

ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE BAĞA GAZLARININ  
SİKLONLARLA TEMİZLENMESİ VE SİKLOIN  
DİZAYN ŞEKİLLERİ

Belgin ÖZPAK

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman:Yrd.Doç.Dr.Yaşar PANCAR  
Makina Yük.Müh.

Şubat-1989

Anadolu Üniversitesi  
Merkez Kütüphane

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET .....   | iv           |
| SUMMARY .....  | v            |
| TEŞEKKÜR .....   | vi           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....  | vii          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                      | ix           |
| SİNGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                         | x            |
| 1. GİRİŞ .....   | 1            |
| 1.1. Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi .....    | 1            |
| 1.2. Hava Kirliliğinin Hayvanlar Üzerine Etkisi .....        | 3            |
| 1.3. Hava Kirliliğinin Bitkiler Üzerine Etkisi .....         | 4            |
| 1.4. Kirliliğin Çalışan Makinalar Üzerine Etkisi .....       | 4            |
| 1.5. Makinada Üretilen Kirletici Maddeler .....              | 6            |
| 1.6. Kirlenme ile İlgili Tanımlar .....                      | 7            |
| 2. KİRLİLİK LİMİTLERİ VE KİRLETİCİLERE AİT STANDARTLAR ..... | 8            |
| 2.1. Emisyon Faktörü .....                                   | 11           |
| 2.2. Standartlar .....                                       | 12           |
| 2.3. Parçacık Dinamiğinin Esasları .....                     | 16           |
| 2.4. Küre Etrafında Hareket ve Kürenin Direnci .....         | 18           |
| 2.5. Limit Çökelme Hızı .....                                | 19           |
| 2.6. Akışkan Parçacıklar .....                               | 21           |
| 3. HAVA KİRLENMESİNİN KONTROLÜ .....                         | 22           |
| 3.1. Toz Toplama Amaçları .....                              | 22           |
| 3.2. Partikül Kontrol Araçları .....                         | 23           |
| 3.3. Toz Kontrol Araçları Hakkında Kısa Bilgiler .....       | 23           |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 3.3.1. Ağırlık metodları .....                                       | 23           |
| 3.3.1.1. <u>Howard odası</u> .....                                   | 24           |
| 3.3.2. Atalet metodları .....  | 25           |
| 3.3.2.1. İlk kullanılan sınıflama araçları .....                     | 26           |
| 3.3.2.2. Modern araçların türleri .....                              | 26           |
| 3.3.2.3. Rotor kullanılmayan sınıflama araç-<br>ları .....           | 29           |
| 3.3.2.4. Siklonlar .....   | 32           |
| 3.3.2.5. Hidrosiklonlar .....  | 39           |
| 3.3.2.6. Sabit dalgalı ayırıcılar .....                              | 39           |
| 3.3.2.7. Aerodinamik temizleyiciler .....                            | 43           |
| 3.3.3. Filtreler ve ayırıcılar .....                                 | 45           |
| 3.3.4. Elektrostatik çöktürücüler .....                              | 50           |
| 3.3.5. Termal tutucular .....  | 51           |
| 3.3.6. Sonik tutucular .....   | 51           |
| 3.4. Hava Kalitesinin Kontrol Mekanizması .....                      | 52           |
| 3.5. Kontrol Araçlarının Uygulamada Durumu .....                     | 53           |
| 4. SIKLONLAR .....   | 55           |
| 4.1. Siklonlarda Ana Özellikler .....                                | 55           |
| 4.2. Siklonların Tasnifi .....                                       | 57           |
| 4.3. Siklonlarda Hava Akımının İncelenmesi .....                     | 58           |
| 4.4. Siklonlarda Benzerlik Teorisi .....                             | 62           |
| 4.4.1. Homojen akışkan hali .....                                    | 62           |
| 4.4.2. Akışkanın süspansiyon halinde parçacık<br>taşıması hali ..... | 63           |
| 4.5. Siklonlarda Basınç Kaybı .....                                  | 65           |
| 4.6. Deneysel Verimlilik Eğrileri .....                              | 73           |

## İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

|   |     |
|---|-----|
| 4.7. Siklonlarda Verim ve Yük Kayıplarını Etkileyen Faktörler .....           | 79  |
| 4.7.1. Siklonun boyutlarının etkisi .....                                     | 80  |
| 4.7.2. Koninin etkisi .....   | 80  |
| 4.7.3. Giriş dizaynının etkisi .....  | 80  |
| 4.7.4. Giriş kanalı ve çıkış kanalının etkisi ...                             | 82  |
| 4.7.5. Toz boşaltma dizaynı ve etkisi .....                                   | 83  |
| 4.7.6. Pürüzlülüğün etkisi .....  | 85  |
| 4.7.7. Debi hızın etkisi .....  | 85  |
| 4.7.8. Gazın fiziksel özelliklerine etkisi .....                              | 86  |
| 4.7.9. Toz parçacıkların özelliklerinin etkisi...                             | 87  |
| 4.7.10. Toz yükünün etkisi .....  | 87  |
| 4.7.11. Siklonlarda erozyon .....   | 88  |
| 4.7.12. Siklonlarda kirlenme .....  | 88  |
| 4.8. Siklon Seçimi .....  | 89  |
| 5. DENEYLER ve SONUÇLAR .....   | 93  |
| 5.1. Deneylerin Amacı .....   | 93  |
| 5.2. Deney Tesisatı .....   | 93  |
| 5.3. Deney Tesisatını Oluşturan Elemanlar .....                               | 95  |
| 5.3.1. Siklon .....   | 95  |
| 5.3.2. Diferansiyel manometre .....   | 95  |
| 5.3.3. Vantilatör .....   | 95  |
| 5.3.4. Termometre .....   | 97  |
| 5.3.5. Terazî .....   | 97  |
| 5.4. Deneyler .....   | 97  |
| 5.5. Sonuçlar .....   | 98  |
| 5.6. Siklonların Baca Gazı Temizleyicisi Olarak Kullanılmasının Tahlihi ..... | 102 |

## ÖZET

Bu çalışmada baca gazı emisyonu, filitrasyonu ve siklonlar hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir. Ayrıca, Anadolu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı`nda bir model siklon dizayn edilip, belli katı yakıtlar yakılarak kurum tutma çalışmaları yapılmıştır.

Hava kirliliği sebepleri, kirlilik boyutları, özellikle yakıtlar ve kirlenme kontrolü ile toz tutma metodları anlatılmıştır.

Siklonların özellikleri ve çeşitleri incelenmiş dizaynı yapılan siklon ile kurum tutma çalışmaları yapılmıştır.

## SUMMARY

In this work, detailed knowledge for stack gas emission, filtration and cyclones has been given. Beside these, model cyclone has been designed at The Hydraulic Laboratory of Anadolu University Engineering Faculty Mechanical Department and the certain amount of solid fuels burned out. Consequently, work on catching the carbon black had been worked out.

In the thesis, air pollution, amount of pollution, specially fuels and pollution control and methods for catching of dust had been searched out of in detail.

Then the characteristics and types of cyclones and catching the carbon black with model cyclone has been investigated.

## TEŞEKKÜR

Hava kirliliği ve temizleme metodları günlük yaşantımızda çok önemlidir.

Çalışma içeriğinde hava kirliliği ve hava kirliliğini önleme çalışmaları hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiş, bir model siklon seperatör dizayn edilerek imalatı gerçekleştirilip gerekli testler yapılmıştır.

Böyle bir çalışmayı bana ödev olarak veren, çalışmam süresince her türlü yardımında bulunan hocam Sayın Yrd.Doç.Dr.Makina Yük.Müh. Yaşar PANCAR'a, ayrıca değerli bilgilerinden faydalandığım hocam Sayın Prof.Dr.Nazmi ORUÇ'a ve Sayın Öğr.Gr.Dr.Ramazan UĞURLUBİLEK'e ve İmalat ve deneylerim sırasında yardımlarını esirgemeyen Hidrolik Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Dileğim, çalışmamın öngörülen amacına ulaşmasıdır.

Belgin ÖZPAK

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 3.1. Çökme odası .....   | 24           |
| 3.2. Howard odası .....  | 24           |
| 3.3. Sturtevant Whirtmind hava ayırıcısı .....   | 27           |
| 3.4. Ayrı bir ünite ile ince tane ayırıcılı sistem .....   | 27           |
| 3.5. Ayrı bir dış fan ve ince tane toplayıcılı hava sınıflan-<br>dırıcısı .....                          | 27           |
| 3.6. Polysius'un fan mili ile ayırıştırma yaptığı turbo ayı-<br>rıcısı .....                             | 27           |
| 3.7. Sturtevant'ın toz ayırıştırma şekli .....   | 30           |
| 3.8. Humbolt Wedag siklon hava sınıflandırıcısı .....  | 30           |
| 3.9. Alpine'in tortu geçişli zigzag sınıflandırıcısı .....   | 30           |
| 3.10. Iowa manufacturing şirketinin döner tanburlu sınıflan-<br>dırıcısı .....                           | 30           |
| 3.11. Hukki'nin döner hava çıkışlı santrifüj sınıflandırıcısı  | 31           |
| 3.12. General Electric Buell'in yer çekimi atalet sınıflan-<br>dırıcısı .....                            | 31           |
| 3.13. Hardinge'in genellikle dönen hava akışlı olarak kullanı-<br>lan çift konili sınıflandırıcısı ..... | 31           |
| 3.14. (a) Siklon ayırıcı şematik gösterimi .....   | 33           |
| (b) Çoklu siklon ayırıcı .....   | 33           |
| 3.15. Değişik tip siklonlar için parçacık boyut oranı ile<br>fraksiyonel toplama verimi .....            | 34           |
| 3.16. % toplama verimi = f(partikül boyut oranı) eğrisi.....   | 36           |
| 3.17. Dinamik çöktürücülerin şematik gösterimi .....   | 40           |
| 3.18. Krebs siklonu .....  | 40           |
| 3.19. Basit sabit dalgalı ayırıcı .....  | 44           |
| 3.20. Besleme hatlı sabit dalgalı ayırıcı .....  | 44           |
| 3.21. Kanatlı hava temizleyici .....   | 46           |
| 3.22. Kanat hücreli temizleyici .....  | 46           |
| 3.23. Basıncılı kanatlı sistem .....   | 46           |
| 3.24. Basıncılı kanatlı sistem .....   | 46           |
| 3.25. Havada bulunabilecek kirleticilerin boyutları .....  | 48           |



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 3.26. Basit tip elektrostatik göktürücü şemaları .....   | 51           |
| 3.27. Basit termal toz tutucu .....  | 52           |
| 3.28. Kaynak emisyonun atmosferde etkisi ve etki mesafesine<br>ait şema .....  | 53           |
| 3.29. Hava kalitesi kontrol mekanizması şeması .....   | 53           |
| 4.1. Siklonun şematik olarak gösterilişi .....   | 56           |
| 4.2. Yapılarına göre siklonlar .....   | 57           |
| 4.3. Siklonlarda gaz akımı ve ikincil akımlar .....  | 58           |
| 4.4. Siklon içinde oluşan akımda basınç ve hız dağılımı...   | 60           |
| 4.5. Siklon verimlilik eğrileri örnekleri .....  | 76           |
| 4.6. Siklonlarda teğetsel giriş tipleri .....  | 81           |
| 4.7. Çıkış borusu ve kutusu dizaynı örnekleri .....  | 82           |
| 4.8. Toz boşaltma sistemleri.....  | 84           |
| 4.9. Vidalı konveyörlü toz boşaltma örneği .....   | 84           |
| 4.10. Siklon hesaplarında kullanılan nomogram .....  | 91           |
| 5.1. Siklon seperatörün resimleri .....  | 94           |
| 5.2. Deneyde kullanılan tipik siklon .....   | 96           |
| 5.3. Siklon üst kapağı ve duman bağlantısı resmi .....   | 95           |
| 5.4. Siklonun kanatlı üst kapağının resmi .....  | 100          |
| 5.5. Kanatlı üst kapağın önden görünüşü .....  | 100          |
| 5.6. Kanatçıkları çıkartılan üst kapak resmi .....   | 101          |
| 5.7. Toz engelleyicinin görünüşü .....   | 101          |
| 5.8. Isıl yüke bağlı olarak parçacık emisyonu standartları   | 105          |
| 5.9. Değişik kömür kalitesi ve emisyon oranı için ünitenin<br>ısı yüküne göre standartları gerçekleşmesi için gerek-<br>li verim ..... | 106          |

## TABLOLAR DİZİNİ

SayfaTablo

|   |     |
|---|-----|
| 1.1. Tipik kirlilik boyut aralıkları .....  | 5   |
| 2.1. Kül analizi sonucu elde edilebilecek başlıca elementler..  | 10  |
| 2.2. Tipik bir ocak emisyonu analizinde elde edilebilecek uçucu kül bileşenleri ve yüzde oranları .....         | 10  |
| 2.3. Kömür yakıtlar için kontrol aygıtı olmadığı haldeki emisyon .....  | 11  |
| 2.4. Giriş hızı yüküne bağlı MEK standartları .....   | 12  |
| 2.5. Genel amaçlar için MEK standartları .....  | 13  |
| 2.6. Çeşitli ülkelerde uygulanan MEK standartları .....   | 14  |
| 2.7. Çeşitli ülkelerde uygulanan MİK standartları .....   | 15  |
| 3.1. Hava sınıflandırıcıları .....  | 28  |
| 3.2. Siklon toplama verimleri .....   | 34  |
| 3.3. Siklonların ve hidrosiklonların uygulama alanları .....  | 41  |
| 3.4. Uygulamada kontrol araçları .....  | 54  |
| 4.1. Sabit verimde bazı değişkenlerdeki değişe karşı diğer değişkenlerde üs olarak değişime örnekler .....      | 65  |
| 4.2. $\phi = u_E/v_E$ değerleri .....   | 69  |
| 4.3. Teğetsel girişli ve silindirik çıkış kanallı siklonlar...  | 73  |
| 4.4. Siklon boyut oranları .....  | 77  |
| 4.5. $Z_E$ ve $\zeta_L$ 'nin hesaplanmış değerleri ve deneysel karşılaştırılması .....                          | 78  |
| 4.6. Pürüzlülüğün verime etkisi .....   | 85  |
| 4.7. Toz yükü ve hızın erozyon etkisi .....   | 88  |
| 5.1. Yapılan deneylerin verileri .....  | 99  |
| 5.2. Kömür kalitesinin parçacık emisyonu ve gerekli verime etkisi .....   | 103 |
| 5.3. Tipik siklonlarla değişik kritik çaplarda değişik ateşleme sistemlerinden elde edilebilecek verimler ..... | 104 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklamalar</u>  |
|-----------------|---|
| A               | Kömürdeki kül oranı, kesit alanı $m^2$  |
| $A_f$           | Siklonun ortalama yüzey alanı $m^2$   |
| B               | Gerekli kömür ihtiyacı kg/h   |
| C               | Konsantrasyon veya toz yükü $g/m^3$   |
| $C_f$           | Sürtünme sabiti   |
| $D_1$           | Siklon gövde çapı m   |
| $D_2$           | Siklon çıkış borusu çapı m  |
| $D_3$           | Siklon koni ucu çapı m  |
| $D_E$           | Siklon giriş kanalı ortalama çapı m   |
| E               | Verim   |
| $E_s$           | Verim   |
| $E_f$           | Fraksiyonel verim   |
| $E_T$           | Toplam verim  |
| F               | Kuvvet  |
| G               | İvme $m/s^2$  |
| H               | Siklon çıkış borusunun konik cidarı kesinceye kadar uzatılması ile oluşan hayali borunun uzunluğu m |
| K               | Emisyon faktörü kg/ton, Barth   |
| $K_b$           | Basınç kayıp katsayısı  |
| $K_L$           | Yük kayıp katsayısı   |
| $K_u$           | Emisyon oranı kg uçucu kül / kg yakıt   |
| L               | Parçacık çökme derinliği m, siklon boyu m, uzunluk m  |
| M               | Masraf TL/ay  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklamalar</u>   |
|-----------------|--|
| N               | Konsantrasyon $g/m^3$ , Birim hacim için gerekli güç $kw/m^3$<br>Güç kw, |
| P               | Basınç $N/m^2$   |
| $P_v$           | Emme gücü $N/m^2$ veya mmHg  |
| P               | Basınç   |
| P               | Temiz hava halinde basınç kaybı $N/m^2$ veya mmSS                        |
| $R_h$           | Gerçek hidrometre değeri   |
| S               | Emisyon standardı kg/h, Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı     |
| T               | Sıcaklık $^{\circ}C$ , Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı      |
| V               | Hız m/s  |
| $V_T$           | Teğetsel hız m/s   |
| $V_l$           | $D_l$ çapına göre serbest vorteks kanunundan hesaplanan hız<br>m/s       |
| Z               | Isıl yük kcal/h  |
| $Z_D, Z_E, Z_O$ | Basınç düşümü  |
| Q               | Debi $m^3/s$ , ısı yükü kcal/h   |
| W               | Numune ağırlığı kg veya g  |
| X               | Alınan yol veya genişlik m, Deneysel bir sabit                           |
| $\theta$        | Açı radyan veya derece   |
| a               | Siklona giriş (kanalı) genişliği m                                       |
| b               | Siklona giriş (kanalı) yüksekliği m                                      |
| c               | Siklonun silindirik kısmının boyu m                                      |
| d               | Parçacık çapı m veya mikron  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklamalar</u>   |
|-----------------|--|
| g               | Yerçekimi ivmesi $m/s^2$                                       |
| h               | Siklonun çıkış borusunun siklon içinde kalan kısmın uzunluğu m |
| $k_1$           | Yoğunluk düzeltme faktörü, bir sabit                           |
| m               | Kütle kg   |
| n               | Girdap dönme sayısı  |
| r               | Yarı çap m   |
| t               | Süre, zaman s  |
| $\alpha$        | Sabit = $V_g \cdot r_E / V_l \cdot r_l$                        |
| $\beta$         | $V \cdot r = k$ eşitliğindeki sabit                            |
| E               | Basınç kayıp katsayısı çarpanı                                 |
| $\nu$           | Kinematik viskozite $m^2/s$                                    |
| $\mu$           | Dinamik viskozite $Ns/m^2$                                     |
| $\rho$          | Gaz yoğunluğu $kg/m^3$   |
| $\rho_p$        | Parçacık yoğunluğu $kg/m^3$                                    |
| $\xi$           | Yük kayıpları $N/m^2$ veya mmSS                                |
| $\tau$          | Parçacık atalet zaman sabiti $=m/3$ $d_p = v_c/g(s)$           |
| $\eta$          | Gaz viskozitesi ( $Ns/m^2$ )                                   |
| $\phi$          | $u_E/v_E$  |

İndisler

|     |                                 |
|-----|---------------------------------|
| a,b | İlk ve son şartlar ve a, atalet |
| g   | Giriş                           |
| ç   | Çıkış                           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>İndisler</u> | <u>Açıklamalar</u>            |
|-----------------|-------------------------------|
| k               | Kritik                        |
| L               | Limit                         |
| m               | Effektif ortalama             |
| o               | Çıkış, düzeltilmiş ortalama   |
| s               | Sürtünme                      |
|                 | Bağıntı ve kaynak<br>numarası |

| <u>Kisaltmalar</u> | <u>Açıklamalar</u>                        |
|--------------------|---|
| MAK                | Maksimum işyeri atmosferi konsantrasyonu  |
| MEK                | Maksimum emisyon konsantrasyonu           |
| MİK                | Maksimum çevre atmosferi konsantrasyonu   |
| ASME               | American Society of Mecanical Engineers   |
| ASTM               | American Society of Testing and Materials |

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel tesisler atmosferi kirletmeleri dolayısıyla hastalık sayısını arttırmaktadır. Tozların neden olduğu hastalıkların çoğu solunumla vücuda geçer. Fakat kanser türleri ve deri iltihabı, kirleticilerle direk temas yoluyla geçebilir. Patlama sonucu oluşup, ortamda bulunan toz halindeki parçacıklar, parçacıkları oluşturan kütle halindeki kaynak maddeden kimyasal olarak daha zararlıdır.

Hava kirliliği, şimdi çevre mühendisliğinin önemli bir dalı olarak kabul edilmektedir. Zararlı emisyonlardan kırsal kesimi ve halkı korumak için tüm gelişmiş ülkeler kanunlarla kirliliği azaltma çalışmalarını yapmaktadırlar. Hemen hemen her endüstri; kendi makro parçacıklarına ve gazla ilgili problemlere sahiptir.

Erken ölümleri önlemek için endüstriyel kirlilikleri ve hava kirliliklerini kendi tedbirlerimizle ve doğru kararlar vererek önlemeye çalışmak zorundayız. Hastalıklar ve ölümler artıp, binalar ve bitkiler zarar görmeye başladığı anda bunların bedelleri daha yüksek olur. Hatta hava kirliliğini meydana getiren maddelerden kurtulmak mümkün değildir. Kirliliğin belli derecesi kabul edilmek zorundadır. Hava kirliliğine neden olan kaynaklara sahip endüstriyel tesisler çok nüfuslu alanlardan uzak kurulmalıdır. Veya uzun bacalar kullanılmalıdır.

Yakın zamanda atom enerjisi, biokimyasal enerji ve elektronik endüstrilerinde mühendislik çalışmalarını hızla geliştirmekte olup, gelecek birkaç yıl içinde daha belirgin gelişmeler görülebilecektir.

### 1.1. Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi

Çevresel bir faktör olan soluduğumuz hava bazı şartlar altında hastalıklara sebep olmaktadır. Fakat bunun kesin tesbiti günümüze kadar mümkün değildir. Soluduğumuz hava ile birlikte aldığımız gazlar ve aerosollerin bazı zehirlenmelere, allerjik hastalıklara, hava yoluyla bulaşan bakteriyel ve viral enfeksiyonlara sebep olduğu ispatlanmıştır(World Health Organization, 1961).

Havayı kirleticilere örnek olarak sülfürdioksit, karbonmonoksit, azotoksit, azotdioksit, is verilebilir. Bunları sırasıyla inceleyecek olursak;

a) Sülfürdioksit:

Fosil esaslı yakıtların kullanıldığı kentsel bölgelerde havada sülfürdioksit gazı bulunur. Temel ısı ve güç kaynağı olan fuel-oillerin ve kömürlerin (özellikle düşük kalorili kömürlerin) kullanıldığı yerlerde havada ölçülebilir miktarda sülfürdioksit gazı mevcuttur. Doğal gaz ve çok düşük oranda sülfür içeren fuel-oiller ve bunların ürünlerinin ana yakıt maddesi olarak kullanıldığı bölgelerde havada sülfürdioksit oluşumu daha az oranlardadır.

Havadaki sülfürdioksit konsantrasyonunun daha düşük olduğu nadir durumlarda bile hayvanların ve insanların sülfürdioksit solumaları sonucu düzgün ve yumuşak olan bronş kaslarının geçici olarak spazmına neden olduğu görülmüştür. Bir dereceye kadar yüksek konsantrasyonlar üst solunum yollarının iç çeperlerinde müküs (balgam)ün artmasına neden olur. Yüksek konsantrasyonlar ise epitel yüzeyinde pul pul dökülmeler gibi değişik mukozal tahrişlere neden olur. Sülfürdioksitin tahriş edici etkileri, özellikle bronş spazmı, soğuk havalarda daha şiddetlidir.

Bu gaza uzun süreli maruz kalındığında az çok bağımsızlık kazanılabilir. Anderson'un 1950 yılında yaptığı bazı araştırmaların sonucuna göre; aralıklı veya sürekli olarak sülfürdioksitli ortamda çalışan endüstriyel işçilerde de benzer direnç tesbit edilmiştir (World Health Organization, 1961). Handerson ve Haggard'ın 1943 yılında yaptıkları araştırmada ise bronş çeperlerindeki balgamın artarak epitel dokunun korunması vücudun bu gaza karşı direncinin artışı gösteren bir örnektir (World Health Organization, 1961). Aşırı hassasiyet ve allerji yönünden insanlar için kabul edilebilecek maksimum miktarın ne olabileceği tam olarak açıklanamamıştır.

Havadaki sülfürdioksit gazı belirli şartlar altında oksitle birleşerek sülfürtrioksit gazına dönüşür. Sülfürtrioksit gazı sülfürdioksit gazından daha tahriş edicidir. Hava içinde bazı katalitik metalik bileşenlerin ve güneş enerjisinin uygun olduğu bölgelerde  $SO_2$  ve/veya  $SO_3$  su buharı ile karşılaşılırsa önce sülfürler sonra sülfürikasit oluşur. Ellis'in 1961 yılında yaptığı araştırmalarda; bazı kentsel bölgelerde sisli havalarda, havadaki sülfürdioksit miktarına bağlı olarak ölçülebilir miktarda sülfürtrioksit varlığı tesbit edilmiştir. İnsan-



larda ve hayvanlarda gözlenen sülfürtrioksitin solunması deneylerinde, nisbeten düşük konsantrasyonlarda bile bronş spazmına neden olduğu ve sülfürdioksitten daha kuvvetli tahriş edici etkisi olduğu gözlenmiştir (World Health Organization, 1961).

b) Karbonmonoksit:

Karbonun tam olmayan yanması sonucunda oluşan kokusuz CO gazı oksijenden 200 kere daha kuvvetle hemoglobine bağlandığı için havada % 0,1 lik yoğunlukta dahi öldürücüdür. Havagazı, mangal ve maden kömürü, ekzos boruları en önemli CO kaynaklarıdır. Ağır bir gaz olduğu için alçakta toplanır. Yerde veya otomobilin zemininde yatan biri veya bir hayvan daha çabuk zehirlenir (Abaoğlu ve Aleksanyan, 1971).

c) Azotoksit:

Sis bulutu teşekkülüne yol açan bileşenlerden biridir. Hemoglobine birleşme eğilimi yüksek olduğundan kandaki konsantrasyonu yükselterek zehirlenmeye neden olur.

d) Azotdioksit:

Ciğerlerde nem ile birlikte  $\text{HNO}_3$  teşekkül ettirir ve akciğer ödemi sebep olur. Bitkilerde ise büyüme gecikmesi ve yaprak beyazlaşmasına sebep olur.

e) İS:

Tahriş etkisine sahiptir. Diğer tahriş maddeleri asit ve aldehitlerde olduğu gibi solunum organlarını kaplayan salgıda gözünür ve ince parçacıklara ayrılır. Bu şekilde rahatlıkla solunum yollarında ilerleyebilir. Sonuç olarak kronik bronşit, astım ve doku altı arazlarına yol açar. Bitkilerin alt yüzeyi bronzlaşır ve büyümeleri gecikir (Avca, 1985).

## 1.2. Hava Kirliliğinin Hayvanlar Üzerindeki Etkileri

Hava kirliliğinin hayvanlar üzerindeki etkileri genellikle doğal olarak, insan sağlığı üzerindeki etkisine paralel gelişmiştir. Yapılan çalışmalarda, bilinen kirlilik çeşitlerinin nitelikleri hazırlanmış, deneysel metodlarla hayvanlar üzerinde açığa çıkarılmıştır. Böyle bilgiler insan üzerindeki etkileri tanımlamaya yardımcı olacaktır. Bundan başka, hayvan hastalık ve ölüm oranını takip eden hava kirlili-

ği felaketleri kaydedilmiştir.

Hava kirliliğinin hayvanlar üzerinde zararlı etkileri olduğu, önemli ekonomik zararlardan dolayı, bu tehlikeye karşı, bir kaç kez birleşilmek istenmiştir. Bu ilgi, havada uçan floridlerle meydana gelen probleme bağlı olan araştırmayla anlaşılmıştır (Fluorür:çift bileşikli non- metalik bir elementtir. Diş çürümelerini önlemek için kullanılıyor).

Geçen on yıl zarfında, hava kirliliğinin insan ve hayvanlar üzerindeki tehditi aşırı bir şekilde gelişti. Fluorüdeğinen raporlar istisna, hastalık nedeni olarak hava kirliliğinin, veteriner literatüründe bulunduğu azda olsa görülmektedir. Son zamanlarda geçitli hava kirliliklerinde küçük hayvanların deneysel bulgular sonucu, tıbbi araştırma laboratuvarları tarafından tanımlanan hayli bilgi rapor edilmiştir. Hava kirliliğine yeni bir kategori olarak, nükleer bölünmenin atomik gücü ilave edildi (World Health Organization, 1961).

### 1.3. Hava Kirliliğinin Bitkiler Üzerine Etkisi

Tarımı ilgilendiren başlıca üç önemli hava kirliliği vardır. Bunlar sırasıyla; sülfürdioksit, fluor bileşenleri ve dumanlı sistir. Sonucusu, kısmen bilinen karmaşık bir karışımdır. Dumanlı sisin, en azından, farklı iki tipi vardır. Birincisi, sülfürdioksitli ve kömür dumanı karışımı olan tipidir. İkincisi, yüksek oksitli olan tipidir. Bu ne sis nede kömür ihtiva eder. Fakat tam tersine bir ozon karışımı, nitrojen oksitleri arasında fotokimyasal reaksiyonlar tarafından biçimlenen peroksitli ( $H_2O_2$ ) bileşikler ve kısmen yanmış yakıt veya benzin buharları gibi zararsız organik bileşiklerdir. Dumanlı sisin bu iki tipine ilaveten, etilen ve DDT gibi organik bileşikler bitkilere hatırı sayılır şekilde zarar verirler (World Health Organization, 1961).

### 1.4. Kirliliğin Çalışan Makinalar Üzerindeki Etkisi

Hava ile alışverişte bulunan makinalarda ana faktör kullanıldığı hava içinde bulunan katı maddelerin gerçek ağırlığıdır Tablo 1.1. Otomobil motorunda, silindirde yanan her 4,3 lt petrol için 42,5 m<sup>3</sup> civarında hava kullanılır. Böylece bir araba motoru ortalama yılda 28317 ile 56634 m<sup>3</sup> arasında hava alıp verir. Havanın filitre edilmediği hal-

lerde, ağır makinelerde muhtemelen bir çok aşındırıcı maddeler içeren katı parçacıklar motora emilir. Büyük makinelerde durum daha vahimdir. O zaman büyük bir hava kompresörü eğer emiş ağzına filitre takılmazsa haftada 4520 gr ya da daha fazla miktarlarda katı parça emer (Doğaner, 1977).

