda da basınç düşümü ve enerji sarfıyatı artar. Ventüri etkili ıslak filtrelerde büyük hız farkları nedeniyle oldukça yüksek toz tutma verimi elde edebilir.



ŞEKİL 7.4: Islak filtre konstrüksiyonları



ŞEKİL 7.4: (Devam)



## 8. SONUÇ

Çeşitli endüstri kollarının yaratmış olduğu hava kirliliği problemi, günümüzde ulusal ve uluslararası düzeyde, çeşitli kanun ve yönetmelikler ile kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Bu konuda mühendislere düşen en önemli görev, çevreyi kirlilemeyecek üretim tekniğinin seçilmesi ve üretim esnasında çıkan kirlileticilerin tutulmasıdır. Toz filtre seçiminde de genelde Tablo 4.1 ve 4.2'deki hususlara ilave olarak aşağıdaki noktalar da gözönünde tutulmalıdır.

- 1) Zift gibi yapışkan taneciklerin filtrasyonunda, ıslak filtreler veya yüzeyleri sürekli yıkanan siklon ve elektrofiltreler kullanılmalıdır.
- 2) Katı cıdarları iyi çekmeyen fakat birbirlerini iyi çeken tozlar halinde, teflon kaplı lifli filtreler kullanılmalıdır.
- 3) 5 µm çapından daha büyük yapışkan olmayan tozlar için en uygun filtre siklon filtreleridir.
- 4) 5 µm çapından daha küçük tozlar için elektrostatik ve ıslak filtreler uygundur.
- 5) Islak filtrelerin pompalama masrafları hesaplanmalıdır.
- 6) Tozların ve gazların korozif etkisi ve çığ noktası sıcaklığı düşünülmelidir.

## KAYNAKLAR

- (1) CGIH 1987. Air sampling instruments, 6th ed. American Conferance of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH.
- (2) Avcı, A. 1996. Siklon ayırıcılarında verim ve verime etkileyen bazı parametrelerin incelenmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 18, sayı:2.
- (3) ASHRAE 1989. Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE Standard 62-1989.
- (4) ASHRAE Handbook-Systems and Equipment 1996, Bölüm 25. 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, G A 30329.
- (5) ASHRAE Handbook-Fundamentals 1993, Bölüm 11. 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329., Türkçesi: T. Özkaynak, ASHRAE Temel El Kitabı, Bölüm 11, Ed. O.F. Genceli, TMD, Yayın No:2, 1997.
- (6) ASTM. 1983. Practice for continuous sizing and counting of airborne particles in dust-controlled areas using Instruments based upon light-scattering principles ASTM Standard F50-83.
- (7) de Nevers, N. 1995. Air Pollution Control Engineering. McGraw Hill, Inc.
- (8) Ensor, D.S., R. Hooper, R.W. Scheck, R.C. Carr, 1976. Performance and Engineering Evaluation of the Nucla Baghouse, in Symposium on Particulate Control in Energy Process, U.S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/7-76-010, U.S. Governmental Printing Office Washington, DC.
- (9) Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, 2 Kasım 1986.
- (10) İTÜ 1. Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Sempozyumu'93. Tebliğ Kitabı, İTÜ, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- (11) Kane, J.M., J.L. Alden, 1967. Design of industrial exchawst systems 4"1 ed. Industrial Press, New York.
- (12) Cavaseno, V. 1980. industrial Air Pollution Engineering, Chemical Enginering Publications Co., New York.
- (13) Lapple, C.E. 1967V Air Pollution Engr. Manual (J.A. Danielson, ed.), U.S. Dept. of Health, Education & Welfare, Public Health Service Pub., No 999-AP-40,p.95
- (14) Langmuir, L, K.B. Blodgett, 1946. A Mathemetical Investigâtion of Water Droplet Trojectories, U.S. Army Air Forces Technical Report No:5418.
- (15) Morrovv, P.E. 1964. Evaluation of inhalation hazards based upon the respirable dust concept and the philosophy and applicayion of selective sampling. AIHA Journal 25:213.
- (16) Olcay, T., N. İpekoğlu, 1991. Hava Kirliliği'nin Tanımı ve Temel Kavramları, Hava Kirliliği Kontrol ve Denetimi, TMMOB Kimya Müh. Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- (17) Olcay T. 1993. Hava Kirlenmesi Kontrolü ve Standartlar, TÜBİTAK, Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü, s. 79.

- (18) Özkaynak T. 1994. Temiz Oda Tasarımı ve Klima Sistemleri, Tetisan A.Ş. Teknik Yayınları.
- (19) Perry, H.R. 1984. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Sixth Ed. McGraw Hill Book Co. New York.
- (20) Petersen, C.M., K.T. Whitby, 1965. ASHRAE J., Vol. 7, No.5, p.42.
- (21) Rosin, P., E. Rammler, W. Intelmann, 1932. Grundlage und Grenzen der Zyklonentstrubung. VDI Vol. 76, pp. 433-437.
- (22) Scala, G.F. 1963. A new instrument for the continuous measurement of condensation nuclei. Analytical Chemistry 35(5):702.
- (23) Stairmand, C.J. 1951. Trans. Inst. Chem. Engr. Vol. 29, p. 356.
- (24) Svift, P. 1969. Steam Heating Engr. Vol. 38, p. 453.
- (25) TÜBİTAK, 1993. Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü, Der. M. Tırıs, E. Kalafatoğlu, H. Okutan, Marmara Ar. M. Kimya Müh. Ar. Böl., Gebze.
- (26) Whitby, K.T., A.B. Algren and R.C. Jordan. 1955. Size distribution and concentration of airborne dust. Heating, Piping and Air Conditioning 27:121.
- (27) Whitby, K.T., A.B. Algren and R.C. Jordan. 1957. The ASHRAE airborne dust survey. Heating. Piping and Air Conditioning 29 (11):185.

\*Bu makale III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir Kitabından alınmıştır.