Emilen katı maddeler pistonlarda, silindir kafasında, süpablarda ve diğer iş elemanlarında böyle yüzeylerde normal olarak zaten var olan yağ filminin de yapıştırıcı etkisi ile birikirler ve yağ filmi aşındırıcı maddeleri toplar. Yağ buharı ile temasa geçen ince partiküller havadan alınıp yağlayıcıda toplanır.

Tablo 1.1. Tipik makinelerin kullandığı havada yer alan tozların ağırlığı (Warring, 1981).

| Ortam                                      | Toz konsantrasyonu<br>$\text{g}/10^3 \text{m}^3$ | İçten yanmalı motorlarda<br>$\text{g}/10^3 \text{m}^3$ | Büyük hava kompresörlerinde emilen toz<br>$\text{g}/10^6 \text{m}^3$ |
|--|--|--|--|
| Temiz hava                                 | 0.0228'den az                                    |  |  |
| Kır ve deniz kıyısı havası                 | 2.2886'dan az                                    |  |  |
|  | 2.2886   | 4.805  | 24.028   |
| Kasaba havası                              | 4.5772   | 9.611  | 48.056   |
| Küçük endüstriyel kasabalar                | 6.8658   | 14.411   | 72.084   |
| Endüstriyel kasabalar                      | 9.1544   | 19.222   | 96.112   |
|  | 11.443   | 24.028   | 120.14   |
|  | 13.7316  | 28.833   | 144.168  |
| Yoğun endüstriyel alanlar                  | 16.02  | 33.639   | 168.196  |
|  | 18.308   | 38.445   | 192.225  |
|  | 20.597   | 43.251   | 216.253  |
|  | 22.886   | 48.056   | 240.281  |
|  | 45.772   | 96.113   | 480.562  |
| Havası çok kirli endüstriyel atmosferlerde | 68.658   | 144.168  | 720.844  |

Bir filitre nin amacı, zararlı olduğu açık olan hava içindeki kati parçacıkların emilmesini engellenektir. Fakat bunun, uygun yeterli boyut esasına dayanan belli bir fedakarlıklık noktası olmalıdır. Ağırı ince filitreleme gereksiz maliyet artışına, emilen havanın daha da azalmasına ve daha çabuk tıkanmaya yol açacaktır. Diğer yandan boyutlar makinadaki orifis çapları ya da en küçük tolerans alanlarına uygun olmalıdır. Ancak bu şartlarda hiç bir partikülün tıkanma, aşındırma ve sıkışmaya yol açacak kadar büyük olmadığından emin olabılıriz.

Bir çok makinada, kirletici maddelerin yoğunluğunun ancak 20  $\mu$ m ve yukarıda zararlıdır. O zaman bu mertebelerde yapılacak filitreleme yeterli bir koruma sağlayacaktır. Yine de 10 ile 20  $\mu$ m arasındaki partiküller oldukça ince boşluklarda zarar verici olabilir ve genel olarak korumayı bu değerlere kadar indirmek tercih edilir. Çünkü bu değerler çok yaygın kullanılan hava filitrelerinin gelişmiş türleri ile kolayca yapılabilir.

Atmosferik havanın filtrasyonu ihtiyacı çalışma şartları ve uygulamanın özelliklerine bağlıdır. Kir havasında çalışan küçük bir makina için bir hava filitresi pekala yeterli olabilir. Fakat ağır endüstriyel alanlarda aynı makina çok daha etkin korunmaya ihtiyaç gösterir.

## 1.5. Makinada Üretilen Kirletici Maddeler

Doğal olarak tüm makinalar ve tahrik sistemleri, atılmadıkları takdirde, zararlı olabilecek kirletici maddeler üretirler. Aşınma ürünleri makina yeni ve çalışır durumda iken maksimum konsantrasyonundadır. Bu periyotlarda ayrıca başka kirletici mesela, döküm kumu gibi maddelerin olması da oldukça mümkündür.

Bu alanlarda koruma işle mi konveksiyonel filitrelemeyle yapılabilir ve bazen buna, ferritik partiküllerin toplanması için manyetik tapan ya da manyetik filitreler eklenir. O zaman aşınma ürünleri azalır ve korrozyon veya erozyon-korrozyon önem kazanır.

Genel olarak makina içinde oluşan kirletici maddelerle ilgili filtrasyon ihtiyaçları, esas itibariyle bazı makinalarda önem kazanır. Mesela, içten yanmalı motorlar, hidrolik sistemler ve tolerans-

ların etkin olduğu makinalar gibi.

## 1.6. Kirlenme İle İlgili Tanımlar

Kirlenme olayının anlaşılabilmesi için bazı kavramların bilinmesi gerekir. Olayların daha iyi kavranabilmesi için bilinmesi gereken tanımlar sırasıyla;

### a) Kirletici Bileşen:

Su buharı hariç havanın tabii terkiibinde bulunmayan her cins maddedir.

### b) Emisyon:

Bir kaynağın çıkış şartlarında havaya atılan katı, sıvı ve gaz kirleticilerin toplamıdır ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Gaz ve egzost yoğunluğu olarak verilir.

### c) İmisyon:

Bilhassa yeryüzüne yakın kısımlarda başka maddelerle temas etkili olabilen ve mevcut hava şartlarında ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) veya zaman ve parçacık sayısı /  $\text{m}^3$  olarak ölçülebilen kirleticilerin toplamıdır.

### d) İverziyon:

Atmosferde az veya çok kalın bir tabaka içerisinde sıcaklığın yükseklikle azalmaya başlamasının tersine sıcaklığın artması veya sabit kalması halidir.

Atmosfere atılan kirletici bileşen konsantrasyonları üç ayrı merkezde ölçülebilir;

1. Kirletici üreten kaynağın egzost veya bacasında,
2. İş yeri, büro ve mesken ortamında,
3. Çevre havasında.

Bu yerlerde ölçülen kirletici konsantrasyonlarının maksimum değerleri aşağıda izah edildiği şekilde tanımlanabilir.

### 1. MEK Değeri:

Maksimum Emisyon Konsantrasyonu demektir. Kirletici kaynağın egzost veya bacasındaki konsantrasyonu gösterir. Konsantrasyon bi-

rimi olarak gazlar için ppm (milyonda bir) , ppb (milyarda bir) ve toz, duman, sis gibi maddeler için  $mg/m^3$ ,  $\mu g/m^3$ , kg/ton yakıt, kg/kcal olarak tanımlanır.

## 2. MAK Değeri:

Maksimum İşyeri Konsantrasyonu demektir. İşyerinde, büro, mesken gibi yerlerde sağhate zarar vermeyecek gaz, buhar ve toz zerrecikleri konsantrasyonudur. Genellikle günlük (8 saat) tanımlanır.

20°C ve 760 mmHg şartlarında tariflenen MAK değerleri gaz ve buhar için ppm, toz ve süspansiyonlar için  $mg/m^3$  veya  $\mu g/m^3$  olarak verilir.

## 3. MİK Değeri:

Maksimum İmisyon Konsantrasyonu demektir. Atmosferin yeryüzüne yakın bölgelerinde insan, bitki ve hayvan gibi canlı ve cansız maddelerle teması olabilen ve bulunması halinde zarar vermediği kabul edilen çevre havası miktarıdır.

MİK değerleri genellikle gazlar için 30 dakikalık ölçmeler olarak verilir. Devamlı veya yıllık ortalama için MİK, MAK değerinin 1/5'i mertebesinde ve kısa süreler için ise MİK değerinin 3 katı değer alınabilir.

## 2. KİRLİLİK LİMİTLERİ VE KİRLİTİCİLERE AİT STANDARTLAR

Birçok kirletici kaynaklar ve bunların ürettiği farklı birçok kirletici bileşenleri bulunmaktadır. Bu kirletici kaynaklardan biride fosil yakıtların kullanımı ile oluşmaktadır. Fosil yakıtların geniş kullanım alanlarına sahip olması ve gittikçe yaygınlık kazanması bunların en önemli kirletici kaynaklarından biri olmasını sağlamıştır.

Fosil yakıtların her biri önemli bir kirletici olmakla birlikte özellikle kömürler daha büyük etkiye sahiptirler. Özellikle Türkiye de parçacık kirlenmesinin %80 ve daha fazlası kömür kullanımı ile oluşmaktadır. Kaliteli kömürlerin ülkemizde az ve pahalı olması, çoğunlukla özel amaçlar için ayrılması ve ekonomik nedenlerle kalitesiz kömür kullanımı artmaktadır. Kalitesiz kömürlerin yüksek oran-

da kül ve nem içermeleri kirleticilik vasıflarına arttırmaktadır. Bunun yanında elle yükleme yapılarak yakılması emisyonun daha da artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle emisyonu azaltıcı optimum çözümlere gidilmesi ve gerekirse bunun için kanuni kısıtlamaların getirilmesi gerekir.

Ülkemizde kullanılan kömürlerin genel özellikleri alttaki gibidir (Avcı, 1985).

**Taş Kömürleri:**

Kül oranları %12-15.

**Kaliteli Linyit Kömürleri:**

Kül oranları %9-12, nem oranları %12-15, ısı değerleri 5000-5250 kcal/kg. civarındadır.

**Normal Linyit Kömürleri:**

Kül oranları %10-40, nem oranları %8-40, ısı değerleri 2400-4200 kcal/kg civarındadır.

**Kalitesiz Linyit Kömürleri:**

Kül oranları %20-60 ve ısı değerleri 2400 kcal/kg'ın altındadır.

Kömürlerin yakılması sonucu oluşan uçucu ve uçucu olmayan küller homojen bir madde olmayıp birçok element ve bu elementlerin oluşturduğu oksitlerden meydana gelir. Yapılan analizlere göre genel olarak kömürlerde bulunabilecek elementler ve bunların durumları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Yakıtın yanması sonucu bu elementler oksijenle birleşerek uçuculuk kabiliyeti kazanırlar. Genellikle elementlerin her biri oksitler halinde bulunur. Yapılan uçucu kül analizleri sonucu tipik bir ocak için elde edilebilecek uçucu kül bileşenleri ve bulunabilme oranları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Analizler sonuçlarından da görüleceği üzere radyoaktif etkiden asit oluşumuna kadar birçok zararlı ve tehlikeli madde emisyonu ile çevre tehdit edilmektedir. Bu nedenle bu zararlı emisyonları günün şartlarına göre değerlendirerek minimuma indirilmesi gerekmektedir.

Tablo 2.1. Kül analizi sonucu elde edilebilecek başlıca elementler (Avcı, 1985).

| Külden bulunabilecek başlıca elementler  |    |    |    |    |
|--|----|----|----|----|
| Al                                       | Ba | Ca | Co | Eu |
| Fe                                       | Ef | Rb | La | Sm |
| Mn                                       | Na | Tn | Si | Pb |
| Sr                                       | Ta | W  | Ti | Ga |
| Zr                                       | Cu | Cd | Mo | Cl |
| Se                                       | As | Zn | Br | Y  |
| Sb                                       | Sn | Hg | Mg | V  |
| C  | P  | K  | U  |    |
| S  |    |    |    |    |
| Uçucu kül halinde bulunabilen elementler |    |    |    |    |
| Si                                       | Co | Cd | Cu | Na |
| Pb                                       | W  | Se | As | Mo |
| C  | Sb | Sn | Zn |    |
| U  | V  | Ga |    |    |
| Buhar fazında bulunan elementler         |    |    |    |    |
| Hg                                       | Br | Cl | S  |    |

Tablo 2.2. Tipik bir ocak emisyonu analizinde elde edilebilecek uçucu kül bileşenleri ve yüzde oranları (Avcı, 1985).

| Bileşen   | Sembol                | Oran (%)      |
|-----------|-----------------------|---------------|
| Karbon    | C                     | 0,37 - 36,20  |
| Demir     | $Fe_2O_3$ , $Fe_3O_4$ | 2,00 - 26,80  |
| Magnezyum | MgO                   | 0,06 - 4,7    |
| Kalsiyum  | CaO                   | 0,12 - 14,73  |
| Alüminyum | $Al_2O_3$             | 9,81 - 53,40  |
| SÜLFÜR    | $SO_3$                | 0,12 - 24,33  |
| Titanyum  | $TiO_2$               | 0,00 - 2,80   |
| Karbonat  | $CO_3$                | 0,00 - 2,60   |
| Silis     | $SiO_2$               | 17,30 - 63,60 |
| Fosfor    | $P_2O_3$              | 0,07 - 47,20  |
| Potasyum  | $K_2O$                | 2,80 - 3,00   |
| Sodyum    | $Na_2O$               | 0,20 - 0,90   |
| Diğerleri | -                     | 0,08 - 18,90  |



Bu amaçla çeşitli ülkeler kaynak, işyeri, çevre ve ortam kontrolü yapmakta bunun için kanuni sınırlamalar getirmektedirler.

### 2.1. Emisyon Faktörleri

Posil yakıtlar kullanılma amacı ve sistem büyüklüğüne bağlı olarak değişik metodlarla yakılmaktadırlar. Yakıtın yakılma şekline bağlı olarak emisyon oranları ve kül granulometrilere değişmektedir. Kömür yakıtların elle yüklenerek ateşlenmesi sonucu gaz akımı düzey olmakta, kömür konması ve alınması işlemleri sonucu küller küçülmekte ve emisyon miktarları artmaktadır. Mekanik yüklemeli sistemler ise daha az emisyon ve daha kaba kül granulometrisi vermektedirler. Çeşitli ateşleme sistemlerinde oluşan emisyonlar ve kül granulometrilere incelenerek bu sistemleri karakterize eden ortalama emisyon faktörleri ve kül granulometrilere elde edilmiştir. ASİE tarafından verilen bu faktörler Tablo 2.3'de verilmiştir. Burada verilen emisyon faktörlerinden elle ateşlemeli sisteme ait olanının emisyon faktörü olarak kullanılması tavsiye edilmektedir.

Tablo 2.3. Kömür yakıtlar için kontrol aygıtı olmadıkça haldeki emisyon (Avcı, 1985).

| Parçacık<br>çapı<br><br>(mikron) | Ateşleme Sistemi                  |        |        |                    |                   |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------------------|-------------------|
|                                  | Pülverize                         | Siklon | El ile | Yayıcı<br>Stokerli | Diğer<br>Stokerli |
|                                  | Emisyon Faktörleri (kg/ton yakıt) |        |        |                    |                   |
|                                  | 7,3                               | 0,91   | 0      | 6                  | 2,3               |
| Uçucu Kül Granulometrisi         |                                   |        |        |                    |                   |
| + 44                             | 25                                | 10     | -      | 61                 | 70                |
| 20-44                            | 23                                | 7      | -      | 13                 | 16                |
| 10-20                            | 20                                | 8      | -      | 11                 | 8                 |
| 5-10                             | 17                                | 10     | -      | 6                  | 4                 |
| <5                               | 15                                | 65     | 100    | 4                  | 2                 |

Ancak burada bu tip ateşleme sistemi için bir fikir verilmektedir. Görüldüğü gibi burada fuel-oil için emisyon faktörü verilmemiştir. Mesken, genel hizmet binaları ve endüstriyel uygulamalarda fuil-oil için parçacık emisyon faktörü olarak 3 kg uçucu kül/ton fuil-oil olarak verilmiştir.

## 2.2. Standartlar

Kirletici kaynakların ve kirletici bileşenlerin tesirleri gözönüne alınarak kontrol olanaklarına bağlı müsaade edilebilir maksimum emisyon ve imisyon değerleri tesbit edilmektedir. Bu değerler kirletici cinsine ve ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Yıllık kirletici emisyonları arttıkça MEK ve MİK konsantrasyonları yeniden incelenerek küçültme yoluna gidilmektedir. Bu bölümde ABD'ye ait standartlardan örnekler verilecektir. Ayrıca ülkemize ait standartlar ise 2 Kasım 1986 tarihli Resmi Gazete ile yayınlanmıştır.

Standartlar kirletici cinsine bağlı olarak değişik tanımlar altında devredilmektedir. Ayrıca herbir kirletici için MEK ve MİK standardı bulunmaktadır. Tablo 2.4'de ABD'de uygulanan ve ASHRAE tarafından verilmiş parçacık emisyon (MEK) standartlarının giriş ısı yüküne bağlı olarak değerleri verilmiştir. Bu standartlar dolaylı ve dolaysız ısıtma sistemleri için verilmiştir.

Tablo 2.4. Giriş ısı yüküne bağlı MEK standartları (Avcı, 1985)

| Giriş ısı yükü<br>kcal/h | MEK standardı<br>kg/h |
|--------------------------|-----------------------|
| $3,15 \cdot 10^5$        | 0,50                  |
| $12,60 \cdot 10^5$       | 1,95                  |
| $25,20 \cdot 10^5$       | 3,50                  |
| $126,00 \cdot 10^5$      | 6,40                  |
| $252,00 \cdot 10^5$      | 16,00                 |
| $1500,00 \cdot 10^5$     | 114,00                |

Bundan başka genel amaçlar için uygulanmak üzere verilen ürün girdisine göre parçacık emisyon standartları verilmiştir. Bu standartlar Tablo 2.5'te görülmektedir.

Tablo 2.5. Genel amaçlar için MEK standartları (Avcı, 1985)

| Sisteme giren madde ton/h | MEK Standardı kg/h |
|---------------------------|--------------------|
| 0,1                       | 0,50               |
| 0,5                       | 1,46               |
| 1,0                       | 2,30               |
| 5,0                       | 6,70               |
| 10,0                      | 10,80              |
| 25,0                      | 20,00              |
| 50,0                      | 31,80              |
| 75,0                      | 43,00              |
| 100,0                     | 50,00              |
| 250,0                     | 58,00              |
| 500,0                     | 64,30              |
| 1000,0                    | 71,10              |
| 5000,0                    | 88,10              |

Bu genel standart tanımları dışında ülkelere, bölgelere, yıllara ve kirletici cins ve miktarına göre verilmiş standartlar da vardır. Tablo 2.6'da verilen standartlarda MEK değerleri görülmektedir. Burada görülen ABD ve İngiltere'ye ait kömür yakılması ile oluşan parçacık emisyon standartları %12 CO<sub>2</sub> ve 1,5 hava fazlalık katsayısı içindir. Alman standartları ise %7 CO<sub>2</sub> ve 1,5 hava fazlalık katsayısı içindir.

Buraya kadar verilen standartlar yalnız emisyonlar (MEK) içindi. Bundan başka çevre havasında ölçülen standartlar (MİK) da bulunmaktadır. Yine bunlarda ülkelere ve kirletici cinsine göre değişik değerler alırlar. Ülkemizde bu tür standartlar olmadığından burada diğer ülkelerde uygulanan standartlar verilecektir. Tablo 2.7'de MİK standartları görülmektedir.

Tabloda da görüldüğü gibi standartlar oldukça farklılık göstermektedir. Bu farklılık ülkenin gelişmişlik derecesi ve kirletici

kaynakların sayısına büyüklüğüne bağlıdır. Dünya sağlık teşkilatının tüm tesirleri gözönüne alarak verdiği standarda göre MEK değeri yıllık ortalama  $40 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  olup yılın %98'de  $120 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  değeri aşılmamalıdır.

Tablo 2.6. Çeşitli ülkelerde uygulanan MEK Standartları (Avcı, 1985)

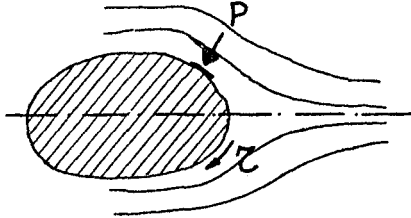
| Kirlenici kaynak          | Ülke veya bölge | Standart no, yıl | Standartlar                   |                                     |
|---------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|                           |                 |                  | gazlar $\text{mg}/\text{m}^3$ | parçacıklar $\text{mg}/\text{Nm}^3$ |
| kömür yakma               | ABD             |                  |                               |                                     |
| 100kg/h üstü              | Rock ville      |                  |                               | 370                                 |
| " altı                    | "               |                  |                               | 690                                 |
| 5000kg/h altı             | Philadelphia    |                  |                               | 240                                 |
| " üstü                    | "               |                  |                               | 740                                 |
| genel                     | İngiltere       | 1975             |                               | 115                                 |
| 20 ton/gün altı           | Almanya         | VDI 2301         |                               | 200                                 |
| " üstü                    | "               | "                |                               | 150                                 |
| Çimento san.              | "               | VDI 2204         |                               | 150                                 |
| Çimento san.              | ABD             |                  |                               |                                     |
| Ocak gazı                 | Michigan        |                  |                               | 240                                 |
| Soğutma                   | "               |                  |                               | 370                                 |
| Öğütme                    | "               |                  |                               | 180                                 |
| Ocak gazı                 | İngiltere       | 1979             |                               | 100                                 |
| Soğutma                   | "               | "                |                               | 150                                 |
| Öğütme                    | "               | "                |                               | 150                                 |
| Bakır ve alaşım           | "               | 1975             |                               | 115                                 |
| HCl, genel                | "               | 1977             | 460                           |                                     |
| HF, ticari                | "               | 1977             | 57                            |                                     |
| $\text{NO}_x$ , prosesler | "               | 1975             | 2300                          |                                     |
| Demir döküm ocak          | "               | 1975             |                               | 460                                 |
|                           | ABD-Michigan    |                  |                               | 610                                 |
|                           | ABD-İllinois    |                  |                               | 230                                 |
| Kum kurutma/soğ.          | İngiltere       | 1979             |                               | 230                                 |
| PVC polimer sis.          | "               | 1979             | 460 HCl                       |                                     |

Tablo 2.7. Geçitli Ülkelerde uygulanan MİK standartları (Avcı, 1985)

| MİK Standartları ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |               |             |           |              |              |
|---|---------------|-------------|-----------|--------------|--------------|
| Ülke  | Kirletici     | Yıllık Ort. | 24 h ort. | 30 dak. ort. | 20 dak. ort. |
| A.B.D.  | Parçacık      | 60          | 150       |              |              |
|   | Kükürtdioksit | 60          | 260       |              |              |
| Kanada  | Parçacık      | 60          | 90        |              |              |
|   | Kükürtdioksit | 30          | 180       |              |              |
| Hollanda                                      | Parçacık      |             | 270       |              |              |
|   | Kükürtdioksit |             | 150       |              |              |
| İtalya  | Parçacık      |             | 300       |              |              |
|   | Kükürtdioksit |             |           |              |              |
| Polonya                                       | Parçacık      |             | 200       |              | 600          |
|   | Kükürtdioksit |             | 350       |              | 900          |
| B.Almanya                                     | Parçacık      | 200         | 400       |              |              |
|   | Kükürtdioksit |             |           | 400          |              |
| S.S.C.B.                                      | Parçacık      |             | 150       |              | 500          |
|   | Kükürtdioksit |             | 150       |              | 500          |
| Çekoslovakya                                  | Parçacık      |             | 150       | 500          |              |
|   | Kükürtdioksit |             | 150       | 500          |              |
| Japonya                                       | Kükürtdioksit |             | 120       |              |              |
| İsveç   | Kükürtdioksit |             | 260       | 650          |              |
| Romanya                                       | Kükürtdioksit |             | 230       | 680          |              |

### 2.3. Parçacık Dinamiğinin Esasları

Aerodinamik, hidrodinamik direnç homojen bir akış ortamında  $V$  hızı ile hareket eden bir cisme gelen kuvvet, boyut analizinden



$$D = C_D \rho \frac{V^2}{2} S \quad (2.1)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir.

Burada;

- $\rho$  : akışkanın özgül kütleini,
- $S$  : cisme ait karakteristik yüzeyi,
- $C_D$  : boyutsuz bir katsayıyı göstermektedir.

Direnç katsayısı ismini alan  $C$  sayısı, Reynolds sayısına, cismin formuna ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

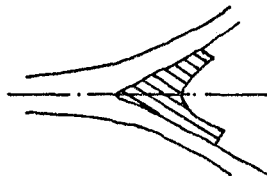
$$C = f (R, \text{Form}, \text{Pürüzlülük}) \quad (2.2)$$

Diğer taraftan cisme gelen toplam kuvvet sürtme gerilmeleri ile  $P$  basınç kuvvetlerinden doğar.

$$\Delta = F_s + F_b \quad (2.3)$$

Sürtmesiz bir akışkanın herhangi bir cisim etrafındaki hareketinde sürtme gerilmeleri sıfır olacağından sürtme direncide sıfırdır. Ancak sürtmesiz akışkanın potansiyel hareketinde ayrıca basınç kuvvetlerinin yarattığı kuvvetler sıfırdır.

Kutta-Joukowsky teoremine göre simetrik cisme kaldırma kuvveti de gelmediğinden toplam direnç sıfırdır (D' Alembert Paradoksu).



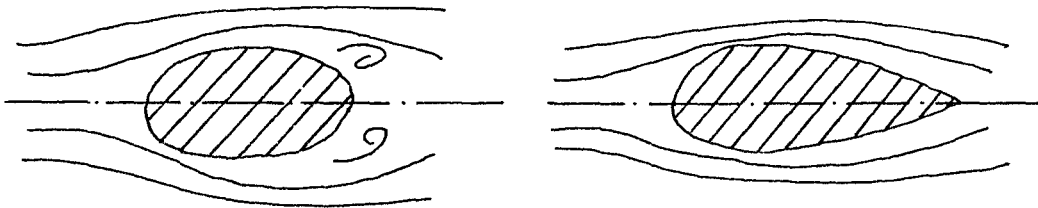
Tam ayrılmanın husule geldiği, yani ayrılma yüzeyinin yada jet akışının husule geldiği potansiyel akış halleri ayırık tutulmalıdır.

Pratikte, dalmış cismin formuna ve akışa karşı durumuna göre, sürtünme direnci ve form direncinin toplam dirence katkıları değişmektedir. Örneğin akışa paralel bir "plak" halinde sürtünme direnci hakimdir. Aynı plak akışa dik duruma getirilirse gerilmelerin iz düğümleri sıfır olacağından sürtme direnci sıfır olarak buna karşılık plağın iki yüzü arasındaki basınç farkından oldukça büyük bir form direnci doğacaktır.



Form direncini arttıran etkilere en büyük yüzeyden ayrılmalarıdır. Bu yüzden direnci azaltmak için ayrılmaların önlenmesine çalışılır. Bunun için de yüzeyin bir geniş açılı difüzör gibi çalışmaması için ıraksaklık azaltılır, yani arka kısımda kesit alanı tatlı bir şekilde azaltılır.

Şekilde görüldüğü gibi damla formu ile direnç azalır.



Reynolds sayısının ayrılma noktası üzerinde etkisi nedeniyle direnci de geniş ölçüde etkiler. Küt cisimlerde ise ayrılma noktası değişmediği için çok küçük Reynolds sayıları dışında Reynolds etkisi yok sayılır. Yani cismin direnç katsayısı değişmez. Bu dirençte esas itibarıyla form direncidir.

Cisimlerin formları ve durumlarına göre direnç katsayıları için bir tahmin yapmak gerekirse ayrılma ve (ölü akışkan) bölgesinin büyüklüğüne bakmak gerekir.

#### 2.4. Küre Etrafında Hareket ve Kürenin Direnci

Reynolds sayısının çok küçük değerlerinde atalet kuvvetleri viskoz kuvvetler yanında yok sayılabilir. Navier-Stokes denklemleri

$$\frac{1}{\rho} \text{grad } P = - \frac{\Delta V}{\Delta t} + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.4)$$

bu yaklaşım ile, (Stokes yaklaşımı),

$$\frac{1}{\rho} \text{grad } P = \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.5)$$

haline getirilir ve çözüm mümkün olur. Küre etrafında harekette oldukça uzun olan bu çözüm direnç kuvveti için,  $d$  kürenin çapına göstermek üzere,

$$D = 3\pi\mu dV \quad (2.6)$$

ifadesini verir. Buna Stokes denklemi denir.

Buna göre küçük Reynolds sayılarında (sürünme hareketi için) direnç katsayısı

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (2.7) \quad Re_p = \frac{dV}{\nu} \quad (2.8)$$

olarak belirir ( $s = \frac{\pi d^2}{4}$  olarak alınır). Bu bağıntının geçerlilik alanı  $Re$ 'nin 0,1 den küçük değerlerini kapsar. Ancak bazı müellifler, istenen yaklaşıklık derecesine göre, çoğu zaman  $Re_p = 0,5$  kaba hesaplar için  $Re_p = 1$  'e kadar kullanılabilir.

Oseen'in yaklaşımına göre hareket denklemi lineer olmayan kısımlarından kurtulur.

Genel ceceryan hareketinin hızı  $\vec{U}$  ile gösterilmek kolayıyla bir noktadaki hız

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{v} \quad (2.9)$$

denklemleriyle verilir.

Oseen kararsızlık hız bileşenlerinin kareleri ile bunların türev-



lerini diğer terimler yanında ihmal etmeyi önermiş ve buna göre Navier-Stokes denklemi;

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.10)$$

$U_x = U$ ,  $U_y = 0$ ,  $U_z = 0$  kabulüyle

$$U \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.11)$$

olur.

Bilge ve süreklilik denklemlerinin çözümünden kürenin direnci

$$D = 3\pi\mu d U \left[ 1 + \frac{3}{16} \text{Re}_p \right] = \frac{24}{\text{Re}_p} + 4,5 \quad (2.12)$$

olarak bulunur. Bu denklem  $\text{Re}_p = 1$  için %1 yaklaşıklık vermektedir.

Reynolds sayısının daha büyük değerleri için geçerli ampirik ifadeler mevcuttur.

$$D = \frac{24}{\text{Re}_p} \left[ 1 + \frac{3}{16} \text{Re}_p - \frac{11}{100} \text{Re}_p^2 \right] \quad (2.13)$$

## 2.5. Limit Çökme Hızı

Bir parçacığın ağırlık hareketi altında durgun bir akışkan ortamı içinde çökme hızının limit bir değeri erişip sabit kalacağı aşikardır.



Bu denge durumunda direnç kuvveti ile kaldırma kuvveti toplamı ağırlık kuvvetine eşit olacaktır.

$$D + R = W \quad (2.14)$$

Küre halinde direnç, kaldırma ve ağırlık kuvvetleri

$$D = \rho \frac{v_o^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot c_D \quad ; \quad R = \frac{\pi d^3}{6} \gamma' \quad ; \quad W = \frac{\pi d^3}{6} \gamma'_p$$

konursa;

$$\rho \frac{v_o^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot c_D = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma'_p - \gamma') \quad ; \quad \rho s = \gamma'$$

çökme hızı için

$$v_o = \sqrt{\frac{4}{3} s \cdot \frac{d(\gamma'_p - \gamma')}{c_D \cdot \rho}} \quad (2.15)$$

bağıntısı elde edilir. Stokes hareketi için

$$c_D = \frac{24}{Re} \quad (2.16)$$

konursa,

$$v_o = \frac{s(\gamma'_p - \gamma')}{18\mu} d^2 \quad (2.17)$$

Newton hareketi için

$$c_D = 0,44$$

olarak

$$v_o = \sqrt{3(s-1) g d} \quad (2.18)$$

$$s = \frac{\gamma'_p}{\gamma'}$$

ifadesi elde edilir.

Eğer istenirse Stokes Kanununun geçerli olduğu bölge için

$$c_D = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (2.19)$$

bağıntısı kullanılarak

$$V_o = \frac{0,153 \cdot g^{0,714} \cdot d^{1,142} (S-1)^{0,714}}{\nu^{0,429}} \quad (2.20)$$

bağıntısı elde edilir.

Pratikte bazı müellifler parçacığın hangi akış bölgesine düştüğünü tesbit etmek için aşağıdaki yöntemi tavsiye ederler.

$$k = d \left[ \frac{g \rho (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.21)$$

k değerinin hesabında, eğer

$k < 3,3$  ise Stokes uygulanır.

$3,3 < k < 43,6$  ise geçiş bölgesi

$43,6 < k < 2360$  ise Newton

$2360 < k$  üst kritik bölgedir.

## 2.6. Akışkan Parçacıklar Halinde Limit Çökme Hızı

Parçacığı teşkil eden akışkanın ( $\mu_p$  viskozitesi gözönüne alınarak) Hadamardı-Rybczynski'ye göre çökme hızı,

$$V_o = \frac{g d^2 (\rho_p - \rho)}{18 \mu} \cdot \frac{3 \mu - 3 \mu_p}{2 \mu + 3 \mu_p} \quad (2.22)$$

dır.

Görüldüğü gibi sıvı içinde sirkülasyon hız gradyanı düşürür ve sürtmeyi azaltır ve  $V_o$  büyür.

Gaz habbeleri için  $\mu_p \ll \mu$  denklem

$$V_o = \frac{g d^2 (\rho_p - \rho)}{12 \mu} \quad (2.23)$$

Gaz içinde sıvı parçacığı için  $\mu_p \gg \mu$  olduğundan Stokes Kanunu

elde edilir.

Sıvı içindeki yabancı maddeler bu değerleri değiştirir. Küçük parçalar için etki kendisini hissettirir. Son yıllarda yapılan deneyler küçük parçalar için (2.22-23) ifadelerinin çok nadiren gerçekleştiğini göstermiştir. Aksine laminer sahada küçük küreler halinde Stokes daha iyi netice vermekte fakat büyük habbeler halinde Hadamard yaklaşımı daha iyi netice vermektedir. Bunun sebebi küçük partiküllerdir. Zira bunun etkisi büyük habbelerde yada damlalar halinde kendisini gösterememektedir. Eğer su iyi temizlenirse yine Hadamard uygulanabilmektedir.

### 3. HAVA KİRLENMESİNİN KONTROLÜ

Kirlenme olayının boyutlarının gittikçe büyüyen ve çeşitlilik kazanan niteliği onu önleme metotlarında aynı ve hatta daha hızlı bir şekilde gelişme göstermesini gerektirmektedir. Ayrıca her metod yer ve amaca uygun olarak şekil kazanmakta, kendi içinde çeşitlilik göstermektedir. Hava kalitesinin iyileştirilmesi onun sürekli olarak kontrolünü gerektirmektedir. gerek kirlenme ve gerek diğer amaçlar için kullanılan kontrol araçlarının bilinmesi optimum çözüm sağlanması açısından gereklidir.

#### 3.1. Toz Toplama Amaçları

Tozların birçok toplanma amacı vardır. Bu amaçları genel olarak şöyle sıralayabiliriz:

1. Hava kirliliğini önlemek.
2. Bazı makina ve tesislerin bakım ve işletme masraflarını azaltmak (motorlarda hava filitreleri gibi).
3. Endüstri tozlarının toplanması (delme, zımparalama ve taşlama aparatlarının yarattığı tozlar, marangoz ve mobilya atelyelerindeki tozlar gibi).
4. Bazı türdeki imalatlar için ekstra temizliğin sağlanması (farmakolojide).
5. Kıymetli tozların toplanması (altın ve platin işi gibi).

6. Toz halinde imalatın sürdürülmesi (süt tozu, yumurta tozu, sabun tozu gibi).

### 3.2. Partikül Kontrol Araçları

Uygun bir toplayıcı seçimi yapılmadan önce birçok faktör belirlenmelidir. Belirlenmesi gereken faktörlerin en önemlilerinden bazıları şunlardır. Partikülün fiziksel ve kimyasal özellikleri, gaz akımının volümetrik akış hızı, umulan partikül konsantrasyonu (toz yükü), akış sıcaklığı ve basıncı, gazın saflığı (korozif yada çözünlülük karakteristikleri), temizlenmiş akımın istenen kalitesi. Son madde, tek yada peşpeşe dizilen birkaç kontrol aletinden istenen verimi gösterdiği için en önemli faktör olabilir. Birçok hallerde yukarıda bahsedilen sınırlayıcı faktörler, mühendisi bu araçların ancak bir yada ikisini seçebilmesine izin verir.

Partikül toplama metodlarının 6 ana grubu şunlardır.

1. Ağırlık metodları.
2. Atalet metodları.
3. Filitrasyon - süzme.
4. Elektrostatik toplama.
5. Termal tutucular.
6. Sonik tutucular.

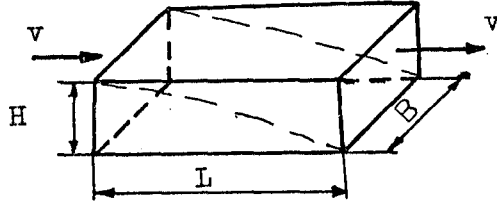
### 3.3. Toz Kontrol Araçları Hakkında Kısa Bilgiler

Toz toplama metodlarının ana prensipleri ve bunlara ait bazı uygulamalar genel olarak şu şekilde izah edilebilir.

#### 3.3.1. Ağırlık metodları

Akışkan içinde hareket eden parçacıklar ağırlık kuvvetleri etkisinde çökerler. Parçacıkların çökme yükseklikleri küçültülerek ve kanal veya hacim uzunluğu arttırılan parçacığın hacminde daha fazla

kalması sağlanarak, yakalanabilecek parçacık çapı küçültülebilir.



Şekil 3.1. Çökme odası (Pancar, 1987).

Şekildeki çöktürme odasında L boyunun sonunda içerideki partiküller çöktürülmelidir. H yüksekliğindeki çökme odasında  $v_0$  çökme hızında çökme için gerekli süre;

$$t = \frac{H}{v_0} \quad (3.1)$$

dir.

$v_1$  limit çökme hızındaki bir partikülün L boyunda düşebilmesi için gerekli olan süre ise;

$$t = \frac{LBH}{Q} \quad (3.2)$$

dir. Bu metod ağırlıkta ait yoğunluk ile içinde taşıdığı tane yoğunluğunun farklı olması özelliğinden yararlanılarak kullanılmaktadır. Minimum  $43\mu$  dan büyük partiküller ihtiva eden karışımlar için geçerli bir metoddur.

Çöktürme odası bitiminde bütün partiküllerin çökeltilmiş olması için limit çökme hızı  $v_1 < 3m/sn$  olmalıdır.

### 3.3.1.1. Howard odası

Çöktürme odası içine tabana paralel olarak çeşitli levhalar yerleştirilmektedir.



Şekil 3.2. Howard odası (Pancar, 1987).

n bölme sayısı olmak şartıyla çökme hızı;

$$v_0 = \frac{Q}{BLn} \quad (3.3)$$

olur. Bölme sayısı arttırılarak  $v_0$  çökme hızı daha da iyileşir. Bu metodla  $10\mu$  'a kadar partikül taşıyan kirli akışkanlarda çöktürme sağlanabilir. 1,5 mm kadar olan h yüksekliğinde arıza anında tesise ikinci kez yol verilememektedir. Dolayısıyla perde aralıklarının iyi seçilmesi gereklidir. Böylece tıkanma önlenmiş olur.

Perde seçiminde; kullanılan ortamın malzemeye etkisi gözönüne alınmalıdır. Her zaman çöktürme odasına akışkan girişi yatay olmalıdır.

### 3.3.2. Atalet Metodları

Sınıflama, partikül malzemelerin kaba ve ince fraksiyonlara ayrılmasıdır. Ayırma çoğu zaman boyuta göre yapılır. Fakat başka özelliklere göre de ayırma yapılabilir. Ayrıca partikül biçimi, elektrik, magnetik yüzey özellikleri ve başka faktörlere duyarlı sınıflama araçları da vardır.

Mesela, elek yada süzgeç kullanırken yoğunluğun önemi yoktur. Fakat, pnömatik sınıflama araçlarında sürüklenme kuvvetleri olduğundan yoğunluk çok önemli bir faktördür.

Sınıflama ile katı-sıvı ayrıştırması, her ne kadar işlem olarak birbiriyle çakışsada terim olarak sık sık birbirlerinin yerine kullanılsada bu iki işlem birbirinden ayrı düşünülmemelidir. Mesela siklonlar esas itibariyle ayırma aracı olarak düşünülür; fakat çok ince partikül fraksiyonu çıkış akışkanında kalır ve bunlar istenirse başka bir adımda örneğin fabrikasyon filitrelerde alınabilir.

Siklonlar orta değerlerde partikül boyutları için akışkan içinden partikül ayrıştırma işleminde çok etkili oldukları halde sınıflama verimleri düşüktür.

Burada geleneksel olarak, fakat pek uygun olmayan bir isimlendirme ile hava separatörleri de denen pnömatik sınıflama araçları incelenecektir. Bu tür araçlarda orta boy ile mikrometrik araçlar arasındaki partiküller (1,000 - 0,1  $\mu$ m.) bazı kuvvetlerin kombinasyonları tarafından etkilenirler.

### 3.3.2.1. İlk kullanılan sınıflama araçları

Sınıflama araçları iki kaynak araçtan gelişmiştir. Bunlar sırasıyla;

- a. Basit genişleme hücresi ve
- b. Mumford ve Moodie ayırıcısıdır.

Birincisinde daha geniş bir hacme genişleme sonucunda partikül hızının düşmesiyle iri partiküller hava akımından ayrılıp aşağı iner. Sonradan genişleme hücresine perde yüzeyler, vanalar ve diğer yönlendirme ve tampon aletleri eklenerek kaba partiküllerin ayrılması için havanın yön değiştirmesi ve çarpışma yüzeylerinin oluşumu sağlanır.

1885'te patente alınan Mumford-Moodie ayırıcısı Sturtevant-Whirlwind'a gekil 3.3 benzer. Katı parçalar, santrifüj kuvvet oluşturan döner dağıtıcı plaka kullanarak yükselen hava akımına beslenir. Kaba parçalar bir iç koni içine düşer. İnce partiküller içte yer alan bir fanın etkisiyle dışa itilir, dış koninin genişleme bölgesinde, sabit kanatlar arasında havadan ayrılıp tabanda birikir. Hava tekrar sirküle etmek üzere dağıtıcıya döner.

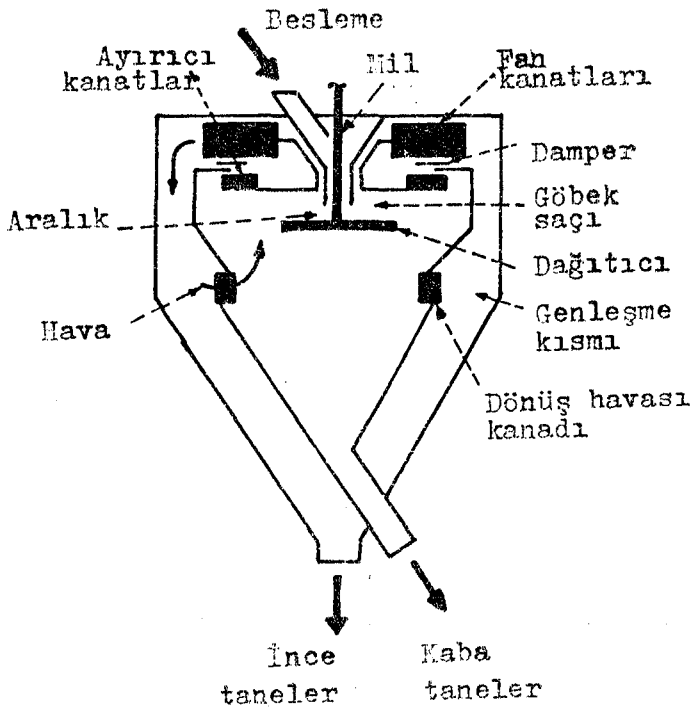
### 3.3.2.2. Modern araçların türleri

Hava sınıflama araçlarınının klasikleşmiş gruplama kriterleri şu şekildedir Tablo(3.1).

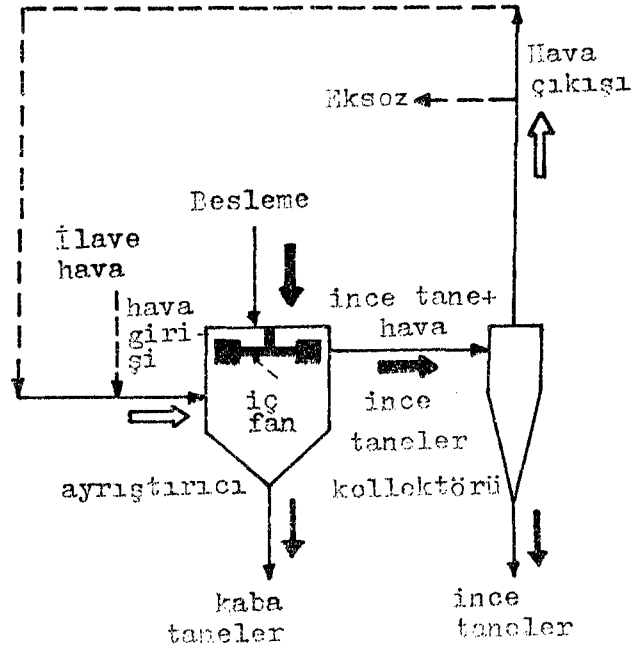
- Partiküllere etkiyen kuvvetler: Bu kuvvetler; havanın sürüklenme kuvveti, dönen plaka gibi mekanik parçalar yada hava vorteksi tarafından oluşturulan santrifüj kuvveti, partikülün bir katı yüzeyine çarptığı durumlarda etkin olan çarpma kuvveti. Çarpışma kuvveti rotorun bir parçası olan rejektörün bulunduğu araçlardan önemli bir tasnif faktörüdür. Rejektör havaya karışan özellikle kaba partikülleri alıkoyar. Tablo 3.1 'de ikinci kolonda rotor olması halinde artı işareti konmuştur. Tablo- da sadece santrifüj kuvvetler belirtilmiştir. 3. ve 4 cü kolonlar; diğer kuvvetler her zaman mevcuttur. Fakat bazı kuvvetler bazı hallerde önemsiz olabilir.

- Besleme sistemi, hava vektörü ve eğer varsa rotorun konumu tarafından kontrol edilen partikül ve havanın yönü ve relatif hızı (sıra-yla 5., 6. ve 2. kolonlar). Eğer partiküller araca hava ile birlikte girer-

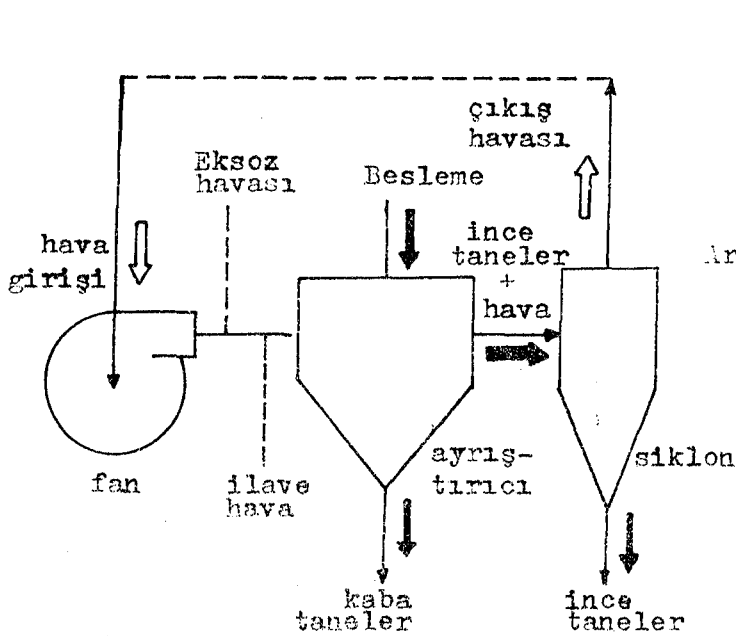




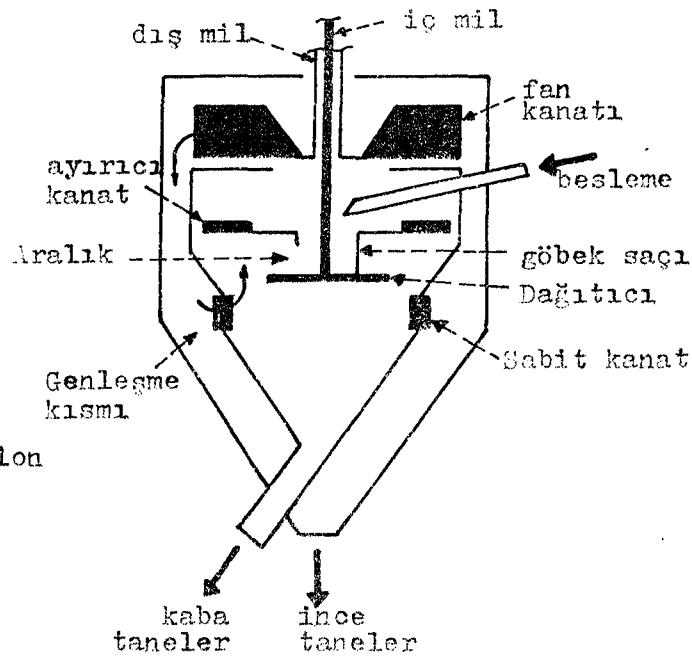
Şekil 3.3. Sturtevant Whirlwind hava ayırıcısı (Chemical Engineering, 3.3.1986).



Şekil 3.4. Ayrı bir ünite ile ince tane ayırıcılı sistem (Sturtevant'ın süper ince hava ayırıcısı) (Chemical Engineering 3/3/1986).



Şekil 3.5. Ayrı bir dış fan ve ince tane toplayıcılı hava sınıflandırıcısı (Chemical Engineering, 3.3.1986).



Şekil 3.6. Polysius'un fan mili ile ayrıştırma yaptığı turbo ayırıcısı (Chemical Engineering, 3.3.1986).

Tablo 3.1. Hava sınıflandırıcıları: Kaba ve ince oluştumu lu pargaçıkların ayırıştırılması kullanılan aletlere ait kriterler (Chemical Engi- neering, 3.3.1986).

| No | Rotor Ekseni | Santrifüj kuvvetlerin doğrulduğu yüz |           | Katı Besleme Sistemi | Ana Hava yönü | Sabit Yönlü Cihazlar | İçeriye ve dışarıya |                         |
|----|--------------|--------------------------------------|-----------|----------------------|---------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
|    |              | Hava                                 | Besleyici |                      |               |                      | Fan                 | ince tane toplayıcıları |
| 1  | 2            | 3                                    | 4         | 5                    | 6             | 7                    | 8                   | 9                       |
| 1  | Hiç biri     | Hiç biri                             | Hiç biri  | Hava                 | Çeşitli       | Hiç biri             | Dış                 | Dış                     |
| 2  | Hiç biri     | Hiç biri                             | Hiç biri  | Hava                 | Düşey         | Şamandıra            | Dış                 | Dış                     |
| 3  | Hiç biri     | Hiç biri                             | Hiç biri  | Kanal                | Düşey         | Zigzak levha         | Dış                 | Dış                     |
| 4  | Hiç biri     | Hiç biri                             | Hiç biri  | Kayış                | Yatay         | Hiç biri             | Dış                 | Dış                     |
| 5  | Hiç biri     | Düşey                                | Hiç biri  | Hava                 | Düşey         | Dahil                | Dış                 | Dış                     |
| 6  | Hiç biri     | Düşey                                | Hiç biri  | Hava                 | Düşey         | Dahil                | Dış                 | Dış                     |
| 7  | Hiç biri     | Yatay                                | Hiç biri  | Hava                 | Yatay         | Aralık               | Dış                 | Dış                     |
| 8  | Hiç biri     | Yatay                                | Hiç biri  | Hava                 | Yatay         | Dikey boru           | Dış                 | İç                      |
| 9  | Düşey        | Hiç biri                             | Yatay     | Rotor                | Düşey         | Hiç biri             | İç                  | İç                      |
| 10 | Düşey        | Hiç biri                             | Yatay     | Rotor                | Düşey         | Hiç biri             | İç                  | Dış                     |
| 11 | Düşey        | Hiç biri                             | Yatay     | Rotor                | Düşey         | Hiç biri             | Dış                 | Dış                     |
| 12 | Düşey        | Hiç biri                             | Yatay     | Levha                | Düşey         | Hiç biri             | İç                  | İç                      |
| 13 | Düşey        | Yatay                                | Hiçbiri   | Hava                 | Düşey         | Hiç biri             | Dış                 | Dış                     |
| 14 | Düşey        | Yatay                                | Hiç biri  | Hava                 | Yatay         | Dşy.kanat            | Dış                 | Dış                     |
| 15 | Düşey        | Yatay                                | Hiç biri  | Kanal                | Yatay         | Hiç biri             | İç                  | Dış                     |
| 16 | Düşey        | Yatay                                | Yatay     | Rotor                | Yatay         | Hiç biri             | İç                  | İç                      |
| 17 | Düşey        | Yatay                                | Yatay     | Rotor                | Yatay         | Dky.kanat            | Dış                 | Dış                     |
| 18 | Düşey        | Yatay                                | Yatay     | Rotor                | Yatay         | Konikler             | Dış                 | Dış                     |
| 19 | Yatay        | Dikey                                | Hiç biri  | Kanal                | Düşey         | Hiç biri             | İç                  | Dış                     |

se sürüklenme kuvvetinin yerçekimi kuvveti yanında etkisiz kalması halinde ağır partiküller ayrılır. Eğer katı parçacıklar aynı olarak beslenirse ince partiküller hava ile birlikte gidecektir. Çünkü sürüklenme kuvvetleri etkindir.

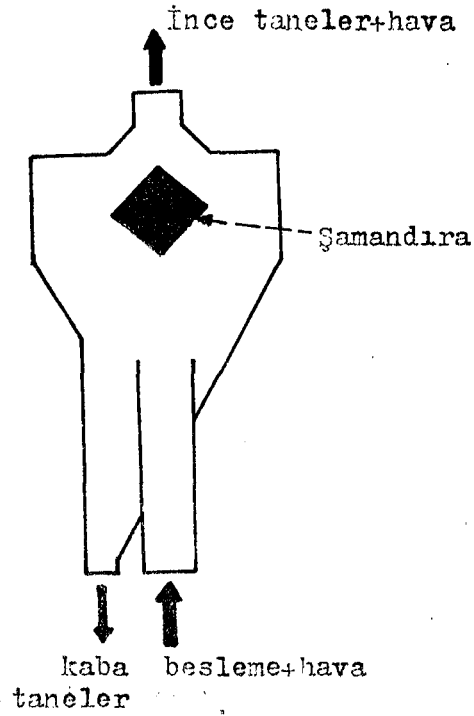
- Yön verme araçları (kanatlar, koniler, zikzak levhaları) hava yada hava-partikül karışımlarının akış şekillerini değiştirir ve çarpma yüzeyleri oluşturur (kolon 7).

- Fanın dizaynı ve ince partikülleri toplama aracı (kolon 3,9) ayırma prosesini doğrudan etkilemezse önemli ölçülerde kontrol ve dizayn faktörleridir. Mesela Whirlwind Şekil(3.3)'de ince partiküllerin genişleme odasında içte toplanması, ince partiküllerin ayrılmasının dışta gerçekleştiği siklonlu toz kollektörlerinden daha az etkilidir Şekil(3.4-5) Eğer fan malzeme besleme plakası ile seçici kanatlar aynı ekseninde olursa bağımsız hava hareketlerini kontrol etmek zordur. Aynı eksenli miller bu problemi ortadan kaldırır Şekil(3.6). Fanın dışta yer alması halinde hem dizayn basitleşir hem de hava akış hızı hassas olarak kontrol edilebilir Şekil(3.5 ve 3.8).

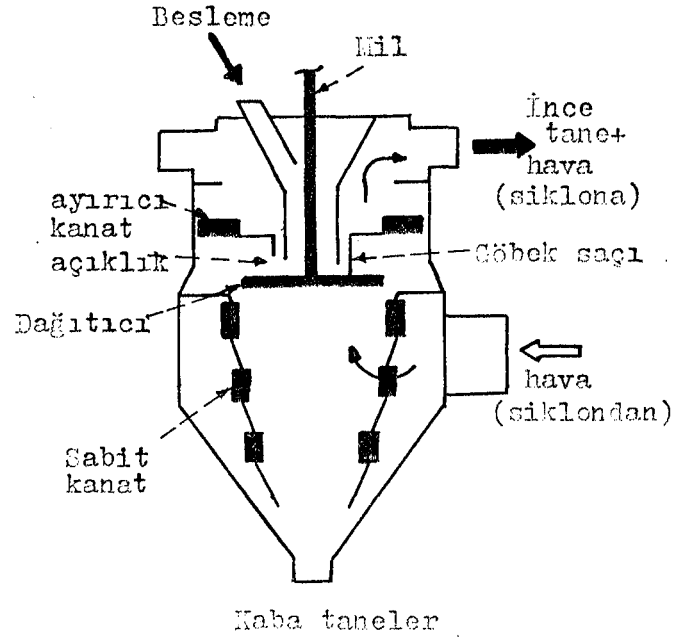
### 3.3.2.3. Rotor kullanılmayan sınıflama araçları

Genişleme hücrelerinde, kaba partiküller hızları azaldıkça aşağı düşerler. Çakıl ayırıcılar ve zikzak sınıflama araçlarında Şekil(3.7-9). partikül yolları üzerine yerleştirilmiş çarpma yüzeyleri ve dolambaçlı pasajlar suretiyle aşındırma yeteneği arttırılır. Çakıl ayırıcılar, küçük miktarlardaki ince partikülleri, büyük miktarlardaki kaba partiküllerden ayırmakta kullanılır. Lineer hava hızı şamandırayı aşağı yukarı hareket ettirmek suretiyle kontrol edilir. Döner tamburlu sınıflama aracında Şekil(3.10)dönme hareketi kaba partikülün ince partikülden ayrılmasını kolaylaştırmak için katı parçalara hareket verir. Bu arada havanın sürüklediği ince partiküller, ince partikül toplayıcısına yapılan genişlemeye bağlı olaraköker.

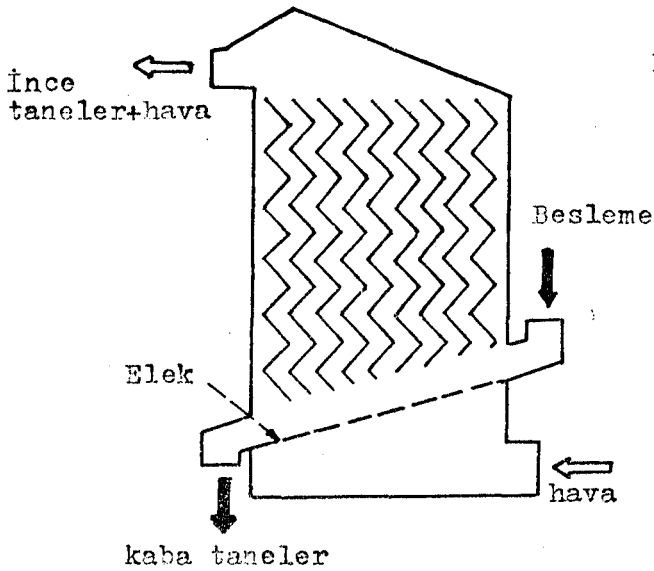
Gravitasyonel-atalet ve santrifüj sınıflama araçları kanat yada çepelerin eğriliği sebebiyle oluşan dönel hava hareketinin meydana getirdiği santrifüj kuvvetini kullanır Şekil(3.12). Hukki marka araçta kanatlar ayarlanabilir ve yatay hava çıkışı dönüş düzlemine diktir. Çift konili tasnif aracında Şekil(3.13)hava, iç koninin üst kısmında yer



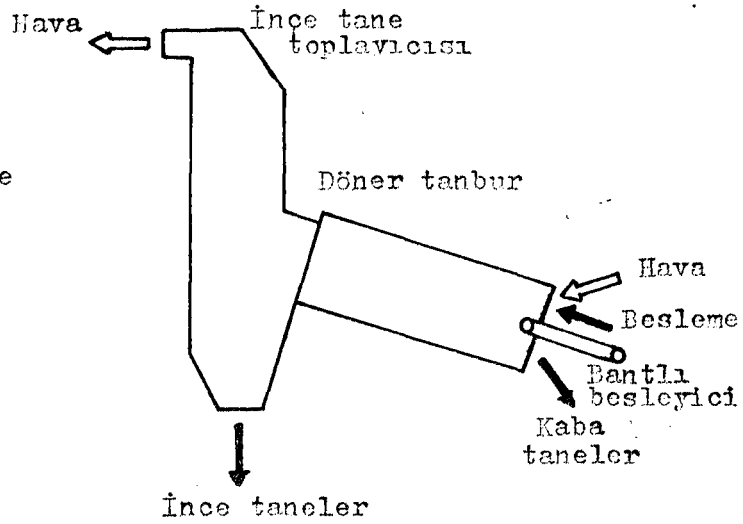
Şekil 3.7. Sturtevant'in toz ayrıştırma şekli (Chemical Engineering, 3/3/1986).



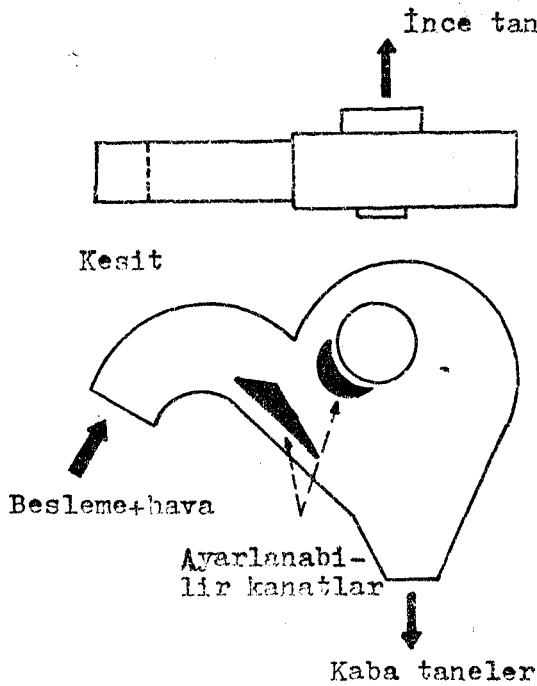
Şekil 3.8. Humboldt Wedag siklon hava sınıflandırıcısı (Chemical Engineering, 3/3/1986).



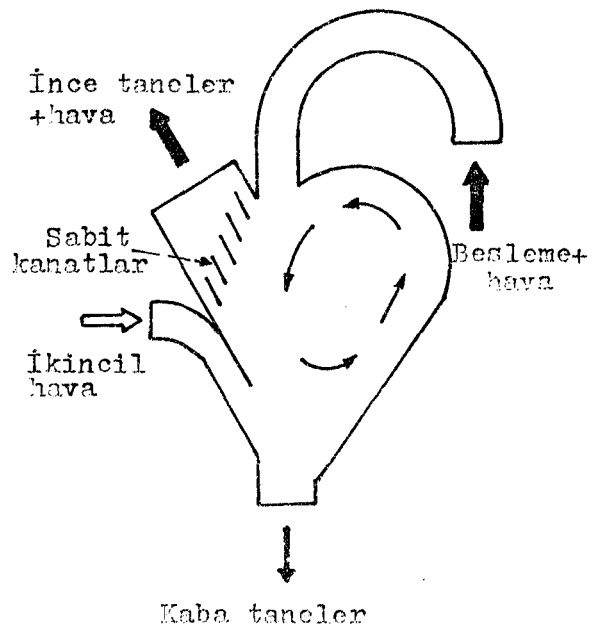
Şekil 3.9. Alpine'in tortu geçişli zigzak sınıflandırıcısı (Chemical Engineering, 3.3. 1986).



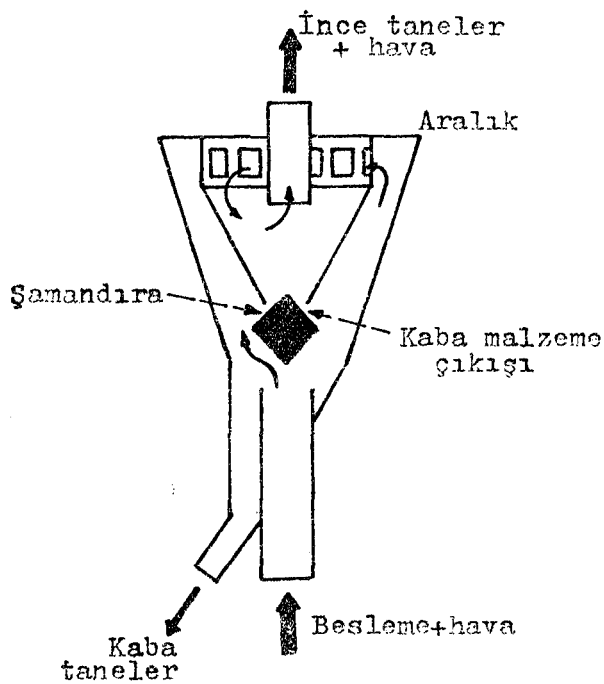
Şekil 3.10. Iowa Manufacturing şirketinin döner tamburlu sınıflandırıcısı (Chemical Engineering, 3/3/1986).



Şekil 3.11. Hukki'nin dönen hava çıkışlı santrifüj sınıflandırıcısı (Chemical Engineering, 3/3/1986).



Şekil 3.12. General Electric Buell'in yer çekimi-atalet sınıflandırıcısı (Chemical Engineering, 3/3/1986).



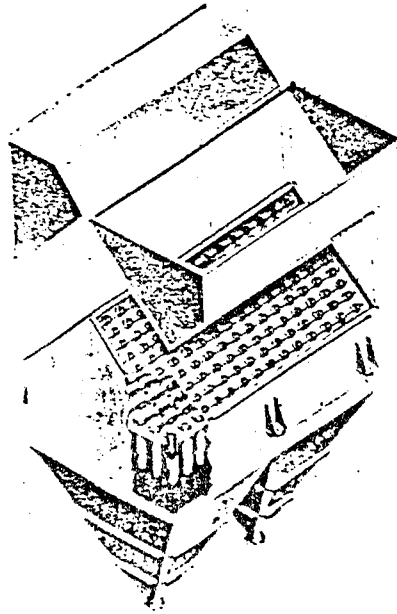
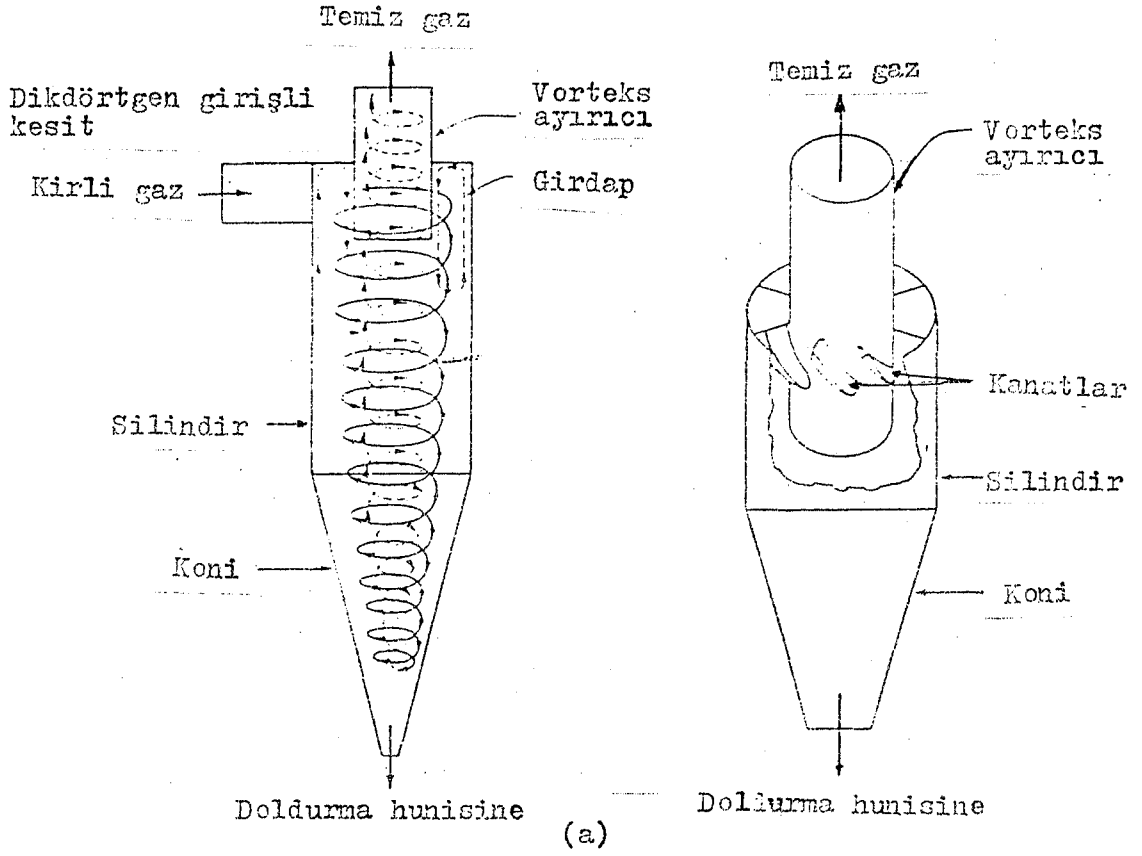
Şekil 3.13. Hardinge'in genellikle dönen hava çıkışlı olarak kullanılan çift konili sınıflandırıcısı (Chemical Engineering 3/3/1986).

alan dikey pencereden geçerken dönel bir hareket kazanır. Çakıl ayırıcısındaki şamandıradan farklı olarak buradaki şamandıra kaba partiküller iç konide ayrıldıktan sonra aşağı düşmeleri esnasında havayı kaçırmak içindir.

#### 3.3.2.4. Siklonlar

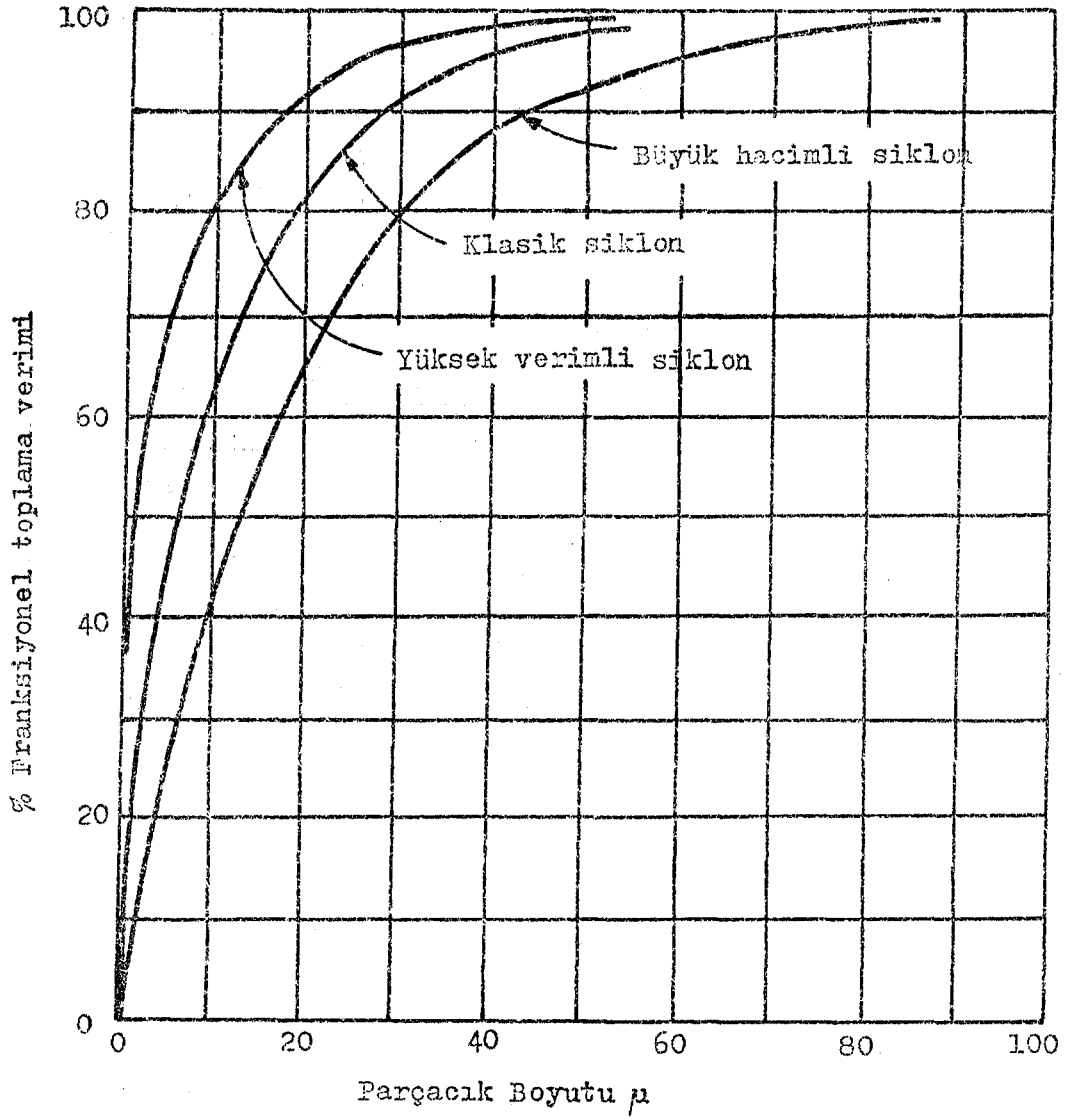
Siklon seperatörler, taşıyıcı gazdan sıvı yada katı partikülleri ayırmak için dönel gaz akımının oluşturacağı santrifüj kuvvetinden istifade ederek çalışan, gaz temizleme cihazıdır. Seperatör Ünitesi ya tek bir büyük hücre veya paralel yada seri birkaç adet tüp biçimli hücreler yada blovere benzer dinamik bir ünite olabilir. Ünitelerin paralel yerleştirilmesi hacimsel kapasiteyi arttırırken, seri bağlı üniteler ayrıştırma verimini arttırır. Siklon seperatörlerin iki ana tipi aksiyel kanatlı ve helezoni tiplerdir. İkisi arasındaki tek fark yeterli dönel hareket oluşturmak için silindirik hücreye gazın giriş metodudur. Şekil (3.14a) 'da gösterilen basit kuru siklon seperatörde dairesel hareket gaz girişinin teğet olmasıyla sağlanmıştır. Dikdörtgen helezoni girişin iç yüzeyi silindire teğettir ve  $180^{\circ}$  lik bir açı altında tedrici olarak silindire birleşecek şekilde dizayn edilmiştir. Şekil(3.14b) aksiyel kanatlı siklonu gösteriyor. Burada dönel hareket aşağıya doğru inen kirli gaza çevresel yer alması kanatlar tarafından verilir. Her iki halde de çalışma yönü değiştirilen gaz akımı içerisinde partiküllerin düz bir hız üzerinde gitme eğilimine ataletlorine bağlıdır. Yüksek hızdaki, hıza bağlı olarak oluşacak santrifüj kuvvet partikülleri koni yada silindirin dış çeperine doğru fırlatar. Partikül sonra duvar boyunca aşağı doğru toplama kabına kayar.

Siklon seperatörler  $10\mu$  yada daha büyük partiküllere ayırmak için kullanılırlar. Bununla birlikte klasik siklon seperatörler, partikül boyutu  $25\mu$  yada daha büyük olmadığı sürece nadiren  $990$  verimin üzerine çıkabilişler. Boyutu  $5\mu$  'un altındaki partiküllerde etkili olan yüksek verimli siklonlarda vardır. Tasarımı ne olursa olsun herhangi bir siklon ayırma verimi, belli bir partikül boyutundan sonra aniden biter. Birkaç değişik tip siklon için kaydedilen Şekil(3.15)'deki grafik bu durumu gösteriyor. Büyük hacimsel kapasiteler verimin azalmasına yol açar. Belki büyük partiküller için bir ön temizleyici konulabilir. Tablo 3.2 'de siklon verimlerini gösterebilecek değerler verilmiştir.



(b)

Şekil 3.14. (a) Siklon ayırıcı şematik gösterimi  
 (b) Çoklu siklon ayırıcı (Warner, 1976).



Şekil 3.15. Değişik tip siklonlar için parçacık boyut oranı ile fraksiyonel toplama verimi (Warner, 1976).

Table 3.2. Siklon toplama verimleri (Warner, 1976).

| Parçacık boyutu $\mu m$ | Klasik Siklon | Yüksek verimli siklon |
|-------------------------|---------------|-----------------------|
| 5                       | 50            | 50 - 80               |
| 5-20                    | 50-80         | 80 - 95               |
| 15-50                   | 80-95         | 95 - 99               |
| 40                      | 95-99         | 95 - 99               |



Bazı siklonlar, topladığı partikül boyutuna ve kalına biçimine bağlı olarak birkaç grupta birden yer alabilir. Verilen bir siklon için verim değerini elde etmek için bazı yazarlar % 50 verimle toplanacak partiküllerin boyutlarına diğer parametrelere bağlayan denklemler vermişlerdir.

$$d_{p,50} = \left[ \frac{9\mu W_i}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho)} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

Burada;

$d_{p,50}$  : % 50 verimle toplanan partikülün boyutu

$\mu$  : Gaz vizkozitesi

$W_i$  : Siklon giriş genişliği

$N_e$  : Siklon içindeki etkin dönüş sayısı

$V_i$  : Gaz giriş hızı

$\rho_p$  : Partikül yoğunluğu

$\rho$  : Gaz yoğunluğudur.

Birimler yine birbirine uygun olmalıdır. Gerçek partikül boyutunun  $d_{p,50}$ 'ye göre grafiğe geçirirsek, genelleştirilmiş fraksiyonel toplama verimini elde ederiz. Böyle bir eğri şekli (3.16)'dadır.

Teorik olarak, toplama verimini etkileyen faktörlerin neler olduğuna partiküle etkileyen santrifüj kuvvetlerin sürüklenme kuvvetine oranından karar verilebilir. Bu boyutsuz sayının artışı ile toplama verimi artar. Bir partiküle etki eden santrifüj kuvveti şu şekilde verilir.

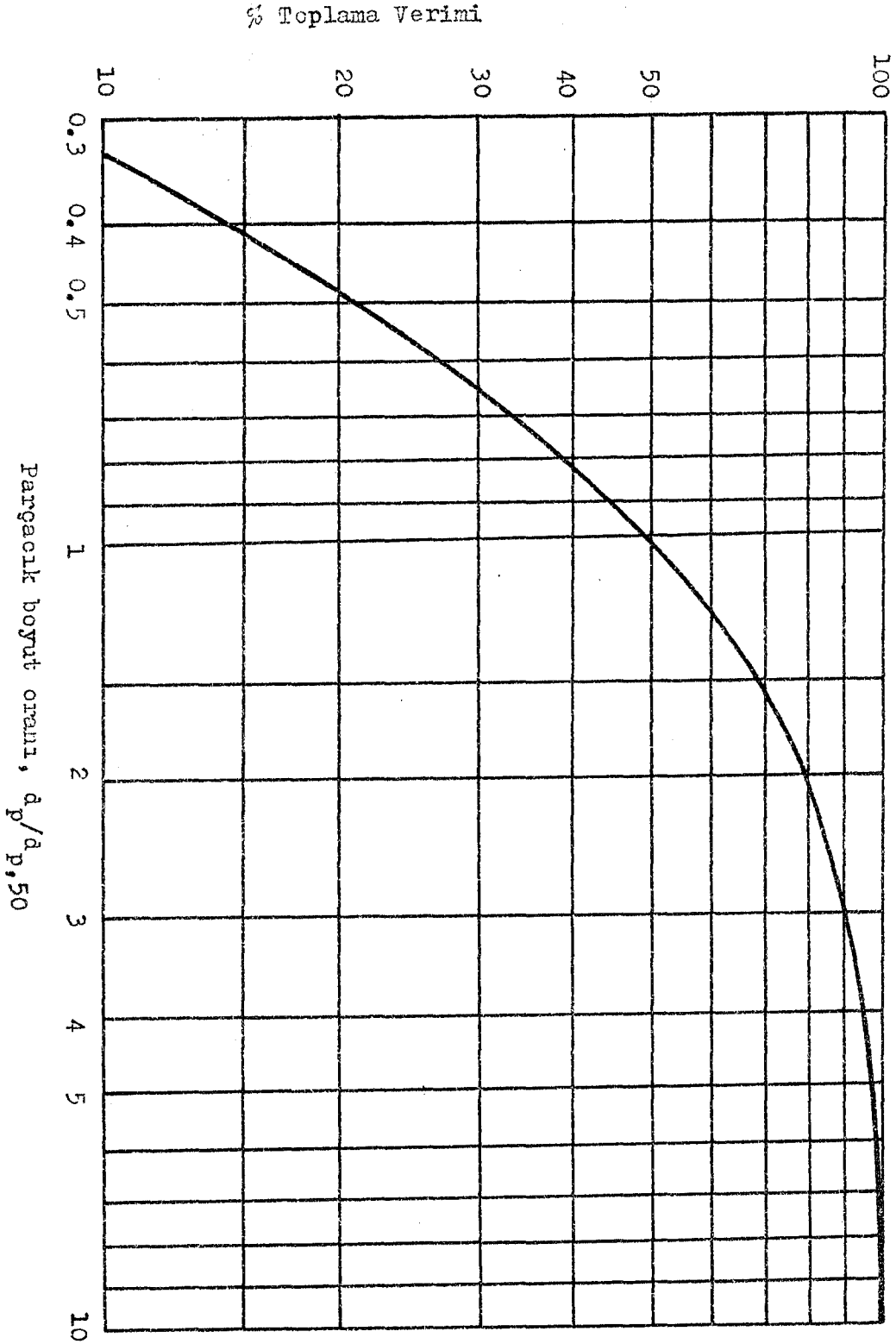
$$F_c = \frac{m_p v^2}{R} \approx \frac{\rho_p d_p^3 v^2}{R} \quad (3.5)$$

$R$  : Siklondaki dönüşün çapıdır.

Buna ek olarak Stokes Kanununun geçerli olduğu bölgede ( $d_p < 100\mu$ ) sürüklenme kuvveti

$$F_D = K_d \rho \mu_g V_p \quad (3.6)$$

biçiminde gösterilebilir.



Şekil 3.16. % Toplama verimi =  $f(\text{partikül boyut oranı})$  eğrisi (Warner, 1976).

Sonuç olarak toplama verimi, denklem (3.7) deki sağ uçta yer alan terimin artışıyla artar. Yani,

$$\eta_{col} = \frac{\text{santrifüj kuvvet}}{\text{sürüklenme kuvveti}} = \frac{v_p \rho_p d_p^2}{R \mu_g} \quad (3.7)$$

İlk yaklaşım olarak, toplama verimi giriş ve teğetsel hızdaki artışla, partikül yoğunluğu ve partikül çapıyla arttığını ve taşıyıcı gazın viskozitesi ve siklon çapıyla azaldığını söyleyebiliriz. (gaz viskozitesinin sıcaklıktaki artışla arttığı için). Denklem (3.7) den kolaylıkla neden küçük partiküllerin yüksek verimle tutulamadığını görebiliriz. Çünkü verim partikül çapının karesiyle orantılıdır. Ayrıca deneysel olarak siklon gövdesinin uzunluğu (yada vorteks sayısı) ile de toz yüküyle arttığı bulunmuştur. Siklon iç yüzeyinin pürüzsüz oluşuda önemli bir parametredir. Çünkü çeper cidarında türbilansdan kaçınılmalıdır. Son olarak yukarıdaki bağıntıdan, küçük çaplı siklonların büyük çaplılara göre daha verimli olduğunu görüyoruz. Ancak bu sonuç, fiziksel boyutları arasındaki oranın sabit olduğu siklon grubu için geçerlidir. Bazı boyutları değiştirmek suretiyle büyük çaplı siklon, küçük çaplıya nazaran çok daha verimli yapılabilir.

$$\Delta P = \frac{39,7 KQ^2 P^2}{T^2} \quad (3.8)$$

Burada gaz hızı Q ile direkt orantılı olduğundan basınç düşümü hızın karesiyle orantılıdır. Eğer başlangıçta, partikül hızı gaz hızına eşit alınırsa denklem (3.7)'den toplama veriminin gaz hızı ile doğru orantılı olacağını görürüz. O zaman toplama verimi ve basınç düşümü verilen bir araçta volümetrik hız ile direkt orantılıdır. Basit siklonlar için basınç düşümleri 0,5 ile 2 inç su sütunu arasında değişir. Oysa yüksek verimli siklonlarda basınç düşümü 2 ile 6 inç su sütunu arasındadır. (1" SS = 2,5 mbar.) 6, 8, 9 ve 10 inç'lik (15 ile 25cm arası) siklon boyutları çok yaygındır. Tipik giriş hızları 15 ile 20 m/sn ve her bir tüp için volümetrik hızlar 15 ile 30 m<sup>3</sup>/dak. dir. Hareketli parçalarının olmayışı ve tüplerin standardize edilmiş olması güvenilirlik ve basitliği arttırır. Bunlar yüksek verimli türler içinde en az pahalı olanlarıdır. Aksiyal kanatlı toplayıcıların dezavantajla-

arı arasında kanatlardaki erozyonu (özellikle aşındırıcı tozlarla çalışırken) ve kanat aralarının tıkanmasını sağlayabiliriz. Helezon siklonların en önemli dezavantajı, verimin yüksek olması istendikçe maliyetlerinin artmasıdır. O zaman çalısma karakteristikleri bekleneni verdiyse öncelikle, aksiyal kanatlı siklonlar seçilebilir. İki genel grup arasında daha başka farklılıklarda sayılabilir.

Sık sık siklon seperatörleri dizayn dışı geliştirilmeleri halindeki performansların hesap edilmesi gerekir. Eğer mümkünse kollektör eğrileri kullanılmalıdır. Fakat aşağıdaki yaklaşık bağıntılarda tahmin amaçları için kullanılabilir. Değişken akış hızları için

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left( \frac{Q_b}{Q_a} \right)^{0,5} \quad (3.9)$$

sabit gaz akış hızı için verim ve gaz vizkozitesi

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left( \frac{\mu_a}{\mu_b} \right)^{0,5} \quad (3.10)$$

bağıntısı ile birbirine bağlanır.

Değişken gaz yoğunluğu için

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left( \frac{\rho_p - \rho_{gb}}{\rho_p - \rho_{ga}} \right)^{0,5} \quad (3.11)$$

partikül yüzeylerinde orta değerlerde değişmeler varsa;

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} = \left( \frac{C_{bi}}{C_{ai}} \right)^{0,183} \quad (3.12)$$

burada a ve b; değişik çalışma şartlarını,

- $\eta$  ; toplama verimini (% ağırlık),
- $Q$  ; hacimsel akış hızı,
- $\mu$  ; gaz vizkozitesini,
- $\rho_p$  ; partikül yoğunluğunu

$\rho_g$ ; gaz yoğunluğunu,

C ; birim hacimdeki kütle cinsinden partikül yoğunluğunu gösteriyor.

Siklon ayırıcılarda ele alacağımız son tür dinamik göktürücülerdir. Burada da partiküllerin toplanması santrifüj kuvvetleri esasına dayanır. Bu kez santrifüj kuvvetler fanlar tarafından oluşturulur. Türbin kanadına benzer fan kanatlarının oluşturduğu kuvvetler aksenal olarak aldığı kirli gazı emir ve  $90^\circ$  döndürdükten sonra şekil(3.17)'de görüldüğü gibi radyal olarak dışa doğru yönlendirir. Aynı kapasiteye sahip siklonlar için; bu tür siklon, klasik siklonlara nazaran 7 kat değerlere ulaşabilen kuvvetler oluşturur. Toz partikülleri dışa doğru fırlatılır ve aracın çevresindeki ikincil bir hava akımı içinde toplanır. Alet santrifüj pompa gibi davranacağından içinde herhangi bir basınç düşümü olmaz. Yine de giriş gücü aynı kapasitedeki gerçek bir santrifüj pompadan daha yüksektir. Bu tür siklonlar ince partiküllerin toplanmasında, özellikle yiyecek ilaç ve ağaç işleri endüstrisinde geniş olarak kullanılırlar.

Alınış, kuruluş ve işletim maliyetleri diğer faktörlerinden etkili olmasına rağmen genelde kapasiteye bağlıdır.

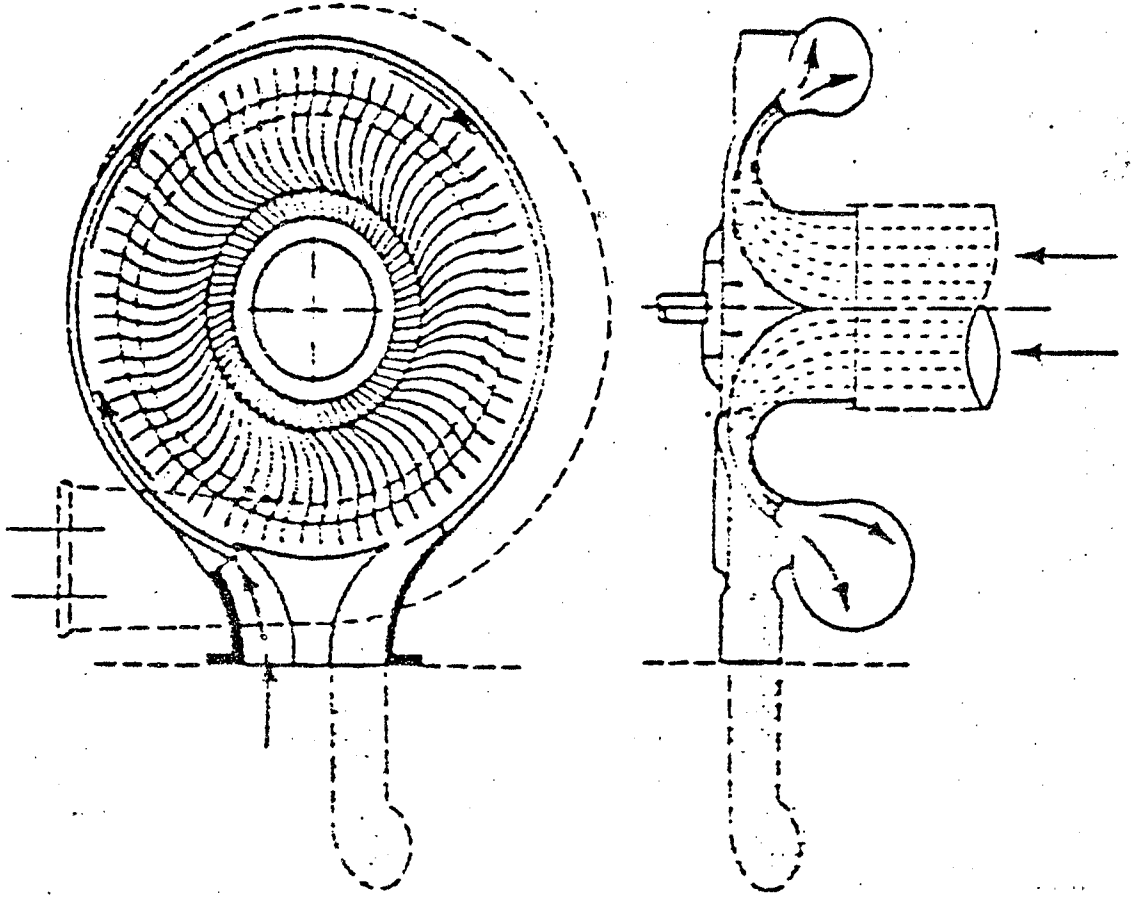
### 3.3.2.5. Hidrosiklonlar

Bu tip modern sınıflayıcılar genellikle hidrosiklon prensibine göre çalışır. Ayrıntılı konvansiyonel siklonlardan farklı olmasına rağmen temel çalışma prensibi aynıdır. Hidrosiklonların sağladığı ana üstünlük, giriş akışının daha iyi kontrol edilmesi ve türbilansın ortadan kaldırılması, ele alınan malzemeye uyacak oranlarda ve biçimlerde daha serbest ayarlama imkanıdır. Astarların kullanılmasında kritik ayırmalarda çok önemli olan pürüzsüz ve düzgün bir iç yüzey sağlar.

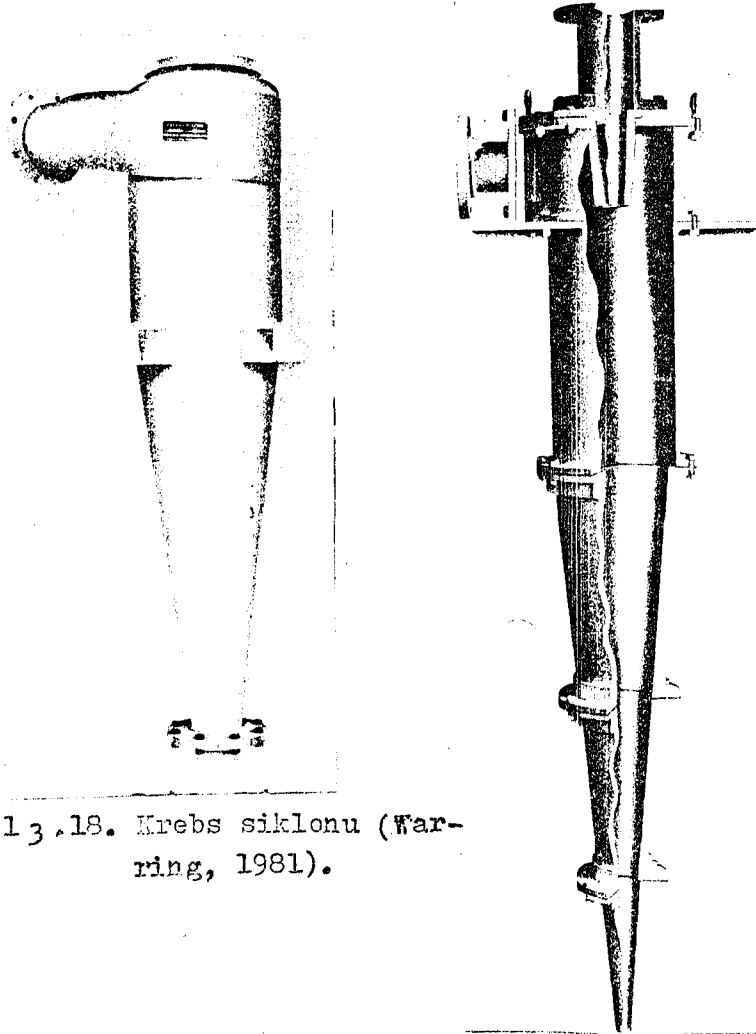
Tipik bir hidrosiklon şekil(3.18)'de gösterilmektedir. Tablo 3.3 de ise bu gibi ünitelerin tipik uygulamaları özetlenmektedir.

### 3.3.2.6. Sabit dalgalı ayırıcılar

Sabit dalgalı ayırıcı, farklı yoğunlukları fakat benzer ölçüleri olan bir zerre karışımı, bir akış yatağında bir likit akışı tarafından



Şekil 3.17. Dinamik çöktürücülerin şematik gösterimi (Warner, 1976)



Şekil 3.18. Krebs siklonu (Waring, 1981).

Tablo 3.3. Siklonların ve Hidrosiklonların Uygulama Alanları (Warring, 1981)

|   |  |
|---|--|
| <p>1. Partiküllerin büyüklüklerine göre ayrılması.</p>          | <p>a) Kristalleştirme sistemlerinden ölçülü kristallerin alınması, daha fazla konsantrasyon için taşma suretiyle geri dönüş sağlanması.</p> <p>b) Kalınlaştırıcı beslemelerde kabala tanelerin alınması ve topakların sarfiyatında önemli azalma sağlanması.</p> <p>c) Filtre beslemelerinin hazırlanması.</p> <p>d) İnce taneli ağındırmacıların hazırlanması.</p> <p>e) Seramik çamurunun hazırlanması.</p> <p>f) Filtre yatak kurumunun temizlenmesi.</p> |
| <p>2. Su veya süspansiyonların iri tanelerden temizlenmesi.</p> | <p>a) Su temininde kumdan arınma.</p> <p>b) Kağıt hamurundan iri tanelerin alınması.</p> <p>c) Çamurun çakılını alma.</p> <p>d) Süt veya kireci iri tanelerden temizleme.</p> <p>e) Meyve sularından tane temizleme.</p> <p>f) Yün temizleme işleminde tane ve pisliğin atılması.</p> <p>g) Pompalarda aşınmaya sebep olacak birikme çamurunu önlemek için pis maddelerin gökeltme havuzuna gönderilmeden önce iri tanelerden temizlenmesi.</p>              |
| <p>3. Kirecini alma.</p>  | <p>a) Taneli malzemelerden çok ince partiküllerin alınması.</p> <p>b) Beyazlatma işleminden sonra kirecini alma.</p>   |

Tablo 3, 3'ün devamı.

|  |  |
|--|--|
| <p>4. Kapalı devre taşıma:</p>                             | <p>c) İnşaat kumlarından toprağın temizlenmesi.</p> <p>d) Maden boşluğunun hazırlanması.</p> <p>Bu hidrosiklon uygulamasının en önemlisidir. Bunlar ağırlık gökçöktürme tipi sınıflandırıcılarından çok daha ucuzdur ve daha az yer işgal ederler. Daha hassas ayırımlar sağlarlar.</p> <p>Bir siklondaki yüksek ayırma kuvvetleri genellikle, diğer tip sınıflandırıcı veya filitrelerde yapılması mümkün olmayan ayırımlar yapmasını sağlar.</p> |
| <p>5. Eriyiklerin veya süspansiyonların hazırlanması :</p> | <p>Bir pompa haznesine kontrol edilen miktarlarda su ve katı beslenmesi yapmak ve bir siklon içine pompalamak suretiyle, bir mikser kullanmadan eriyikleri ve süspansiyonları çabuk bir şekilde hazırlamak mümkün olur. Bu sistem, siklon içindeki ayarlanabilir üst değeri karşılayan bir yoğunluk kontrol edicisi ile birlikte çok iyi çalışır.</p>  |
| <p>6. Özgül ağırlığa göre ayırma :</p>                     | <p>a) Şeker kamışı hülhasasından organik maddenin atılması.</p> <p>b) Fındığın kabuklarından ayrılması.</p> <p>c) Ortam olarak ağır bir süspansiyon kullanarak hafif ve ağır minerallerin ayrılması.</p>   |

hareket ettirilince zerrelerin ağırlıkları ve doğru orantılı hızlarda hareket edeceği ve en hafiflerinin en hızlı gideceği gerçeğine dayanır. Pratikte her ağırlık grubu birbirinden farklı dalgacıklar veya tepçikler meydana getirecek ve akış şartlarındaki değişimler farklı dalgacak biçimlerine yol açacaktır.



Şekil(3.19)'da pratikteki uygulanılışı gösterilmiştir. Su, borudan hızlı hareketli dairesel tabakalı desen halinde radyal olarak dağıldığı düz bir konveyör kayışı v.b. hareketli yatay yüzey üstüne sabit bir hızla boşaltılacak şekilde birinci (en yakın) huniye aktarılır. Boşalma noktasından belli bir uzaklıkta, tabakalı akış dairesel sabit bir dalga biçimine dönüşecektir.

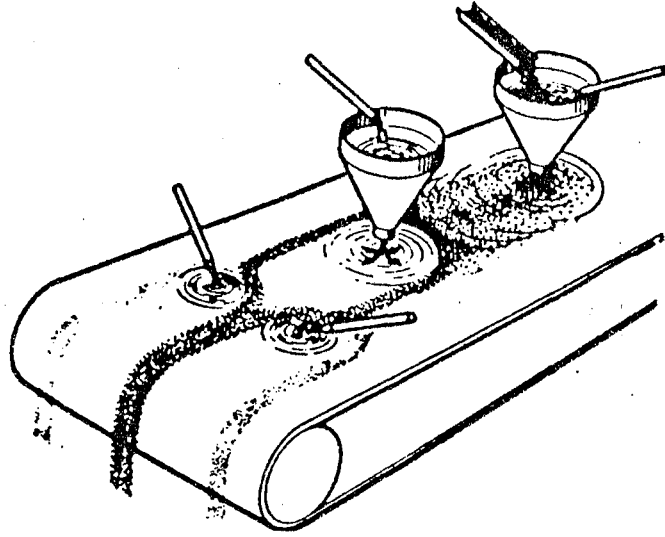
İkinci huniden su akışı içine sokulan hafif ve ağır zerrelerden meydana gelmiş sınıflandırılmış bir karışım, sabit dalga şeklinin çevresi etrafında ayrılacaktır. Ağır zerreler bu noktada bir dalgacık halinde birikirken; daha hafif olan zerreler ikinci bir dairesel dalgacık meydana getirecek şekilde sabit dalganın ilerisine taşınır. Hareketli kayışta meydana getirilen çevrim hızı ile kayış üzerinde farklı ağırlıklı zerrelerden oluşan iki farklı şerit ayrılacaktır.

Banyo besleme ayırıcısına uygulanan aynı sabit dalga şekil (3.20)'de gösterilmektedir.

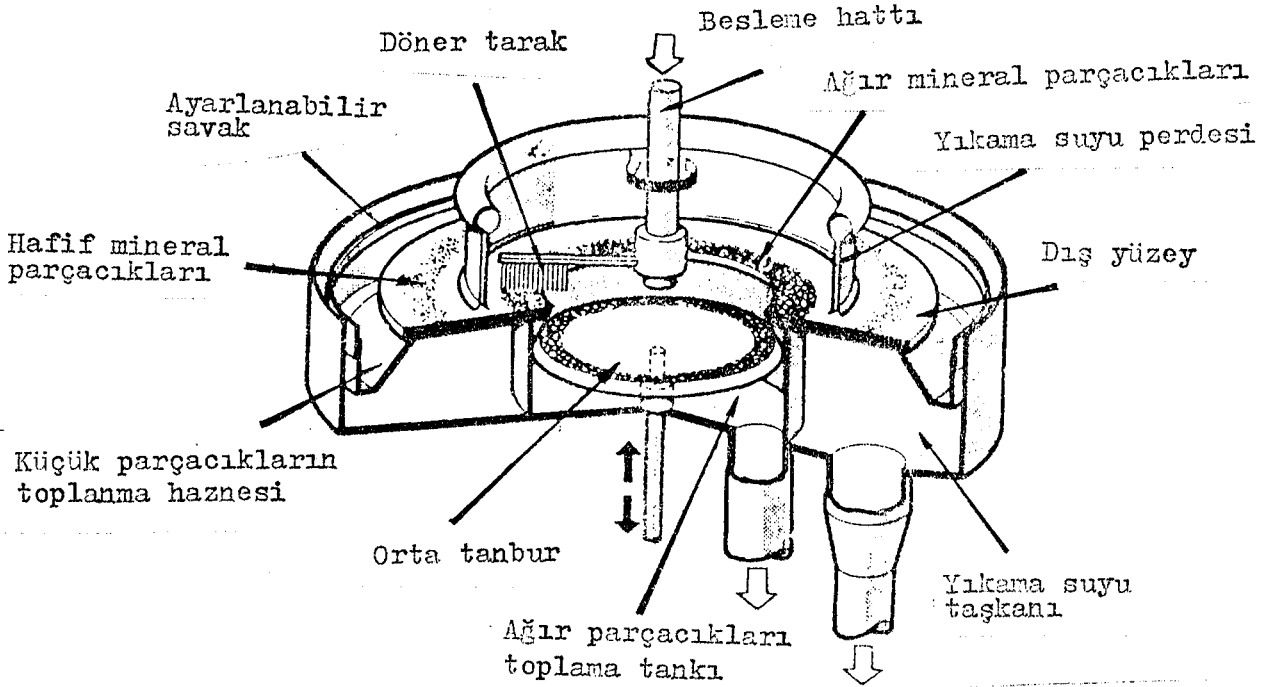
### 3.3.2.7. Aerodinamik temizleyiciler

Kama biçimli aerodinamik hücre esasına dayanan basit bir hava temizleyicisinin şekli Şekil(3.21)'de gösterilmektedir. Bu hücre, çıkış havasının akabileceği dar geçişler sağlayan eşit aralıklı yarıklardan ve birbirinin aynı olan duvarlardan meydana gelirler. Giriş havası hücrenin yüzüne yöneltilir ve daralma hacmi daralan duvarlar tarafından sağlanır. Bu hücrenin tamamlanması için içine kirli zerrelerin ve kaçak havanın geçebileceği kapalı bir bölüm vardır. Gerçekte bu kapalı bölüm bu gibi zerreleri toplayacak ve taşıyacak olan bir kanaldır.

Bu temizleyicinin çalışması Şekil (3.22) gösterilmektedir. Ana hava akışı doğrudan doğruya kama biçimli hücreye geçer. Bu havanın çoğunluğu daha sonra birden bire panjurla yan duvarlardan kaçmamak üzere yön değiştirir. Aynı zamanda doğru bir çizgiyi takip edecek olan atalet ayırması ile kirli zerreler ana akıştan atılır ve kaçak havayı gösteren hava akışının yaklaşık %10'u ile birlikte kaçak kanalı içinde birikir. Bu kaçak hava devamlı olarak kaçak kanalını süpürerek, pis zerreleri kanaldan alıp elverişli bir toplayıcıya (veya basit şekilde bunları atmosfere geri göndererek), kendi kendine bir temizleme



Şekil 3.19. Basit sabit dalgalı ayırıcı (Warring, 1981).



Şekil 3.20. Besleme hatlı sabit dalgalı ayırıcı (Warring, 1981).

fonksiyonu hızlandırmış olur.

Bu tip bir komple hava temizleyicisi bir veya daha fazla bağımsız hücrelerden meydana gelebilir ve her düzlemde çalışabilir. Yalnız düşey veya düşeye yakın konumlamada kaçak kanalın en alta konulması gerekir.

Değişik bir sistemde Şekil(3.23)'de gösterilen bir emme sistemidir. Bu durumda, gerekli olan kaçak hava akışını sağlamada en pratik ve en uygun metod genellikle küçük bir yardımcı üfleyici kullanmaktır. Gerekli olan kaçak üfleyici statik basıncı, yaklaşık olarak hücrenin direnci artı sürtünme ve kaçak kanalında bulunan diğer kayıplara eşit olacaktır.

Emme sisteminde yapılan daha başka bir değişiklik Şekil (3.24)'de gösterilmektedir. Bu sistem, bir gaz türbini veya kaçak hava akışı için bir enerji kaynağı olarak basınçlı havayı veya hızlı akan ekzos gazlarının varolduğu benzer tipteki makinelerin hava girişinde hava temizleme tertibatının kullanıldığı yerlerde üstünlük sağlayabilir.

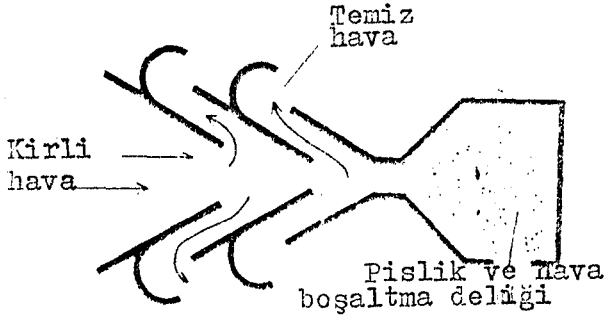
### 3.3.3. Filtreler ve ayırıcılar

Temelde filtre bir maddeyi diğerinden ayırmakta kullanılan bir cihazdır. Dolayısıyla filtrasyon, esas itibariyle, ayırma işlemidir. Bu bakış açısı filtrasyon kavramını filtrelerin kullanım alanının ötesine genişletir. Filtreleme amaçlı cihazların yaptığı görevlerden farklı görevler yapan ayırma cihazlarını da içine alır.

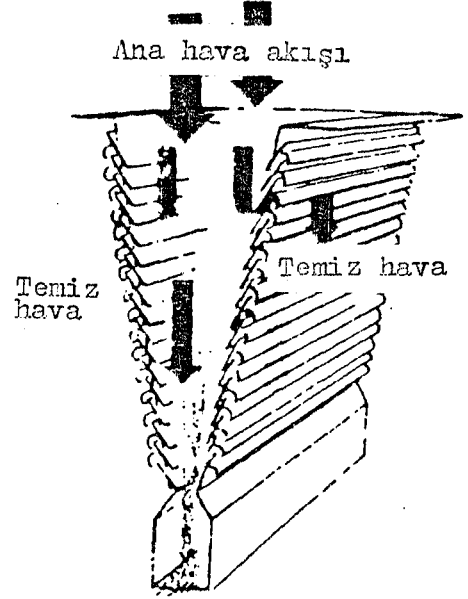
Ortaya iki problem çıkar; sınır nasıl yapılabilir ve çeşitli filtre ve ayırıcıları nasıl sınıflandırılır ve gruplanır. Her ikisine de kesin cevap verilemez. Fakat yine de, çeşitli filtrasyon ve ayırma metodları şu dört gruba girer.

1. Katı-gaz ayrıştırılması.
2. Katı-sıvı ayrıştırılması,
3. Sıvı-sıvı ayrıştırılması,
4. Katı-katı ayrıştırılması.

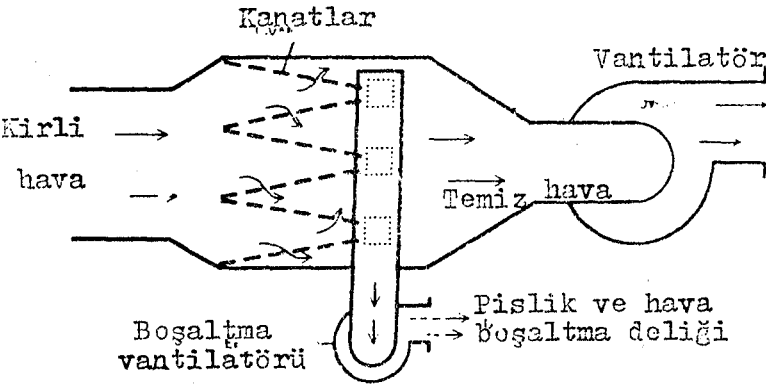
Katı-gaz ayrıştırılmasının önemli bir kısmı hava filtreleri ve hava filtreleme servisleri tarafından yapılır. Birincisi esas itiba-



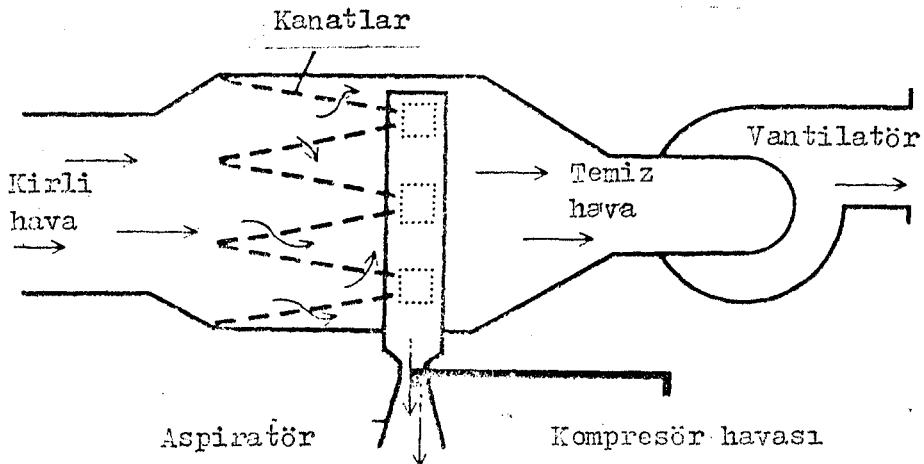
Şekil 3.21. Kanatlı hava temizleyici (Warring, 1981).



Şekil 3.22. Kanat hücreli temizleyici (Warring, 1981).



Şekil 3.23. Basıncılı kanatlı sistem (Warring, 1981).



Şekil 3.24. Basıncılı kanatlı sistem (Warring, 1981).

riyle filitreleri ve ikincisi seperatörleri, elektrostatik tutucuları, gaz ayırıcıları ve ayrıca gerekirse filitreleri kullanır.

Katı-sıvı filtrasyonu, boyutları birbirinden çok farklı çeyitli mekanik filitreleme araçlarının kapsamına girer. Özellikle proses endüstrilerinde kullanılan atalet kuvvetlerinden faydalanarak çalışan seperatörler ve kolaylıkla otomatik ve yarı otomatik hale getirilen başka metodlarda katı-sıvı ayırma işleminde kullanılır.

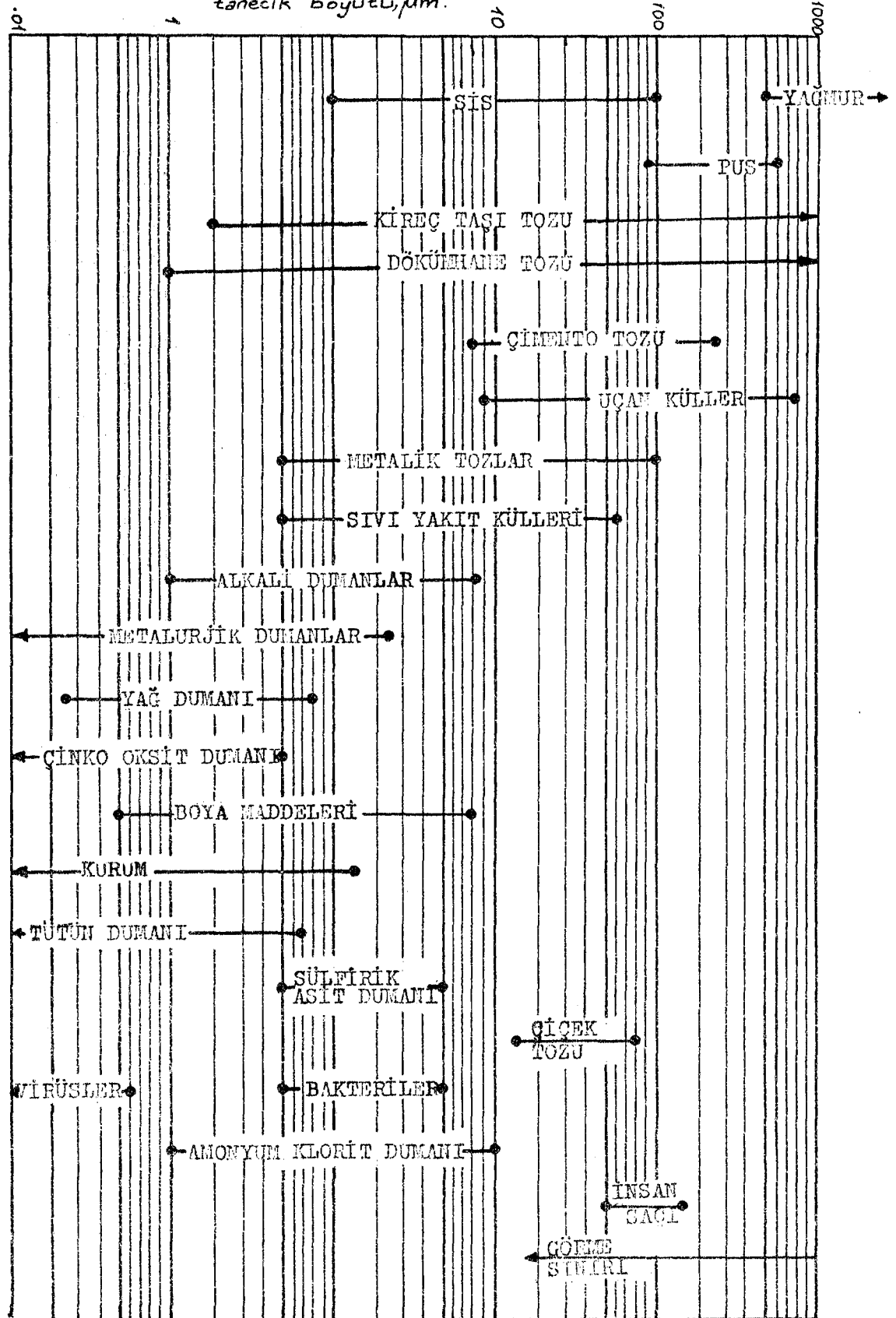
Sıvı-sıvı ve katı-katı ayrıştırılması işinde daha sınırlı tipte filitre ve ayırıcının başarıyla ve ekonomik olarak kullanılması mümkündür. Bu yüzden sınıflama filtrasyon ve ayırıcıların daha özel alanlarını kapsar.

Katı-katı ayrıştırmasının en basit örneği fiziksel boyutları farklı katıların elenmesi yöntemidir. Özellikle sıvı-sıvı prosesler için bu iki eksterm çözümlün dışında daha yüklü açıklanmaya ihtiyaç gösteren özel proseslerde vardır.

Aslında ana problem mümkün çözümlerin maliyet, verim ve ihtiyaçların ne olacağına cevap bulmaktır. Şekil(3.25)'de havada bulunabilecek kirletici partikül boyut alanları gösterir. Mevcut kirleticilerin tipi ve konsantrasyonu çevreye bağlıdır. Bir fabrikasyon toz tutucu en büyüklerinden 0,1  $\mu\text{m}$ .ye kadar değişen yada tabloda verilen tüm bölgeleri fakat ancak özel hallerde, temizlenebilir. Birçok halde basit bir panel filitre bile çok yeterli olmaktadır.

Filtrelerin özel bir tipi için filitreleme alanı, maliyet ve verim durumuna bağlı olarak değişebilir. Filtre incelidikçe kaba kirleticiler tarafından tıkanması kolaylaşır. Bu yüzden ince ve çok ince filitrelerin kullanılmasının gerekli olduğu birçok hallerde, kademeler halinde iki yada daha çok filtreyi gittikçe daha küçük partikülleri tutacak şekilde kullanmak maliyet ve verimlilik açısından olumlu sonuçlar verir. Bu filtreler farklı tiplerde olabilirler. Mesela 0,001  $\mu\text{m}$ . ye varan boyutlardaki partiküllerin dahi ayrıştığı (örneğin zarlı filitreler ve elektrostatik tutucular) bir çağda bile, elek ve süzgeçler birincil filitre olarak yerlerini korumaktadırlar. Filtrelerde, filitre malzemesinin uygunluğunda incelenmiş olması gerekir.

Şekil 3.25. Havada bulunabilecek kirleticilerin boyutları ((Warmin, 1900)  
tanecik boyutu,  $\mu\text{m}$ .



Sülfürik asit dumanları ve bakteriler boyut olarak hemen hemen aynı bölgeye düşer. 0,2-0,3 mikrometre arasında tutma özelliği olan çok ince bir filitre hava içinden her ikisinin de ayırabilir. Aynı şekilde, hem sülfürik asit hem bakterinin aynı filtreden geçmesi pratikte pek problem yaratmaz.

Ayrıca cihazlar tanımlanırken birbirine çok yakın tanımlar ortaya çıkar. Mesela atalet prensibiyle çalışan santrifüjler, siklonlar ve sık sık amaçlarına göre tanımlanan, sipesifik amaçlar için bir parça değiştirilmiş olmasına rağmen esas itibarıyla temel filitre ve seperatörler örneğin arıtma cihazları, bilhassa tek bir sıvı fazdan katı partiküllerin ayrılmasında kullanılır. Bu katı-sıvı ayırıştırma işi, özel ihtiyaçlara, kapasite ve araçlara bağlı olarak basit mekanik filitreler, ön kaplamalı filitreler, pres filitreler ve santrifüjlerin özel türleriyle yapılır. Diğer yandan purifier tanım olarak daha sınırlı bir alanı belirtir. Bu araçlar yoğun bir sıvıyı daha hafif olan bir diğerinden ayırır. Yani sıvı-sıvı ayırıcılardır. Aynı şekilde sınıflandırıcı, bir katı-katı ayırıcıdır yada öyle olmalıdır. Fakat tanım her zaman bu manada kullanılmaz. Bunlara ek olarak sürekli yapılan gelişmeler, özel tip filitre ve seperatörlerin uygulanabildikleri yerleri ve bu yerlerde de rekabet imkanlarını genişletmiştir.

Mesela santrifüj özellikle dinlendirme kablı santrifüj proses ve kimya endüstrisinde kullanılan pres filitreler ve başka tip filitrelerin önemli ölçüde yerini almaya başlamış, hatta yeni uygulama alanları bulmuştur. Bu eğilim pres filitrelerin mekanizasyon ve otomasyonunda sağlanacak etkili ilerlemelerle tersine çevrilebilir.

Bir çoğu gelişmiş teknolojiler gerektiren yeni filtrasyon problemleri ortaya çıkmaktadır. Buna bir ekstrem örnek nükleer gaz ünite-lerinin çok büyük ciddiyetle yapılması gereken filtrasyonu, bir başka örnek ise eczacılıkta bakteri ve mikro-canlıların alınmasıdır. Aynı derecede önemli bir başka problem, tabii ilaçların imalatında ihtiyaç duyulan sterilize edilmiş havadır. Bira, şarap ve sert olmayan içki imalatçıları da istenmeyen maya ve mikrop organizmaları ürünlerinden ayrılmasını isterler.

Böylece geniş bir alanda filtrasyona ihtiyaç doğar. Çünkü 0,2  $\mu$ m.

boyutundaki en küçük ve biraz daha iri 0,025  $\mu$ m. boyutundaki bakterilerin alınması gerekir. Fakat bazı makinalarda 50  $\mu$ m. mertebelerindeki aşındırıcı maddeler kabul edilebilir. Mekanik filitreler içinde elektrostatik tutucular ve seperatörler ilerlemeye müsait türlerdir.

Aynı şekilde malzemelerde çok büyük gelişme ve değişmeler yapılmaya çalışılmaktadır. Mekanik filitrelerde kullanılan bir çok geleneksel malzemeler maliyetlerin uygunluğu sebebiyle hala geçerliliklerini korumaktadırlar. Yeni malzemeler, esas itibariyle 5  $\mu$ m. den daha yukarı alanlarda yeni seçim imkanı tanımıştır. Düşük boyutlu kirleticiler için yeni malzeme ve teknikler, aspest fiberler dışında şimdiye kadar verimsiz olan korumayı temin etmiştir.

### 3.3.4. Elektrostatik göktürücüler

Gaz akımı içindeki parçacıklar elektrostatik alanda yüklenir ve alanın etkisiyle harekete geçerler. Elektrostatik alanda gaz iyonlarına etkileyen kuvvetler etkisinde oluşan gaz hareketinin parçacıklara momentum transferi ve stokes sürtünmesi sonucu parçacıklar bir ivme kazanır ve kısa sürede limit hıza erişirler. Silindirik yahut plaka cidarlar etrafında toplanan parçacıklar zaman zaman otomatik olarak döktürülürler. Olay iki adımda oluşur;

1. Gazın ionizasyonu ve parçacıkların yüklenmesi,
2. Akım yüklenen parçacıkların toplanması.

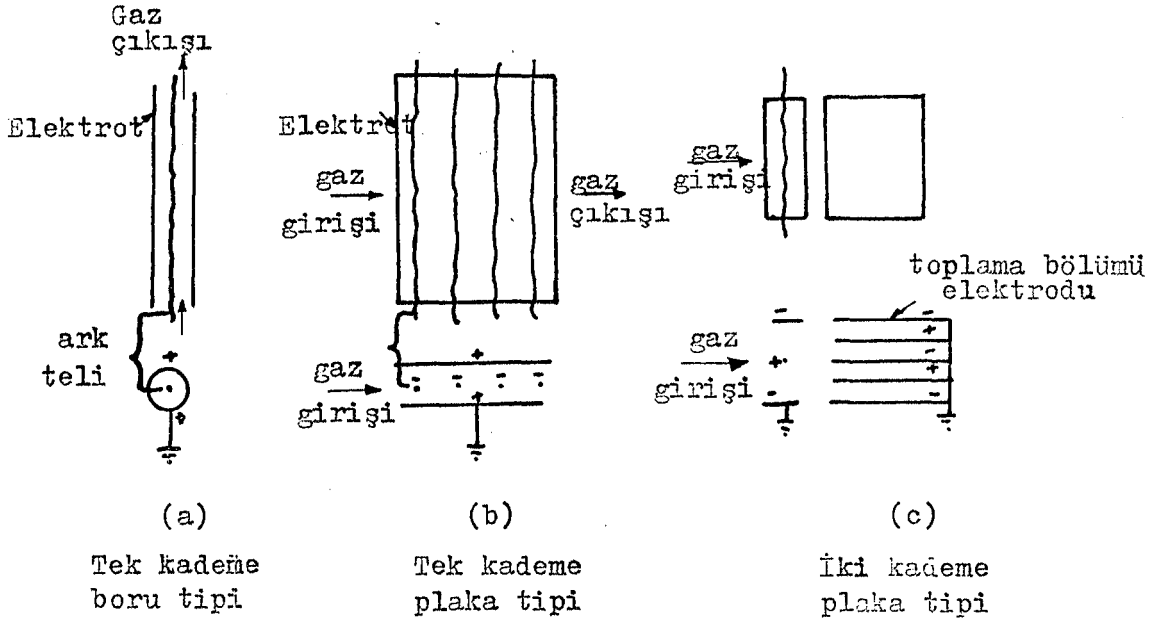
Bu adımların oluşum şekline göre iki tip filitre vardır;

1. İonizasyon + toplama komple bir ünite,
2. Birinci kademede ionizasyon ve ikinci kademede toplama işleminin yapılması.

Pratikte ark oluşturmada maksimum gerilim elde edilmek suretiyle hem yükleme hem de toplama potansiyeli yükseltilmeye çalışılır.

Bu filitrelerin verimleri toz konsantrasyonu ve parçacık büyüklüğü arttıkça azalır ve azaldıkça artar. Bu nedenle genellikle bir ön toz tutucu ile birlikte çalıştırılırlar. Bir çok kullanım alanları vardır.





Şekil 3.26. Basit tip elektrostatik çöktürücü şemaları (Pancar, 1987).

Tek kademeli olanların verimleri yüksek, maliyetleri pahalıdır. Ağır toz yüklerinde çalıştırılırlar.

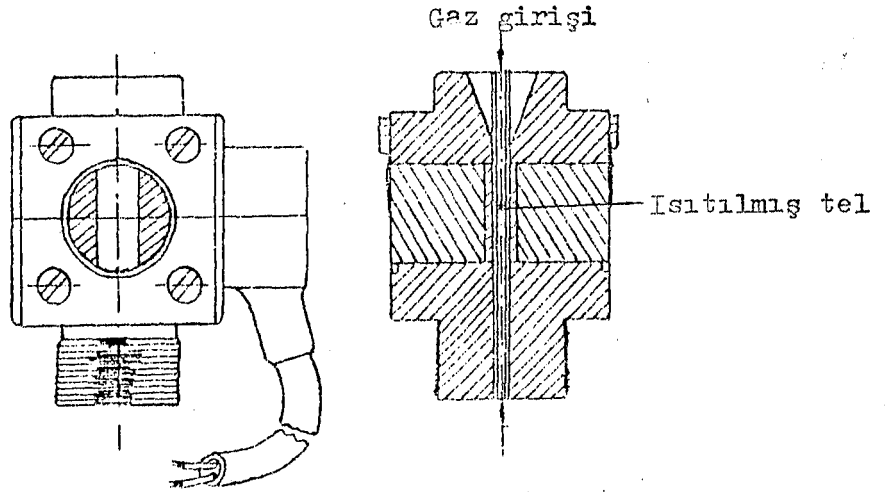
İki kademeli olanlar daha kompakt olup genellikle hava şartlandırılmalarında kullanılırlar.

### 3.3.5. Termal tutucular

Isıtılmış yüzeyler civarında molekül çarpmaları parçacıkları bu yüzeylerden uzaklaştırır. Büyük uygulama alanları yoktur. Toz numunesi alma sistemlerinde kullanılırlar. Şekil(3.27)'de bir uygulaması görülmektedir.

### 3.3.6. Sonik tutucular

Yüksek şiddetli akustik titreşim, çok ince tozların (duman) flokule edilmesine ve kolaylıkla toplanmasına neden olabilir. Genel olarak 1.000-10.000 Hz frekanslar kullanılır.



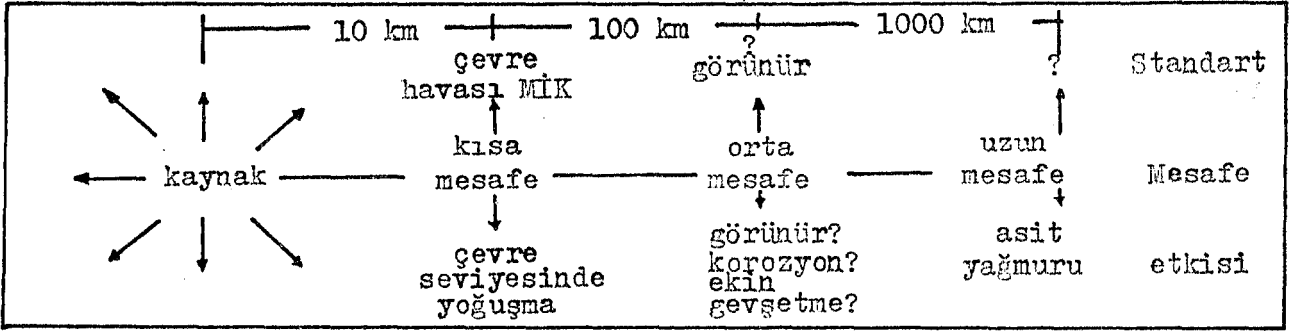
Şekil 3.27. Basit termal toz tutucu (Avcı, 1985).

### 3.4. Hava Kalitesinin Kontrol Mekanizması

Kirlenmeye neden olan kaynağın ve kirlenen atmosferin kontrol edilmesi bir yöntem gerektirir. Öyleki çevre ve etkileşim alanları için kirletici sınırları, standartlar, emisyon kaynakları, emisyon öncesi önlemler vs. gözönünde bulundurulmalıdır. Yakıtlar için yandıma öncesi ve sonrası davranışlarına göre yakıt kalitesi standardı, yakıt girdisine göre emisyon standardı ve gerekli kontrol sistemi, emisyon noktası (baca) yüksekliği, baca şekli, gaz çıkış hızı, gaz çıkış sıcaklığı ve çevre havası için standartlar koyma kirletici kaynakların ve çevre havasının kontrolunda önemli ve gerekli bir önlemdir.

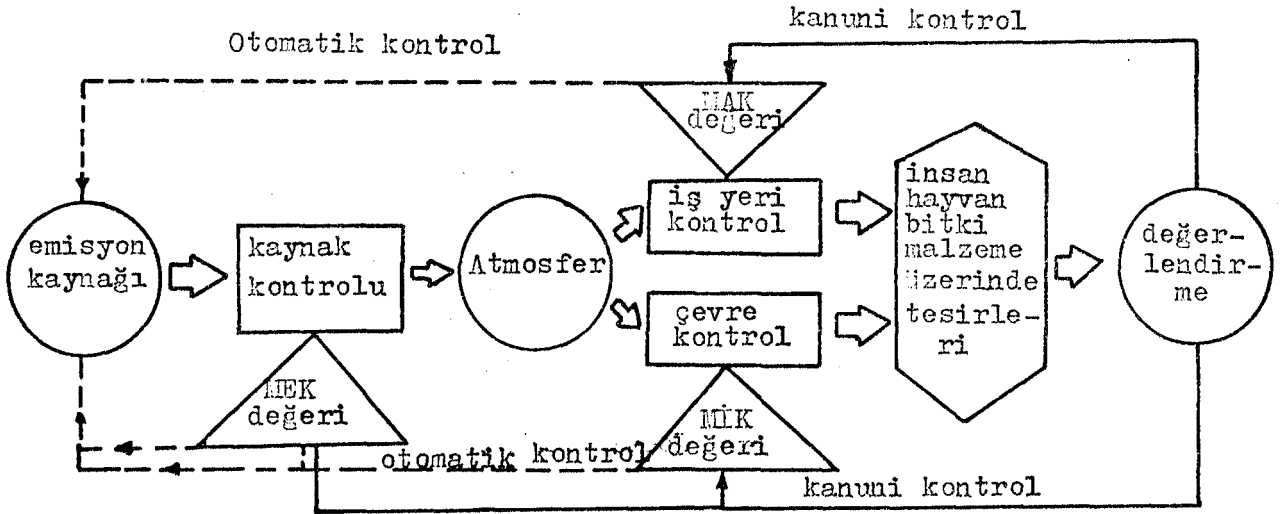
Emisyon kaynaklarından çıkan kirleticiler binlerce kilometre uzaklıklara kadar yayılabilmektedir. Bu yayılım etkisi Şekil(3.28)'de görülmektedir. Görüldüğü gibi kaynağın 100 km'den daha uzaklara ait bir çok etkisi olmakta ise de bunlar için standartlar yoktur. Gerçekte bu etkileşim alanlarında ölçümler yapılarak çevreye olan etkilerinin asgariye indirilmesi ve bunu sağlamak için kaynak kontrolunda optimum çözüme gidilmesi gerekir.

Şekil(3.29)'de basit hava kalitesi kontrol mekanizması görülmektedir. Çeşitli standartlarla çevredeki kirletici nisbetleri değerlendiril-



Şekil 3.28. Kaynak emisyonunun atmosferde etkisi ve etki mesafesine ait şema (Avcı, 1985).

rilmekte ve bunun sonucu otomatik olarak kaynak kontrolüne gidilmektedir.



Şekil 3.29. Hava kalitesi kontrol mekanizması şeması (Avcı, 1985).

### 3.5. Kontrol Araçlarının Uygulamada Durumu

Kirlenme kontrolünde kullanılan bir çok kontrol aracı vardır. Bunlar arasında parçacık kirlenmesini oluşturan kaynakların kontrolünde amaca uygun olarak değişik tip metodlar kullanılır. Endüstride toz yükü ve parçacık büyüklüğüne bağlı olarak kullanılan bazı toz toplayıcılara ait veriler Tablo 3.4'de gösterilmektedir.

Tablo3 .4. Uygulamada kontrol araçları (Avcı, 1985).  
 (1:Tek siklon hali,2:Çoklu siklon hali, 3:Elektrostatik  
 çöktürücü, 4:Pilitreler, 5:Yıkayıcı toz tutucular.  
 a:Sık sık, b:Ara sıra, c:Seyrek, d:Hiçbir zaman)

| Kirletici kaynak                   | toz yükü      | parçacık büyüklüğü | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------------|---------------|--------------------|---|---|---|---|---|
| Kömür üretim end.<br>Malzeme nakli | orta          | orta               | C | B | D | A | A |
| Depo havalandırma                  | orta          | ince               | B | A | D | A | B |
| Öğütme, ufalama                    | ağır          | orta               | A | A | D | A | B |
| Kurutma                            | ağır          | ince               | C | B | D | D | A |
| Maden üretimi                      |               |                    |   |   |   |   |   |
| Maden nakli                        | orta          | orta               | C | B | B | A | A |
| Fırında kurutma                    | orta          | orta-iri           | A | A | B | C | A |
| Çimento fırını                     | ağır          | orta-ince          | C | A | A | D | C |
| Çimento öğütme                     | orta          | ince               | C | C | C | A | D |
| Güç sistemlerinde                  |               |                    |   |   |   |   |   |
| Kömür yakma                        |               |                    |   |   |   |   |   |
| Zincirli ızgara                    | hafif         | ince               | D | C | D | D | D |
| Stokerli                           | orta          | kaba-ince          | C | A | C | D | D |
| Pülverize                          | ağır          | ince               | C | A | A | D | D |
| Dökümhanelerde                     |               |                    |   |   |   |   |   |
| Silme                              | orta          | ince               | C | C | D | C | A |
| Kum nakli                          | orta          | orta-ince          | C | C | D | C | A |
| Kalıplama                          | ağır          | orta-kaba          | D | D | D | A | A |
| Temizleme                          | orta-<br>ağır | orta-ince          | D | B | D | A | A |
| Un ve yem değir-<br>menleri        |               |                    |   |   |   |   |   |
| Hububat nakli                      | hafif         | orta               | A | B | D | A | C |
| Hububat kurutucu                   | hafif         | kaba               | D | D | D | D | D |
| Un tozları                         | orta          | orta               | A | A | D | A | B |
| Yem değirmenleri                   | ağır          | orta               | A | A | D | A | B |
| Çelik üretimi                      |               |                    |   |   |   |   |   |
| Elektrik fırını                    | hafif         | ince               | D | D | C | A | A |
| Eritme fırını                      | ağır          | kaba-ince          | A | C | A | D | A |
| Açık ocak                          | orta          | kaba-ince          | D | D | A | C | C |
| Demir ocakçı                       | orta          | kaba-ince          | C | C | B | B | A |
| Kereste sanayi                     |               |                    |   |   |   |   |   |
| Ağaç doğrama                       | orta          | kaba-ince          | A | B | D | A | C |
| Zımparalama                        | orta          | ince               | A | B | D | A | B |
| Taşlama                            | ağır          | kaba-ince          | A | C | D | B | B |
| Kauçuk üretimi                     |               |                    |   |   |   |   |   |
| Harmanlama                         | hafif         | ince               | D | D | D | A | A |
| Taşlama                            | orta          | kaba               | A | A | D | A | A |

## 4. SIKLONLAR

### 4.1. Siklonlarda Ana Özellikler

Oldukça kaba tozların toplanmasında tercih edilen toplayıcılar içinde ucuz konstrüksiyon, yüksek çalışma verimi ve düşük bakım masraflarından dolayı siklon ayrıştırıcılar en çok kullanılan tür olarak bilinir. Toplanabilecek malzeme denince akla, uçucu kazan külü, tescim talaşı, çimento tozu, petrol rafinerisi artıkları, plastikler, gübre tozları, yiyecek tozları vb. gelir. Kuru tozlarla uğraşıldığı sürece siklonlar daima kullanım sahası bulurlar. Şekil 4.1'de gösterilen tür olmak üzere, en çok tercih edilen siklon geri akışlı siklondur. Toz yüklü hava, üstte bulunan giriş ağzından siklona girer. Bu bölge silindriktir. Akış aşağıdaki konik bölgeye helisler çizecek şekilde, inme eksene doğru artan dönme hızıyla devam eder. Sonunda hava aksenel konumda yerleştirilmiş çıkış ağzından atılır. Dönmeyle ortaya çıkan santrifüj kuvvetin etkisiyle aslı bulunan toz partikülleri aşağıya doğru itilip altta bulunan toz bunkerinde toplanırlar.

Siklonun ana dizayn parametreleri Şekil(4.1)'de gösterilmiştir.  $r_E$ ,siklon eksenine giriş açıklığının merkez hattı arasındaki radyal mesafedir. Çıkışın konik odacığına kadar indirilmesiyle oluşturulan hayali silindir boyu H dır. Diğer semboller şekilde izah edilmektedir. Siklona teğetsel giriş çeşitli şekiller alabilir. Bunlar sırasıyla;

a) Şekil(4.1 . b)'de gösterildiği gibi giriş  $D_1$  çapı içinde bulunmaktadır.

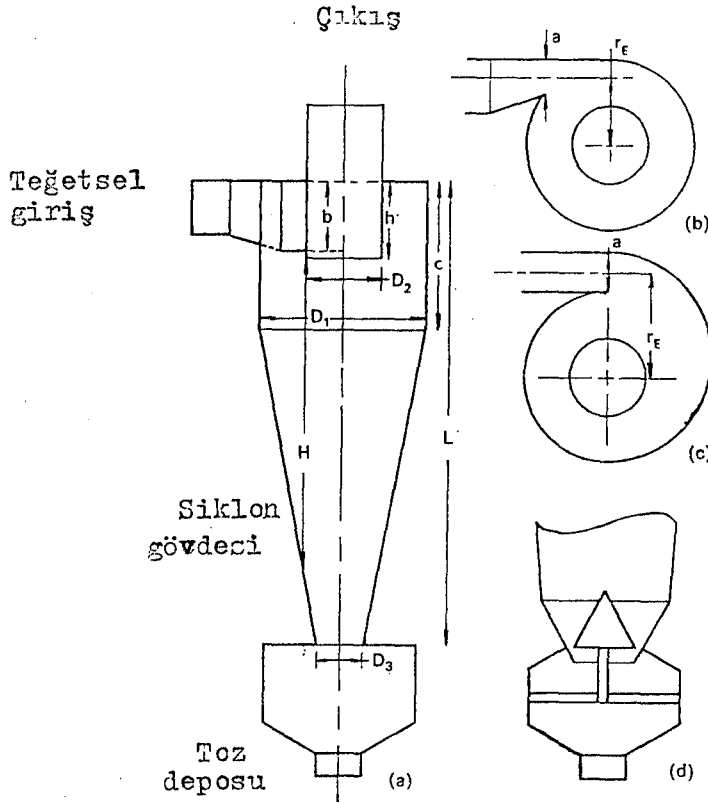
b) Alternatif olarak, hava (c)'de gösterildiği üzere dışta bulunan helisel bir kıvrımdan gelir.

c) Veya dizayn (b) ve (c) arasında bir şekil olabilir. Bazen de üç boyutlu eğimli giriş kullanılır. (a) şeklinde gösterildiği üzere toplanan toz altta bulunan toz bunkerinde toplanıp dışarıya alınır. Gaz çıkış ucuna bazen konik bir şekil verilerek çapın çıkış ucuna doğru artması sağlanır.

Siklon dizaynında daha bir çok değişiklikler söz konusudur. Bazen teğetsel giriş yerine çıkış menfezi ile dış silindir arasına sap-

tırıcı kanatlar konulabilir. Çıkış menfezi girişin tam tersine olacak şekilde monte edilebilir, böylece geçiş toz toplama odasında geçecektir. (üniform siklon) bu türde bir siklon çift uçlu ve merkezde teğetsel girişte olabilir. Verim, ayrılmış toz boyunca gaz akımı sağlamakla ve bunun ikinci kollektörden geçirmekle arttırılabilir. Küçük hacimli gaz söz konusu olduğundan, ikinci kollektörde büyük basınç düşümü kabul edilebilir.

Siklonlar, toz numunesi toplamaları hariç olmak üzere 10 mm ile 5m çapında yapılırlar ve bunlardan geçecek debi yaklaşık  $3 \times 10^{-5}$  ile  $15 \text{ m}^3/\text{sn.}$  olabilmektedir.  $1000^\circ\text{C}$  ve 500 atm'e kadar çalıştırılabilirler. Basınç düşümü ise genellikle 10 ile 200 mmSS mertebesindedir. Gaz giriş hızı ise 10 ile 30 m/sn. arasında değişmektedir. İç vorteks de partiküller üzerinde etkili santrifüj kuvvetler yer çekiminin binlerce karesine eşit olabilmektedir.



Şekil 4.1. Siklonun şematik olarak gösterilişi: a) Düzey kesit hali b) Teğetsel giriş hali, c) Helisel girişli hali ( $130^\circ$ ), d) Toz bunkerine dairesel bir şekilde toz gönderme (Dorman, 1974).

Normal şartlar altında, 20  $\mu\text{m}$ . çaptan daha büyük partiküllerin tutulması rahatlıkla yapılırken, 5  $\mu\text{m}$ . çapındaki partiküllerin alınması ise % 50 mertebesinde olabilir. Bu yüzde değeri tabii ki siklon boyutuna ve çalışma şartlarına bağlıdır. Ayrıca tozun yoğunluğu da etkili faktörlerden birisidir. Küçük çaplı siklonlarla 1 ile 2  $\mu\text{m}$  mertebesine kadar ulaşıldığı gözlenmiştir.

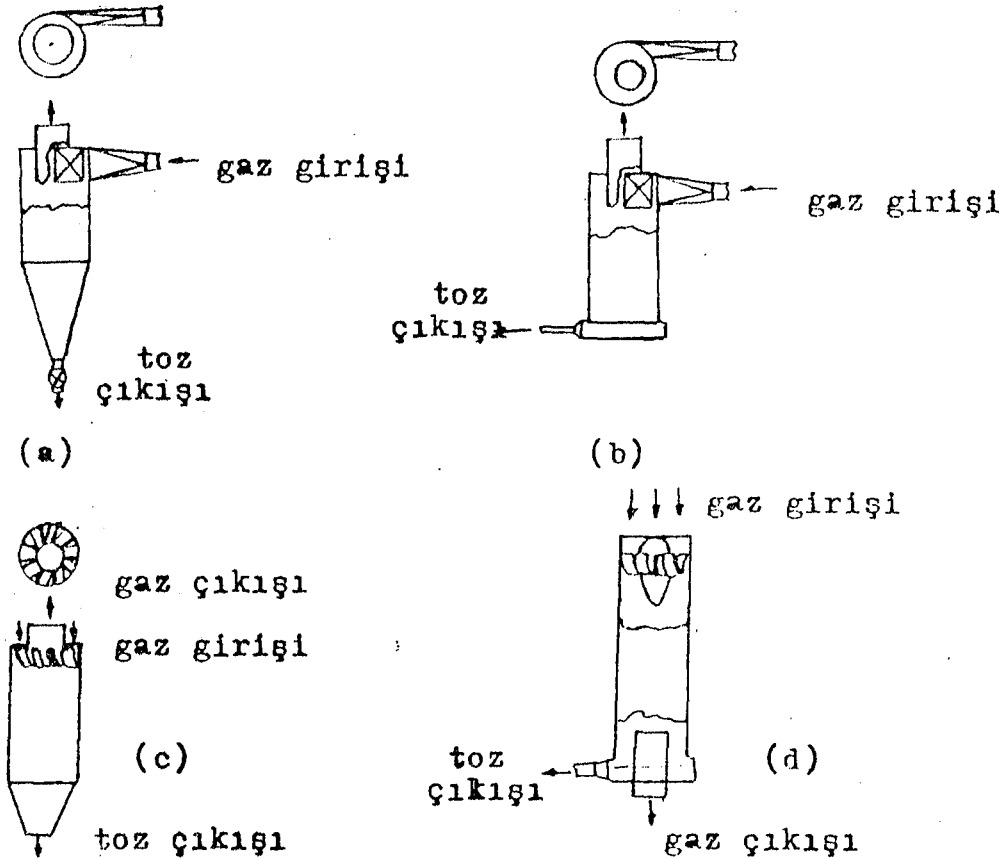
#### 4.2. Siklonların Tasnifi

Siklonları cidar şeklini, yapılarına göre, gruplanış şekline göre ve diğer şekillerde tasnif etmek mümkündür.

Cidar şekline göre eliptik ve dairesel olarak ikiye ayrılır.

Gruplanış şekline göre; paralel, seri, tek ve karmagık siklonlar olarak dörde ayrılır.

Yapılarına göre ise Şekil(4.2)'de görüldüğü gibi dörde ayrılır.



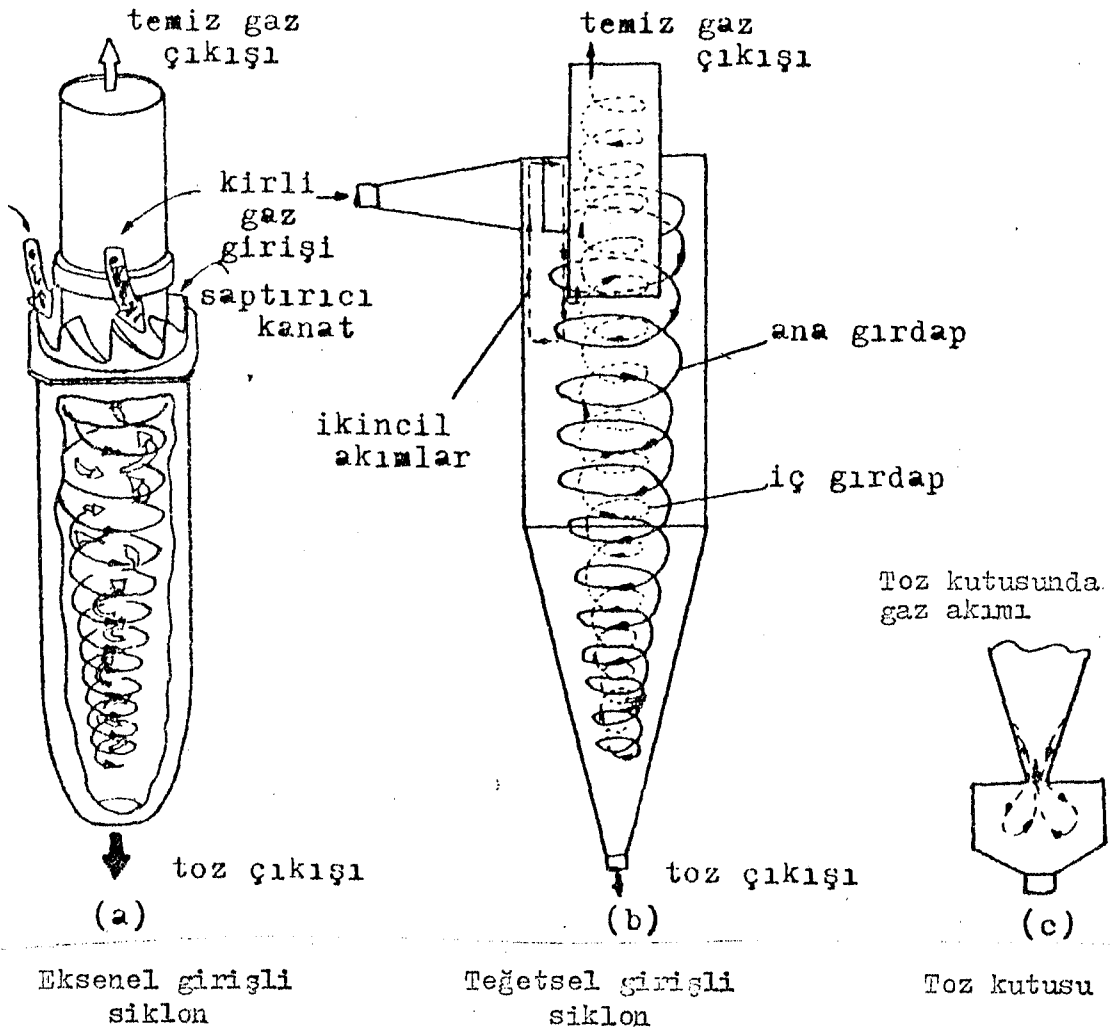
Şekil 4.2. Yapılarına göre siklonlar; a) Teğetsel girişli aksenal toz boşaltmalı siklonlar, b) Teğetsel girişli cidardan toz boşaltmalı siklonlar, c) Aksenal girişli aksenal toz boşaltmalı siklonlar, d) aksenal girişli cidardan toz boşaltmalı siklonlar (Avcı, 1985).

#### 4.3. Siklonlarda Hava Akımının İncelenmesi

Siklonlar basit bir yapıya sahip olmalarına rağmen akım şekilleri karmaşıktır. Bu nedenle komple bir teori geliştirilememiştir. Ancak deneysel bilgiler ve basitleştirilmiş teoriler vardır.

Siklonları incelerken örnek olarak teğetsel girişli, aksenal toz boşaltmalı siklon tipi gözönüne alınacaktır.

Siklona teğetsel giren gaz akımı gövde cidarı boyunca dönererek spiral bir hareketle koni ucuna veya toz kutusu girişine kadar alçalır. Şekil(4.3)'de görüldüğü gibi bu ana girdap adını alır. Koni ucuna inen gaz akımı aynı yönde ve ters doğrultuda hareketle çıkış borusuna yönelerek çıkış borusu ile siklonu terk eder. Bu akım iç girdap



Şekil 4.3. Siklonlarda gaz akımı ve ikincil akımlar (Avcı, 1985).



adını alır. Teğetsel girişli siklonlarda şekil(4.3)'de görüldüğü gibi hemen girişin altından başlayarak siklon cidarı boyunca tavana ve tavandan çıkış borusu boyunca aşağı yönde bir akım oluşur. Bu akımın bir kısmı çıkışa bir kısmı ise girdabın içine yönelir. Bundan başka ikinci akımlar daha tanımlanmış olmakla beraber yaygın olarak kabul görmemişlerdir. Girişten başka toz kutusu içinde de önemli derecede girdap oluşmakta, tozların girdapla sürüklenerek geri çıkışlarını sağlayarak verimin düşmesine neden olmaktadır. Eksenel girişlilerde ana girdap saptırıcı kanatlarla oluşturulmaktadır. Bunlarda girişte oluşan ikinci akımlar yoktur.

Siklonlarda gaz akımını incelemek üzere Linden (1949) tarafından deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucu şekil(4.4)'de görülen hız ve basınç dağılımlarını elde etmiştir. Bu verilere göre açısız ve radyal hızın tüm yükseklik boyunca yaklaşık sabit olduğu ve teğetsel hızın yaklaşık olarak çıkış borusu çapının yarısı civarında maksimuma ulaştığı görülür. Eksenel hız ise çıkış borusuna yaklaştıkça artmaktadır. İç girdap göbek çapı çıkış borusu çapının yaklaşık 0,2-0,4 katı civarındadır. Girdaplı hareket esnasında partikül siklon içinde 2-10 tur yapar (Avcı, 1985).

Akımın bu şekilde karmaşık olması kolay bir teori analizini mümkün kılmanmaktadır. Bu nedenle olayı daha basite indirgeyerek görmek mümkündür, ancak bu çözümün olayı ne derece açıklayacağı tartışılabilir.

Siklon içinde, giriş ve çıkışında oluşan akım ideal ve daimi olsun. Akımda oluşan radyal hızlar teğetsel hızlara göre çok küçük olduğundan ihmal edilsin. Giriş ile çıkış arasındaki seviye farkını da ihmal edersek olayın analizi kolaylaşacaktır.

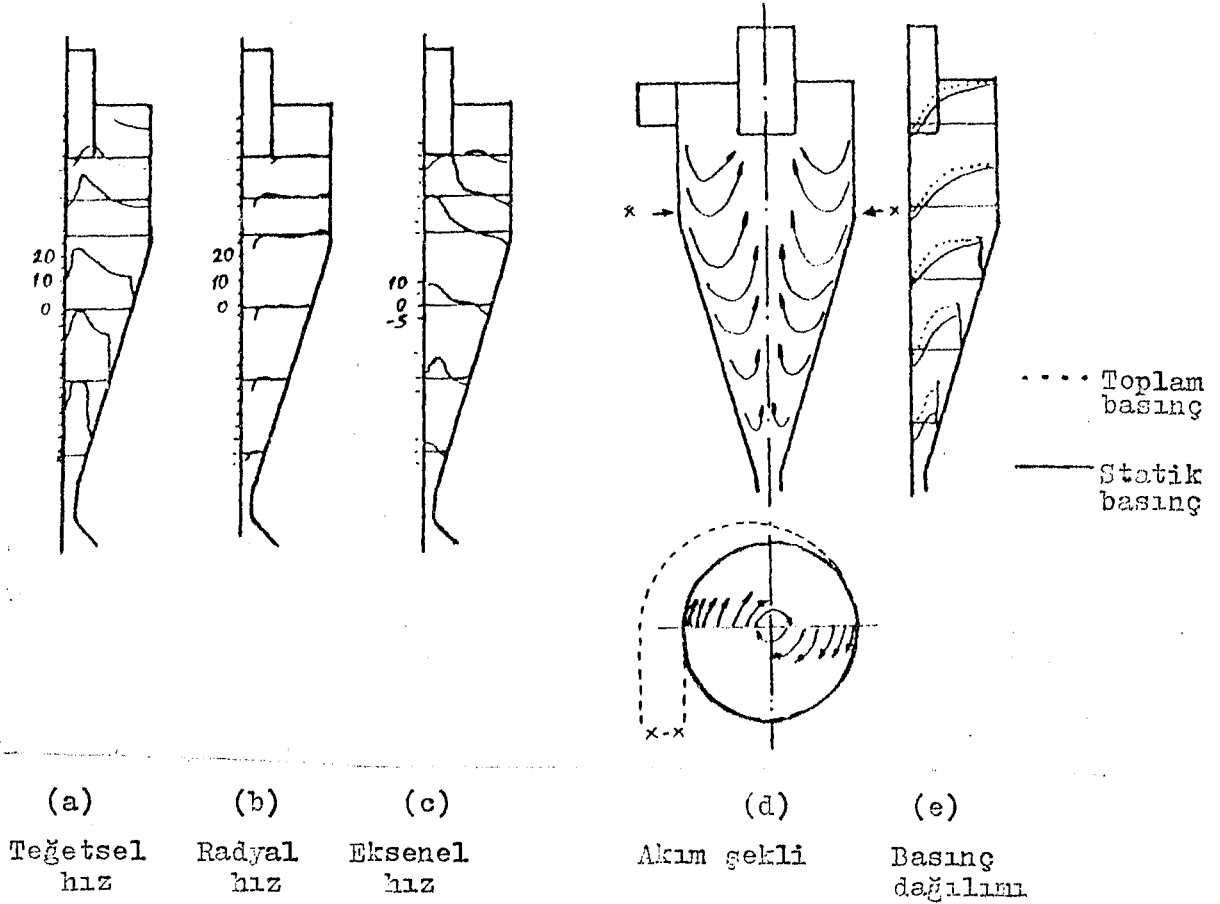
Silindirik koordinatlarda hareket denklemini yazarak radyal yönde izdüşümü alınır;

$$\frac{1}{\rho} \text{grad} \vec{P} = - \frac{D\vec{V}}{Dt} + \nabla^2 \vec{V} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = - \frac{\partial v_r}{\partial t} - v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_r^2}{r} - \frac{v_z \cdot \partial v_r}{\partial z} \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{v_1^2}{r} \quad (4.3)$$

elde edilir.



Şekil 4.4. Siklon içinde oluşan akımda basınç ve hız dağılımları (Dorman, 1974).

Üstteki kabuller altında Bernoulli eşitliğini yazarsak; ideal gaz akımı kabul edildiğinden kayıplar olmayacak, enerji üreten veya harcayan bir makinede seviye farkı ihmal ile şu ifade elde edilir. Akışkan sıkıştırılmazdır. Bir girdap çevrimi için

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v_r^2}{2} = sb \quad (4.4)$$

elde edilir. Bu ifade radyal yönde türetilirse

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = - V_T \frac{dV_T}{dr} \quad (4.5)$$

eşitlik (4.3)'de bu ifade yerine konursa

$$- V_T \frac{dV_T}{dr} = \frac{V_T^2}{r} \quad (4.6)$$

entegre edilirse

$$V \cdot r = sb \quad (4.7)$$

bulunur. Bu serbest vorteks kanunudur. Siklonlarda serbest vorteks kanunu bu şekli ile gerçekleşmez. Akım gerçekte ideal olmadığından sürtünme ve diğer kayıp oluşturan etkiler nedeniyle serbest vorteks kanunu

$$V \cdot r^\beta = sb = k \quad (4.8)$$

formuna girer. Bu  $\beta$  değeri için Shepherd ve Lapple (1949), Linden ve Stairmand (1949) yaptıkları deneysel sonuçlara dayanarak bu  $\beta$  değeri için  $\beta = 0,5$  yaklaşık değerini elde ettiler. Serbest vorteks kanununun bu yeni formunu kullanarak gerçek akışkanlarda enerji dönüşümünü elde edebiliriz. Eşitlik(4.3)'den

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = \frac{V_T^2}{r} = \frac{1}{r} (k/r^\beta)^2 = k^2 \cdot r^{1-\beta} \quad (4.9)$$

yazılabilir. Bu denklem giriş ile çıkış arasında entegre edilirse;

$$\frac{1}{\rho} \Delta P = \frac{1}{\beta} \left( \frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} \right) \quad (4.10)$$

elde edilir. Burada geçen  $V_1$  hızı  $V_g$  olarak alınabilir.  $V_2$  hızı ise çıkış borusundaki hızdır. (4.8) eşitliği ile hesaplanabilir veya özel bir yöntemle elde edilebilir. Yük veya basınç kayıplarını hesaplamak için  $\beta$  yerine  $1-\beta$  konarak kayıplar hesaplanabilir (Avcı, 1985).

#### 4.4. Siklonlarda Benzerlik Teorisi

Geometrisi belli bir siklonla bu siklonda akan toz yüklü akışkan sistemi iki kademedeyinceleyebiliriz. Herhangi bir siklonun tüm boyutlarını ele almak yerine daha basit olarak karakteristik bir boyutunu almak daha uygundur.

##### 4.4.1. Homojen akışkan hali

Olaya etkileyen başlıca büyüklükler siklon çapı ( $D_1$ ), gaz hızı ( $V$ ), gaz viskozitesi ( $\mu$ ), gaz yoğunluğu ( $\rho$ ) ve olay esnasında oluşan basınç ( $\Delta P$ ) veya yük kaybı ( $\xi$ ) dir. Bu beş değişken arasında boyut analizi yapılırsa iki boyutsuz büyüklük elde edilir.

$$f(V, D_1, \mu, \Delta P) = 0 \quad (4.11)$$

veya

$$f(V, D_1, \mu, \xi) = 0 \quad (4.12)$$

analiz yapılırsa

$$\frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} = f(Re) \quad (4.13)$$

$$\frac{\xi}{\rho V^2 / 2} = f(Re) \quad (4.14)$$

elde edilir.

Siklonlarda Re sayısı  $10^5$  değerinin üzerindedir. Bu nedenle Re etkisi ihmal edilebilir. Eğer Reynolds sayısı etkisi ihmal edilirse bir tek boyutsuz büyüklük kalacaktır. Bu tek boyutsuz sayı ise sabit değer olacaktır. Hızı, siklona giriş hızı  $V_g$  alındığında basınç kaybına bağlı sabiti  $K_b$  ve yük kaybına bağlı sabiti  $K_1$  olarak tanımlayacağız. Buna göre basınç ve yük kayıp katsayıları şu şekilde gösterilir.

$$\frac{\Delta P}{\rho V_g^2 / 2} = K_b \quad (4.15)$$

$$\frac{f}{\rho v^2/2} = K_I \quad (4.16)$$

Bazen giriş hızı yerine çıkış hızı veya siklon gövde çapına göre tanımlar yapılabilir.  $D_1$  çapına göre elde edilen  $V_D$  ortalama hızına göre tanımlandığında elde edilecek basınç katsayısını  $K_D$  ile göstereceğiz. Kayıp katsayıları siklon büyüklüğünden bağımsız ve siklon tipine bağımlıdır. Bazen benzer siklonlarda imalat hatalarından oluşabilecek küçük farklılıklar bulunabilir. Bu tür hatalara tolerans verilmelidir.

#### 4.4.2. Akışkanın süspansiyon halinde parçacık taşınması hali

Bir siklon içinde akan akışkanda parçacıklar bulunması halinde parçacığa bağlı olarak parçacık yoğunluğu ve çapa gibi iki değişken daha ilave olur. Ayrıca parçacık konsantrasyonu da ilave edilebilir. Bu şartlar altında olayı etkileyen değişkenler şunlardır;

$$f(\rho_p, \rho, \mu, d, V, D, \Delta P, C_g) = 0 \quad (4.17)$$

konsantrasyon etkisini ihmal edersek

$$f(\rho_p, \rho, \mu, d, V, D_1, \Delta P) = 0 \quad (4.18)$$

olur. Bu yedi değişken arasında boyut analizi yapılırsa dört boyutsuz büyüklük elde edilir. Bunlardan biri  $K_b$  ve  $K_I$  diğeri ise  $Re$  sayıdır.

$$\frac{\rho_p d^2 V}{9 \mu D_1} = S \quad (4.19)$$

dönüşümü altında verim  $E$ ,

$$E = f(K_I, Re, S, \frac{d}{D_1}) \quad (4.20)$$

olur. Parçacık çapı siklon çapına göre çok küçüktür. Bu nedenle bu boyutsuz büyüklüğü ve  $Re$  sayısı ihmal edilirse verim iki boyutsuz

büyükliğe bağlı olur.  $K_1$  veya  $K_b$  siklon büyüklüğüne bağlı olmadığından benzer boyut oranlarına sahip siklonlar için

$$E = f(S) \quad (4.21)$$

elde edilir. En genel halde

$$E = f(S, K_1) \quad (4.22)$$

olur.  $E=50$  için elde edilecek parçacık çapına kritik parçacık çapı diyeceğiz.  $S$  boyutsuz büyüklüğü atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır. Stokes sürtünmesi için " $S$ " boyutsuz büyüklüğünden şu bağıntıyı elde ederiz.

$$E = f(S) \quad (4.23)$$

$E = 0,50$  için

$$S_k = S_b = \frac{\rho_p d_k^2 V}{9 \mu D_1} \quad (4.24)$$

elde edilir.

$$T = \frac{\rho d^2}{18 \mu} \quad (4.25)$$

tanımı ile

$$\frac{T \cdot V}{D_1} = sb \quad (4.26)$$

$50$  verim için  $d=d_k$ ,  $T = T_k$  kritik değerlerini alır. Hız  $V_g$  olarak alındığında sabitin değeri  $St_k$  (Stokes) sayısı olur. Hız  $V_D$  alındığında sabitin değeri  $B$  sayısı olur. Diğer hızlar için benzer tanımlar yapılabilir. Genel halde

$$d_k^2 = \frac{9 \mu D_1 S_k}{\rho_p V} \quad (4.27)$$

olacaktır. Verim üzerinde veyahut kritik çap hesabında birçok değişkenin etkisi vardır. Bu değişkenlerin bir veya birkaçının sabit olması halinde diğer değişkenlerdeki değişimler farklı farklıdır. Sa-

bit veriminde ve bazı değişkenlerin sabit olması halinde diğer değişkenlerdeki durum altta tablo halinde verilmiştir.

Tablo 4.1. Sabit verimde bazı değişkenlerdeki değişime karşı diğer değişkenlerde üs olarak değişime örnekler (Avcı, 1985).

| Örnekler | Değişkenler |          |       |       |       |      |      |         |                     |
|----------|-------------|----------|-------|-------|-------|------|------|---------|---------------------|
|          | $\mu$       | $\rho_p$ | $d_k$ | $T_k$ | $D_1$ | $Q$  | $V$  | $\beta$ | $\Delta P \sim \xi$ |
| 1        | 0           | 0        | -1/2  | -1    | 0     | 1    | 1    | 0       | 2                   |
| 2        | 0           | 0        | 0     | 0     | 1/3   | 1    | 1/3  | 0       | 2/3                 |
| 3        | 0           | 0        | 1/4   | 1/2   | 1/2   | 1    | 0    | 0       | 0                   |
| 4        | 0           | 0        | 3/2   | 3     | 1     | 0    | -2   | 0       | -4                  |
| 5        | 0           | 1        | -2    | 0     | 0     | 0    | 0    | 0       | 0                   |
| 6        | 0           | 1        | 0     | 1     | -2/3  | 0    | -2/3 | 0       | -4/3                |
| 7        | 0           | 0        | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 1       | 1                   |
| 8        | 0           | 0        | 1/4   | 1/2   | 0     | -1/2 | -1/2 | 1       | 0                   |
| 9        | 1           | 0        | 0     | -1    | -1/3  | 0    | 2/3  | 0       | 4/3                 |

#### 4.5. Siklonlarda Basınç Kaybı

Bir siklonun dizayn parametrelerini basınç kaybı ve ayrışma verimi ile ilişkilendirmek için, teorik ve deneysel geçitli girişimler yapılmıştır. Teorik modellerin çoğunda belirli ihmallere yapılmasına karşın, belirli büyüklüklerin deneysel verilerini içeren ifadelere götürdüklerinden, teori ile deney arasında yüksek bir uyum elde edilmiştir.

Shepherd ve Lapple'e (1939) göre sabit çap ve yükseklikteki deneysel bir siklonda, onun giriş kanalının a genişliğinin ve b yüksekliğinin, çıkış kanalının  $D_2$  çapı ile h iç uzunluğunun değişiminin etkilerini incelemişlerdir (Dorman, 1974). Giriş genişliği, kord boyunca siklon silindirisinin içine ve çevresinin ortasına kadar uzatılmış ayarlanabilir giriş vanası vasıtasıyla değiştirilir. Belirli bir siklon düzenlemesi için basınç kayıplarının, debinin karesi ile orantılı olduğu ve böylece, giriş hız basınçlara cinsinden ifade edildiğinde, denklem (4.15)'e uygun olarak, debiden bağımsız olduğu bu-

lunmuştur. Siklondaki kaybın, çıkış kanalının  $h$  uzunluğu ile değişmediği pratik olarak gösterilmiş fakat dış parametrelerle,

$$K_B = Z_E = \frac{\Delta P}{\rho v_E^2 / 2} = 7,5 ab/D^2 \quad (4.28)$$

amprik ifadesiyle bağlıdır.

Bunun sonucunda Shepherd ve Lapple'e (1940) göre siklon giriş vanasını kaldırarak, kendi çalışmalarının bir kısmını tekrarladılar (Dorman, 1974). Bu daha alışılmış durum için,

$$Z_E = 16 ab/D^2 = 4 \pi A_E / A_0 \quad (4.29)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Çıkış kanalındaki ek kayıplar Fanning denkleminden hesaplanırlar. Bunlar, giriş hız düşümü ayarlandığında,

$$\frac{4 C_f L_0}{D_2} \left( \frac{A_E}{A_0} \right)^2 \quad (4.30)$$

olur. Burada;

$L_0$  : Çıkış kanalının tüm uzunluğu,

$C_f$  : Sürtünme faktörü = (birim alan başına sürtünme kuvveti) /  $v^2/2$  dir.

$C_f$  için 0.0055 gibi normal bir değer uygulanabileceği kabul edilir. Shepherd ve Lapple tüm basıncı siklonun atmosfere boşalması için atmosfer ve siklon giriş menfezi arasındaki statik basınç farkının düşebileceğini gösterdiler. Onlar böylece giriş ve çıkış hız düşümü arasındaki farkı açıkladılar. Yani yukarıdaki iki verinin toplamından,

$$1 - (A_E/A_0)^2 \quad (4.31)$$

giriş hızıdır.

Giriş vanası olmayan siklonun basınç kaybı:

$$\Delta p_s = \frac{4 \pi A_E}{A_0} + \frac{4 C_f L_0}{D_2} \left( \frac{A_E}{A_0} \right)^2 - 1 + \left( \frac{A_E}{A_0} \right)^2 \quad (4.32)$$

dir.



Çalışanların bir grubu, çoğunlukla  $n = 1$  olduğunda siklon basınç kaybı için;

$$Z_E = K(ab/D_2^2)^n \quad (4.33)$$

genel formülünü verdiler. Bazı örnekler içinde,  $K$ : siklon ebadlarının bir fonksiyonu olarak verilir. Çeşitli denklemler;  $K$  için ( $n=1$  ile) sabit bir değer gösterildiği Stern'in (1956) analizi tarafından mukayese edildi. Shepherd ve Lapple'nin denklemi ( $K=16$ ) genel olarak çok tatminkardır. Çeşitli formüllerin analizi, Stairmand (1949)'un çok farklı ifadesini tercih eden Jackson (1963) tarafından verilmektedir (Dorman, 1974).

Shepherd ve Lapple 'a (1939) göre çıkış tüpü içinde dönen gazın kinetik enerjisini, kayıp enerjiye eşitleyerek basınç kaybı için bir teorik ifade çıkardılar (Dorman, 1974). Girişte genişlemeye uygun çok basınç kaybının, hücre içindeki duvar sürtünmesinden ve girdaptan tekrar kazanılan basınca küçük olabileceği düşünülür. Onlar, minimum çap  $r_d$ 'den aşağı

$$u_r = k/r^{1/2} \quad (4.34)$$

denklemi ile verilen gazın dönme hızını ve sabit açılı bir spirali ihtiva eden, çıkış tüpünün içinden yukarıya doğru yükselen merkezi bir vorteksin var olduğunu kabul ettiler.  $r_2$  ve  $r_d$  yarıçapları arasında bu spirali yolu içinden akan birim hacimdeki gazın kinetik enerjisi,  $u_r = v_E$  eşit olduğunda  $r'$  yarıçapının olduğu yerde,,

$$Z = r'/(r_2 r_d)^{1/2} \quad (4.35)$$

dir. Deneysel olarak elde edilen  $r'$  nin kullanılmasıyla,  $r_2/r_d$  oranına sabit 64 değerinin verilmesiyle basınç kaybının gözlenmesi karara alındı. Vorteksin iç çapı gerçekte, gözlenenden daha küçüktür. Buna ilaveten, sabit açılıspiral; aksenal çıkış hızının  $u_r$ 'ye oranını ifade eder. Sonuçta çıkış aksenal hızı merkeze doğru artar. Halbuki uygulamada hız merkezde düşüktür. Modelde vorteks içindeki sürtünme kayıpları normalin altındadır (böyle kayıplar, ideal barakıştan sapma ile gösterilmiştir.). Ve çıkış spirali enerjisi normalin üstündedir.

Stairmand (1949) daha tatmin edici yaklaşımı kabul etti ve üç

verinin toplamı olan  $\Delta p$  total basıncı için;

a)  $\rho v_E^2/2$  giriş gazının hız düşüğü,

b) Giriş yarıçapı  $r_E$  ve efektif giriş yarı çapı  $r_m$  arasındaki merkezkaç basınç düşüğü vorteks hızı

$$2 \left\{ (\rho u_m^2 / 2) - (\rho u_E^2 / 2) \right\} \quad (4.36)$$

( $u_r = k/r^{1/2}$  ile verilen vorteks içindeki hız kabulünden)

c)  $v_o$  aksiyel çıkış hızıdır; iki çıkış hızı deneysel olarak

$$2 \rho v_o^2 / 2 \quad \text{veya} \quad 2 (\rho v_E^2 / 2) (A_E / A_o)^2 \quad (4.37)$$

olarak bulundu. Bu dönme değerinin azalıp tükenmesi için çıkış yeteminde uzun ise momentumun değerlendirilmesi beklenemez. Dönme enerjisinin tekrar elde edilmesi sezilemez düşüncesini vardır. Eğer  $u_m = \phi v_E$  ve  $u_m = u_E (r_E / r_m)^{1/2}$  yazarsak,

$$Z_E = \frac{\Delta P}{\rho v_E^2 / 2} = 1 + 2\phi^2 \left\{ (r_E / r_m) - 1 \right\} + 2(A_E / A_o)^2 \quad (4.38)$$

olur. Aşağıda gösterildiği gibi  $r_m = r_2 / 2$  iken,  $\phi$  ve  $r_m$  gazın açısal momentum düşüncesinden bulunur. Efektif giriş yarı çapı ( $r_m$ ); her birim zamanda giriş gazı spiralinin açısal momentumu olan  $M = Q \cdot \rho \cdot u_r \cdot r_m$  bağıntısıyla bulunur. Stairmand,  $r_2 > r > r_2 / 2$  den  $u_r = kr^{1/2}$  ile verilen spiral içindeki dönme hızının varolduğunu kabul eder ve  $u_r / r = Sbt$  ( $r < r_2 / 2$  için)  $r = r_2$  den 0'a kadar açısal momentumun integralinden  $r_m = 0.56 \cdot r_2$  veya  $r_m = 1/2 \cdot r_2$  (yaklaşık olarak) dir.

Böylece;

$$M_o = Q \rho u_E (r_E \cdot r_2 / 2)^{1/2} \quad (4.39)$$

olur. Stairmand'a göre, açısal momentumu girişi;

$$M_E = Q \rho v_E r_E \quad \text{ve fark} \quad M_E - M_o = M_f \quad (4.40)$$

(siklon duvarlarındaki dönmüş gazın sürtünme faktörüdür). Siklonun tüm iç sürtünme alanı,

$$M_f = \int c_f (\rho u_r^2 / 2) r d A_f \quad (4.41)$$

integralinden bulunur.  $u_r^2 r = Sbt = u_E^2 r_E$  olduğundan bu denklem

$$M_F = (C_f/2) \rho u_E^2 r_E A_f \quad (4.42)$$

$M_E$ ,  $M_O$  ve  $M_F$ 'nin ve  $Q = v_E A_E$  nin yerlerine yazılmasıyla Tablo 5.2' den elde edilen  $r_E/r_2$  ve  $C_f A_f / 2A_E$  terimleri ile  $\phi$  veya  $u_E/v_E$  olarak 2.derece denklem elde edilir.

Tablo 4.2.  $\phi = u_E/v_E$  değerleri (Dorman, 1974).

|           | $\frac{C_f A_f}{2 A_E}$ | 0.1  | 0.2  | 0.5  | 1.0  | 2.0  | 5.0  |
|-----------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $r_E/r_2$ |                         |      |      |      |      |      |      |
| 1         |                         | 1.21 | 1.08 | 0.87 | 0.71 | 0.55 | 0.38 |
| 2         |                         | 1.53 | 1.31 | 1.00 | 0.78 | 0.59 | 0.40 |
| 5         |                         | 1.95 | 1.58 | 1.13 | 0.85 | 0.63 | 0.42 |
| 10        |                         | 2.24 | 1.75 | 1.21 | 0.89 | 0.65 | 0.43 |

Stairmand tarafından tavsiye edilen  $C_f$ 'nin değeri 0,01 dir; ki bu düzgün borular içindeki akış için normal değerinin iki katıdır.

Yukarıya göre gözlenebilir ki; giriş  $r_E (= (D_1 - a)/2)$  yarı çapında dönme hızı kayda değer bir şekilde giriş hızına aşar. Eğer  $C_f = 0$  ise,

$$u_E/v_E = (2r_E/r_2)^{1/2} \quad (4.43)$$

elde edilir.

Stairmand'ın problemi 1963 yılında Jackson tarafından deneysel olarak bulunan bilgilerle, siklon girişindeki gerekli gaz enerjisi arasındaki şüpheli durumdan  $r_m \approx r_2/2$ 'nin nereden geldiği dahi şüphelidir (Dorman, 1974). Çünkü bu, dışa akan gazın açısız gücünün nereden geldiğinin açıklamasında, bu yörüngesel güç 0'dan  $r_2$ 'ye kadar olan bütün çaplarda aynı olduğu kendiliğinden anlaşılır.

Barth'a göre, siklon girişinde enerji kaybı ihmal edilebilir

ve girişte vorteksin açısal momentumu ( $r_E > r_1$ ) taslak giriş için  $\alpha = 1$  olduğu yerde;

$$M_E = Q \rho v_E r_E / \alpha = Q \rho u_1 r_1 \quad (4.44)$$

dir.  $r_E < r_1$  için aşağıdaki değerleri vardır. Bu sonuç Ranft(1954) tarafından verildi (Dorman, 1974).

|           |   |      |      |      |      |      |
|-----------|---|------|------|------|------|------|
| $r_E/r_1$ | 1 | 0.9  | 0.8  | 0.7  | 0.6  | 0.5  |
| $\alpha$  | 1 | 0.83 | 0.73 | 0.65 | 0.56 | 0.48 |

Çıkış akışındaki vorteksin açısal momentumu:

$$M_o = Q \rho u_2 r_2 \quad (4.45)$$

dir.

Bu,  $(r_1 r_2)^{1/2}$  çaplarında ve H yüksekliğinde,  $C_f$  sürtünme faktörü ve  $(u_1 u_2)^{1/2}$  sürtünme hızı olan tek silindirik yüzeyler üzerindeki sürüklenmeden dolayı meydana gelen vorteksteki sürtünme kayıpları olarak kabul edilirler.  $C_f$ ; deneysel datalardan elde edilen keyfi bir sabittir. Sürtünme yüzeyinden sonraki ve önceki akış ideal bir akıştır. Sürtünme torku  $M_f = \pi C_f \rho H u_1 u_2 r_1 r_2$  dir. Momentum dengesinden  $M_E = M_o + M_f$  ve  $Q = v_o \pi r_2^2 = v_E A_E$  'den

$$\frac{u_2 r_2}{u_1 r_1} = 1 - \frac{u_2 H C_f}{v_o r_2} \quad (4.46)$$

bulunur ve

$$\frac{u_2}{v_o} = \frac{\pi r_2 r_E}{\alpha A_E + \pi r_E C_f H} \quad (4.47)$$

dir.

Siklon hücresi içindeki basınç sürtünme kayıpları, sürtünme yüzeyindeki önceki ve sonraki hız için değişiktir. Yani denklem 4.46 dan;

$$(\rho/2)(u_1^2 r_1/r_2 - u_2^2 r_2/r_1) = \frac{\rho u_2^2 r_2}{2 r_1} \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{u_2}{v_0} \frac{HC_f}{r_2}\right)^2} - 1 \right\} \quad (4.48)$$

olur.

Diğer kayıplar;  $r_2$  çapındaki dış kanal girişindeki gazın  $u_2^2/2$  teğetsel hızı ve artı aksenel olarak gazı püskürtmek için istenen basınçtır. Barth; dış kanal içinde şekillenen dönen gaz halkasının kabul edilmesiyle teğetsel hızı hesaplar; öyleki, halka içindeki merkezkaç basınç, aksiyel hıza eşittir. Siklon basınç kaybının bu bilegeni; kesin kenarlı dış kanal için  $K=4.4$  ve yuvarlak kenarlı kanal için  $K=3,4$  olarak

$$K \rho u_2^{4/3} v_0^{2/3} / 2 \quad (4.49)$$

olarak hesaplanır.

Tüm basınç kaybı üç bilegenin üzerindeki toplamdır. Ve  $r_2$  çapında teğet hız ifade edildiği zaman;

$$\xi = \frac{p}{\rho u_2^2 / 2} = \frac{r_2}{r_1} \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{u_2}{v_0} \frac{HC_f}{r_2}\right)^2} - 1 \right\} + 1 + K \left(\frac{u_2}{v_0}\right)^{-2/3} \quad (4.50)$$

olur.

$C_f = 0.018$  deneysel değeri; siklonun geniş mesafesine uygun olarak bulundu. Bu sonuçlar kullanıldığında  $u_2/v_0$  denklem (4.47)'den ilk olarak hesaplanır ve buradan (4.50) denkleminde  $\xi$  bulunur.

$$Z_o = \frac{\Delta p}{\rho v_0^2 / 2} = \xi (u_2/v_0)^2; \quad Z_E = Z_o (A_E/A_o)^2$$

ve

$$Z_D = Z_o (r_1/r_2)^4$$

elde edilir.

Zerrenin sınırlandırılması,

$$\tau_L = v_{CL} / \xi = Q / (2 \pi u_2^2 H) = \frac{\xi}{\Delta p} \frac{Q \rho}{4 \pi H} \quad (4.51)$$

ve boyutsuz ayırma indeksinden

$$B = \frac{v_D Z}{D_1} = \frac{1}{4 \left( \frac{u_2}{v_0} \right)^2 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^4 \frac{H}{r_1}} \quad (4.52)$$

dir.

B ve  $Z_D$  miktarları farklı siklon dizaynlarının performansını karakterize eder. Onlar ölçüden bağımsızdır. B ve  $Z_D$ 'yi bulmak için; siklon boyutları kadar  $u_2 / v_0$  hız oranının bilinmesi istenir. Eğer  $C_f$  bilinirse veya çıkış gazlarının  $M_0$  açısal momentumunun ölçülmesiyle deneysel olarak  $C_f$  bulunabilirse bu denklem (4.47) den hesaplanabilir.

$$M_0 = Q \rho u_2 r_2 \quad \text{ve} \quad Q = \pi r_2^2 v_0$$

ve buradan da;

$$u_2 / v_0 = M_0 \pi r_2 / \rho Q^2 \quad (4.53)$$

olur.

$M_0$ 'nın ölçümü için bir test teçhizatı Barth ve Leineweber (1964) tarafından tanımlanır (Dorman, 1974). Siklon çıkış kanalından çıkan gaz, bir tork göstergesine bağlanan aksiyel akış-doğrultucusunun içinden geçer.

Bu yolla tesbit edilen  $Z_D$  ve B'nin deneysel verileri değişik oranlarda teğetsel girişli siklonlar için Leineweber (1967) tarafından verildi (Dorman, 1974). Bu değerler Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

Bu, Shepherd ve Lapple'nın sonuçlarıyla  $Z_D$  üzerindeki sadece küçük bir etkiye sahip olan H'nın gözlenemeyeceğidir. Fakat ayırma indeksi H'nın artışıyla düşer.  $Z_E = Z_D (A_E / A_D)^2$  olarak elde edilebilir. 12,6 sabit değerine sahip olmak için Shepherd ve Lapple tarafından bulunan oran

$$Z_E / (A_E / A_0) = Z_D (A_E / A_D) / (D_1 / D_2)^2 \quad (4.54)$$

dir.

10 ve 27 arasındaki değişiklik denklem (4.29)'den bulunur.

Tablo 4.3. Teğetsel girişli ve silindirik ęıkıř kanallı siklonlar (Dorman, 1974).

| $D_1/D_2$ | $A_E/A_D$ | $Z_D (10^2)$ |      |      | $B(10^{-4})$ |      |      |
|-----------|-----------|--------------|------|------|--------------|------|------|
|           |           | $H/D_2$      |      |      | $H/D_2$      |      |      |
|           |           | 2,5          | 5    | 10   | 2,5          | 5    | 10   |
| 2         | 0,115     | 7,3          | 6,5  | 5,2  | 7,5          | 4,6  | 3,4  |
|           | 0,23      | 2,7          | 2,5  | 2,2  | 19,7         | 11,2 | 7,2  |
|           | 0,345     | 1,6          | 1,5  | 1,3  | 4,0          | 22,3 | 13,0 |
|           | 0,46      | 1,2          | 1,0  | 0,9  | 72,8         | 40,5 | 23,2 |
| 3         | 0,115     | 18,4         | 14,5 | 12,2 | 5,9          | 4,0  | 2,5  |
|           | 0,23      | 7,6          | 6,5  | 5,7  | 13,3         | 8,1  | 4,8  |
|           | 0,345     | 4,8          | 4,2  | 3,7  | 26,1         | 18,1 | 9,0  |
|           | 0,46      | 3,5          | 3,1  | 2,8  | 47,8         | 25,4 | 13,9 |
| 4         | 0,115     | 37,4         | 31,6 | 25,8 | 4,1          | 2,9  | 2,0  |
|           | 0,23      | 15,4         | 14,7 | 12,7 | 10,6         | 6,8  | 3,8  |
|           | 0,345     | 10,3         | 9,4  | 8,3  | 21,3         | 12,2 | 7,1  |
|           | 0,46      | 7,4          | 7,1  | 6,5  | 45,2         | 21,3 | 11,8 |

#### 4.6. Deneysel Verimlilik Eğrileri

Siklonların pratik uygulamalarının pek çoğunda esas inceleme yapılacak konu toplam verimli toz toplama kütle yüzdesidir. Buna karşın, değişik tozlar için relatif verimliliği ölemek imkansızdır. Değişen ęalıřma koşulları altında toz büyüklükleri bilinmeden siklon verimlilik değer eğrisi belirlenemez. Özellikle büyük siklonlar için, yapılan deneylerden elde edilen deneysel verimlilik değerleri incelemeleri, ortaya imnal edilemeyecek zorluklar ęıkartır. Genelde olduğu gibi, eğer tozlar toplanmış paręacıklar içerirse büyüklük analiz verileri, sedimentasyon metodu ile toplanmış veriler ve örnekler iyi bir değerlendirme içinde olan ve tahminlerin üzerinde verim sağlayan küçük paręacıkları

gösterir. Kolayca ufalanabilen malzemeler siklonun ovalana sırtma hareketi dolayısıyla kırılabilir ve sonuç olarak % 100 oranında toplanan küçük parçacıklar görünümünü verir. Çıkış kanalındaki eğit olmayan dağıtım konsantrasyonu ve yüksek akış hızında doğru ekzos tozu örnekleme zordur.

Siklonlar standart ince ufalanmış silika kumu kullanılarak test edilebilirler (Stairmand, 1951; Dorman, 1974). Stairmand tarafından kullanılan ufalanmış toz, yaklaşık olarak ince toz haline getirilmiş yakıttan uçan küllere eşittir. Yani siklonun toplaması için tipik bir malzemedir. Kum parçacıklarının yapışmış şekli hazır bir şekilde dağıtılmıştır ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Basınçlı hava enjektörü ile siklon kanalına bilinen ağırlıkta toz dağıtılır. Siklon humisinde kalan toz ölçülür ve hava ekzostaki toz örneği alınır. Böylece toplanan ağırlık dengesi kontrol edilebilir. Siklon çıkış kanalına yerleştirilen antisifon kontrol levhasından aşağı akan 4 ile 6 kanallı çaplarına yerleştirilen izokinetik emiş probu aracılığı ile; ekzostan numune alınır. Numunenin büyüklük analizi Andreasen gökeme metodu modifikasyonu ile yapılır.

Siklon verimlilik eğrileri havadaki terminal hızları veya  $\zeta$  parametresinin terimleri ile ifade edilir. Bu tozun özelliği olarak yoğunluk ve şeklin etkisi birleştirme ve ayrılmada performans üzerinde büyük ana etkiye sahiptir. Toz ayırma aparatlarının değerlendirilmesi ve dizaynında tozun diğer bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri çıkış hız dağılımının belirlenmesi için standart bir kottur (ASME, 1965; Dorman, 1974). Santrifüj sınıflandırıcı veya hava santrifüj yakayıcı Bahco tipinde kullanılır. Bu tip; verilen çıkış hızlarındaki verilerde toz numunesini kesmeye muktedir. Sınıflandırıcıdaki hava akışını düzenleyen değişik çap ayarlarına ve  $4 \cdot 10^{-5}$  ile  $4 \cdot 10^{-2}$  m/sn. arasında değişen hava akış hızına karşılık gelmektedir. Düşük ağırlıkları logaritmik kağıt üzerinde çıkış hızına karşılık grafiği çizilir. Sınıflandırıcı, ASME tarafından uygun görülen standart toz numunesini kullanılarak ölçülendirilir. Eğer istenirse; sonuçlar Stokes kanunu ile küresel numuneler kullanılarak hesaplanan eğitime dönüştürülür. Dene için toz numune toplama metodu 1957 de ASME tarafından kullanılan



ilk kot ile tanımlanır (Dorman, 1974).

Bazı siklon imalatçıları bu kotlara göre belirlenen performans eğrilerini garantiLEDİLER.

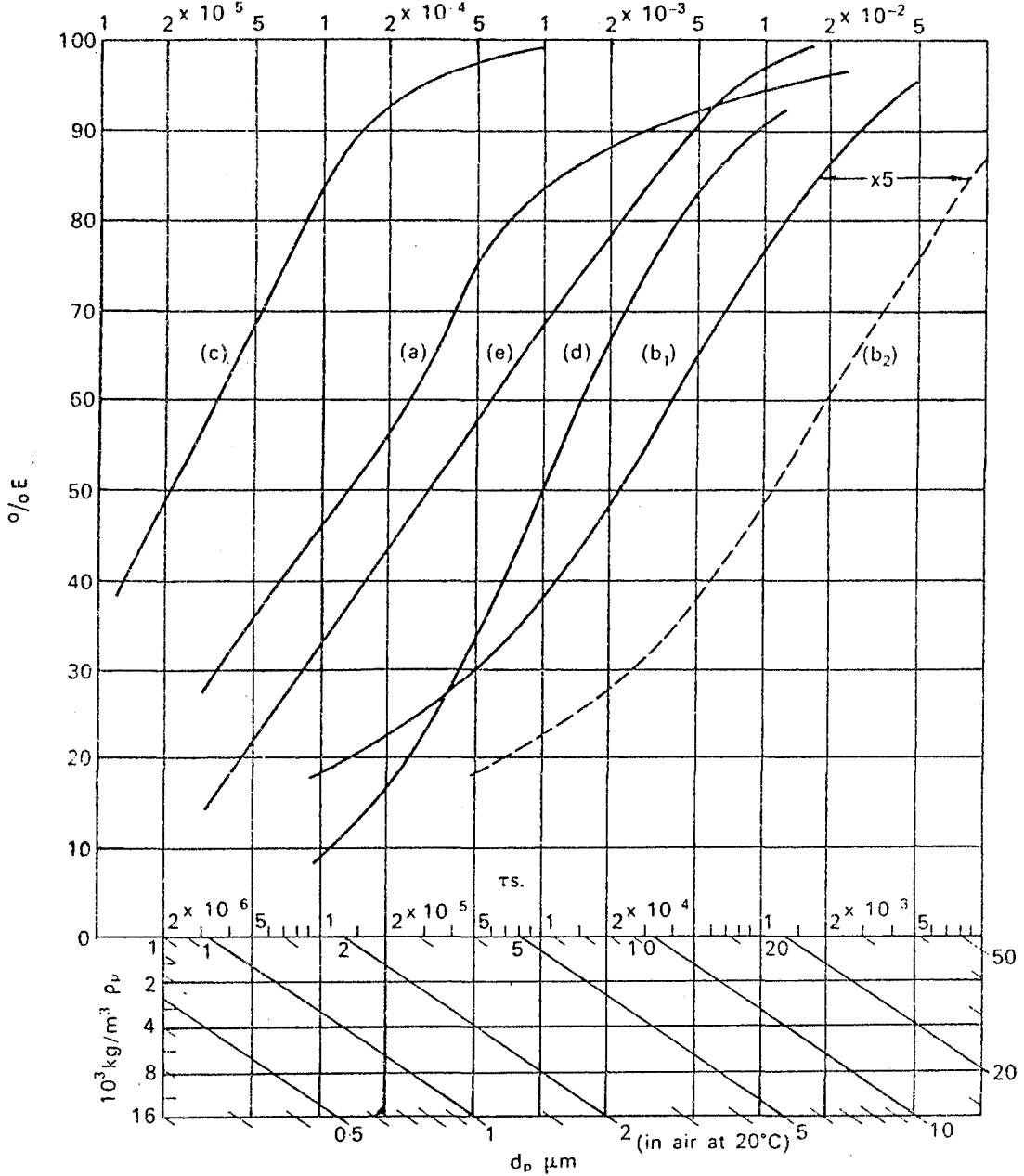
Toplanan numune içindeki kütle konsantrasyonunun kati partikülleri; bu solüsyondaki buharlaşma kolorimetrik veya fluorometrik teknikleriyle ileri derecede yoğunluğu belirleyebilir. Taneciklerin duvarlardan sıçraması veya birbirlerine yapışması olayı normal siklonlarda önemli rol oynar.

DeneySEL verimlilik eğrilerinin örnekleri Şekil (4.5)'de verilmiştir. Burada E grafikte  $\zeta$ 'ya karşı logaritmik ölçüyle yerleştirilmiştir. Grafiğin üstünde son hız değerleri  $v_c = \zeta_g = 9,81\zeta (\approx 10\zeta)$  m/sn olarak verilmiştir. Grafiğin altındaki figürde 20°C da değişik yoğunlukta havadaki küresel parçacıkların çap değerlerini  $\zeta$  (veya  $v_c$ ) değerlerine çevirmek için kullanılabilir.

$v_E = 15$  m/sn ve  $D=800$  mm olduğunda siklonların yüksek gaz hızlı ve yüksek verimliliği için Stairmand tarafından verilen değerlerle (a) ve (b<sub>1</sub>) eğrileri çizilmiştir. Bu deneyde silika kum metodu kullanılmıştır. 1966'da Hamilton ve diğerleri tek dağıtmalı küresel partikül tez metodunu kullanarak (c) eğrisini elde ettiler. Breuer 1961'de BAET tozunumune aleti ile ( $D_1=34$  mm) küçük çaplı van Tongeren siklonunda da kullanıldı (Dorman, 1974). (d) eğrisi tipik siklon için 1956'da Stern ve diğerleri tarafından alınmıştır. (d) eğrisi verimlilik eğrisini temsillemektedir. Fakat  $\zeta$  ve  $D_1$ 'in tam doğru değerleri verilememiştir. Verimlilik elde edilen diğer siklonların ve bunların tipik büyüklük oranları Tablo (4.4)'de verilmiştir. Geniş siklonlardan elde edilen performans verileri ile (e) eğrisi çizilmiştir. Bu eğriler daha önce tanımlanan ASHE test metodu temelinde dayandırılmıştır.

Şekil (4.5)'daki eğriler arasındaki farklılıklar normaldir. Çünkü ayrı test metodları kullanılarak çizilmişlerdir.

$Z_E$  ve  $\zeta_L$  değerleri Şekil(4.5)'daki a, b ve c siklon eğrileri için hesaplanmıştır. Tablo (4.5)'deki  $Z_E$  de  $\zeta_L$  nin karşılaştırılmalı deneysel ve hesaplanmış değerleri Şekil (4.5)'daki a, b ve c için verilmiştir.



Şekil 4.5. Siklon verimlilik eğrileri örnekleri (Dorman, 1974).

(a) Stairmand'ın yüksek verimli siklonu

$$D_1 = 205 \text{ mm.}; v_E = 15.2 \text{ m/s.}; Q = 220 \text{ m}^3/\text{h}; \Delta p = 700 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_L (\%50) = 1.3 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (d_{pi} = 2 \text{ } \mu\text{m}; \rho_p = 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

(b<sub>1</sub>) Stairmand'ın yüksek gaz hızlı siklonu

$$D_1 = 205 \text{ mm.}; v_E = 15.2 \text{ m/s.}; Q = 660 \text{ m}^3/\text{h}; \Delta p = 900 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_L (\%50) = 2.2 \times 10^{-4} \text{ s} \quad (d_{pi} = 8.1 \text{ } \mu\text{m}; \rho_p = 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

(b<sub>2</sub>), (b<sub>1</sub>) gibi  $D_1 = 1 \text{ m}$  den azaltılarak bulundu.  $\tau_L (\%50) = 1.1 \times 10^{-4} \text{ s.}$

(c) Breuer 'ın siklonu

$$D_1 = 34 \text{ mm.}; v_E = 12 \text{ m/s.}; Q = 12 \text{ m}^3/\text{h} \quad \Delta p = 687 \text{ N/m}^2$$

$$\tau_L (\%50) = 2.10^{-6} \text{ s.}; \quad (d_{pi} = 0.75 \text{ } \mu\text{m}; \rho_p = 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

(d) Stern'in tipik siklonu

(e) Şekil 4.6 'daki siklon eğrilerinden alınan datalar.

Tablo 4.4. Siklon boyut oranları (Dorman, 1974).

|                | (a)                 | (b)                | (c)                      | (d)     | (e)       | (f)                      |
|----------------|---------------------|--------------------|--------------------------|---------|-----------|--------------------------|
|                | Stairmand           |                    | Breuer <sup>(1)(4)</sup> | Stern   |           | Linden <sup>(1)(2)</sup> |
|                | Yüksek verimlilik   | Yüksek Gaz hızı    |                          | Tipik   | Uygun tip |                          |
| D <sub>1</sub> | 1                   | 1                  | 1                        | 1       | 1         | 1                        |
| D <sub>2</sub> | 0.5                 | 0.75               | 0.59                     | 0.5     | 0.5       | 0.41                     |
| D <sub>3</sub> | 0.375               | 0.575              | 0.40                     | -       | -         | 0.28                     |
| a              | 0.2                 | 0.375              | 0.32                     | 0.25    | 0.2       | 0.36                     |
| b              | 0.5                 | 0.75               | 0.74                     | 0.5     | 0.45      | 0.36                     |
| c              | 1.5                 | 1.5                | 1.59                     | 2       | 0.75      | 1                        |
| h              | 0.5                 | 0.875              | 0.80                     | 0.625   | 0.625     | 0.41                     |
| L              | 4                   | 4                  | 3.53                     | 4       | 2         | 2.8                      |
| H              | 3                   | 1.625              | 1.96                     | -       | -         | -                        |
| r <sub>E</sub> | 0.4                 | 0.6875             | 0.66                     | 0.375   | 0.4       | 0.68                     |
| Yuvarlatılmış  | Hiçbiri             | 360°               | 360°                     | Hiçbiri | Hiçbiri   | 180°                     |
| Z <sub>E</sub> | 5.2                 | 6.0                | 7.9                      | -       | -         | 12.8                     |
| Z <sub>D</sub> | 320                 | 46                 | 86                       | -       | -         | 470                      |
| B              | 1.2x10 <sup>4</sup> | 6x10 <sup>-3</sup> | 2.1x10 <sup>-4</sup>     | -       | -         | -                        |

(1) Yaklaşık boyutlar

(2) 23 tipten ortalama boyut oranları

(3) Çok önerilen tip

(4) Toz için kullanılan D<sub>1</sub>=34 mm. siklon

Tablo 4.5.  $Z_E$  ve  $Z_L$  nin hesaplanmış değerleri ve deneysel karşılaştırılması (Dorman, 1974).

| Siklon                         |   |                      |   |                      |  |                      |
|--------------------------------|---|----------------------|---|----------------------|--|----------------------|
| Metot                          | (a) Stairmand, Y.V.<br>$D_1 = 200$ mm<br>$v_E = 15$ m/s |                      | (b) Stairmand, Y.G.H.<br>$D_1 = 200$ mm<br>$v_E = 15$ m/s |                      | (c) Breuer, BAT<br>$D_1 = 34$ mm<br>$v_E = 12$ m/s |                      |
|                                | $Z_E$   | $T_L$                | $Z_E$   | $T_L$                | $Z_E$  | $T_L$                |
| Deneysel<br>( $E \approx 50$ ) | 5.2   | $1.3 \times 10^{-5}$ | 6.0   | $2.2 \times 10^{-4}$ | 7.9  | $2 \times 10^{-6}$   |
| Shepherd ve<br>Lapple eşitliği | 6.4   | -                    | 8.0   | -                    | 11.0   | -                    |
| Stairmand<br>eşitliği          | 5.1   | $2.3 \times 10^{-5}$ | 10.3  | $3.3 \times 10^{-5}$ | 14.3   | $5.2 \times 10^{-6}$ |
| Barth<br>eşitliği              | 6.6   | $5.4 \times 10^{-5}$ | 8.8   | $1.6 \times 10^{-4}$ | 7.8  | $2.1 \times 10^{-5}$ |
| Eşitlik<br>( $u_1 = v_E$ )     |   | $5.3 \times 10^{-5}$ |   | $1.5 \times 10^{-4}$ |  | $3.0 \times 10^{-5}$ |

Yuvarlatılmış girişli siklonlar için Stairmand'ın yaptığı deneye uygun olarak  $Z_E$  değerinin yüksek olduğu tahmin edilir. (a) ve (c) siklonları için hesaplanmış  $Z_L$  değerleri, deneysel değerlerinden daha büyük ölçülmüştür. Fakat b siklonu için bu değer daha küçüktür. Bazı durumlarda farklılıklar önem veya büyüklüğüne göre sıralandırırlar. Hesaplama metodlarıyla elde edilen  $Z_L$  değeri 3 siklonu sıralandırır. Mevcut teoriler sadece ayrıştırılmış partiküllerin büyüklük sırasını gösterebilir. Deneysel veriler ise kantitatif iş için kullanılmalıdır. Önceden tesbit edilen basınç düşme değeri daha güvenilirdir.

Siklon verimlilik değeri eğrisi toplanacak tozların boyut dağılıma ve schradan hesaplanabilen verim ile birlikte bilinir. Seçilen ölçü aralıklarının uygun bir serisi oluşturulmuştur.

Eğer siklonun ebadları veya çalışma şartları test verileri tatbik edildiğinde değiştirilirse verilen herhangi bir verimlilik de toplanan tanecikler için  $v_E Z/D_1 = Sbt$  (veya  $v_D Z/D_1 = Sbt$ ) eşitliği kullanılır. Verimlilik değer eğrisi yeni şartlara ayarlanmalıdır. Yeni ölçü genel verimliliği hesaplamak için kullanılır. Böylece siklonun boyutları, gaz hızı aynı kaldığında test siklonuna oranla 5 kat arttırılır, veya  $v_c$  'nin değerleri verimlilik değer eğrisi üzerindeki her noktada 5 le çarpılmalıdır.  $Z$  veya  $v_c$  'nin logaritmik ölçekli çizelge üzerine grafiği çizildiğinde, eğrinin lineer yerdeğiştirme miktarı 5'le çarpılmış noktadır. Şekil (4.5)'daki ( $b_1$ ) ve ( $b_2$ ) eğrilerinde görüldüğü gibi  $D_1$  'in 200 mm den 1 m'ye artışı için ikinci eğri 5 çarpan faktörüne uyarak yerdeğiştirir.

Jackson (1963) yukarıdaki anlamda düzenlenen cetvelle farklı büyüklükteki benzer siklonlar için verimlilik eğrilerinin çok benzer özellikler gösterdiği kuralını yinelerdi (Dorman, 1974).

#### 4.7. Siklonlarda Verim ve Yük Kayıplarına Etkileyen Faktörler

Boyut analizinde ve teorik çalışmalarda görüldüğü gibi birçok değişken verim ve kayıplarına etki etmektedir. Bazı değişkenler ise ne boyut analizi, ne de teorik çalışmalarda gözönüne alınmamıştır. Bütün bu değişkenlerin etkilerini kısaca şöyle sıralayabiliriz.

#### 4.7.1. Siklonun boyut oranlarının etkisi

Siklon boyutları  $D_1$  çapının oranları olarak ele alınacaktır. Bir boyut oranı ele alındığında diğer boyut oranları sabit kabul edilecektir.

$D_1/D_2$  oranı arttırıldığında yük kayıpları ve verim artar.

$D_1/D_3$  oranı arttırıldığında yük kayıpları ve verim artar.

$a/D_1$  oranı arttırıldığında yük kayıpları artar, verim azalır.

$L/D_1$  oranı arttırıldığında yük kayıpları azalır, verim artar.

$b/D_1$  oranının büyük bir etkisi olmanakla beraber arttırılması halinde yük kayıpları ve verim bir miktar azalır.

$h/D_1$  oranında önemli bir etkisi olmadığı kabul edilir. Ancak genellikle  $b$ 'den küçük olmayacak şekilde mümkün mertebe küçük tutulmaya çalışılır. Oranın arttırılması yük kayıplarına bir miktar arttırıp verimi bir miktar azaltabilir.

#### 4.7.2. Koninin etkisi

Koni siklon için şart bir öge olmamakla birlikte genellikle konik siklonlar tercih edilir. Koni, gazın daha kısa mesafede toplanıp iç girdap oluşumunu sağlar. Tozların bir merkeze toplanması ve kolayca alınabilmesini mümkün kılar. Koni yük kayıplarına ve verimi bir miktar arttırır.

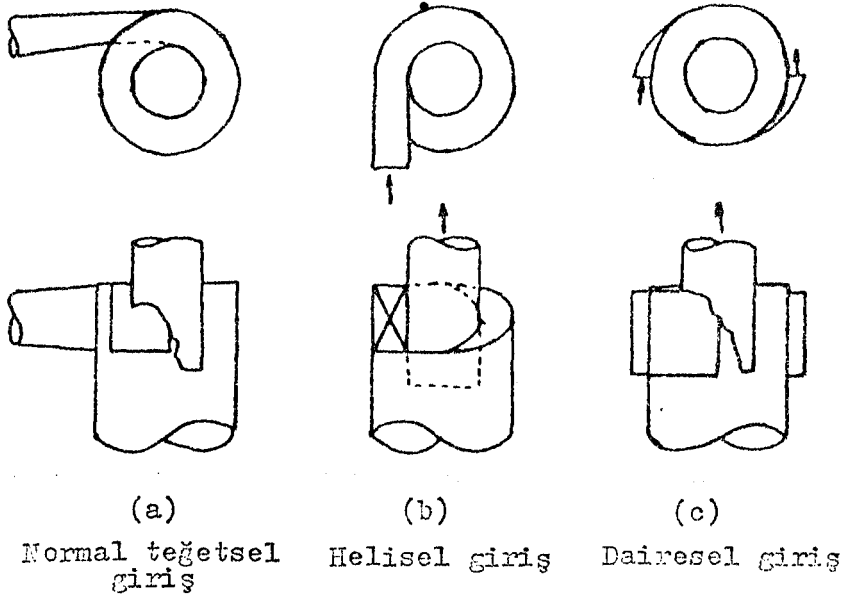
#### 4.7.3. Giriş dizaynının etkisi

En önemli öğelerden biridir. İki tip giriş vardır. Bunlardan biri aksenal girişler olup bunlar hakkında yeterli bilgi yoktur. Mevcut bilgilerde genellikle ticari işletmelere aittir. Teğetsel girişliler için yapılmış birçok araştırma mevcuttur. Bu araştırmalar neticesinde farklı giriş tipleri geliştirilmiştir.

Teğetsel girişlilere ait 3 farklı giriş tipi Şekil (4.6)'da gösterilmiştir. Bu farklılık basınç yarıçaplarının azaltılması ve verimin arttırılması kaygısından kaynaklanmaktadır.

Şekil (4.6.a)'da görülen normal teğetsel girişli siklonların gi-

riğinde akım yönünün değişmesi, genişleme ve daralma etkisinden dolayı çok kayıpları ve akım bozulması gibi etkiler olabilmektedir. Bazı girişler düz iken bazıları akımı cidara yönlendirici eğikliğe sahiptir. Eğik girişler bazen gaz akım kanalının küçültülmesi veya dairesel kanalın dikdörtgen kesite dönüştürülmesinden kaynaklanabilmektedir. Bu durumlarda bağlantının siklondan uzakta yapılması veya kademeli olarak küçük bir açı ile ( $\max 12-15^\circ$ ) yapılması gerekir. Düz girişlilerin verimleri ve yük kayıpları eğik girişlilerden daha iyidir.



Şekil 4.6. Siklonlarda teğetsel giriş tipleri (Avcı, 1985).

Girişte olugan kayıpları azaltmak ve akışkana spiral bir hareket kazandırmak amacıyla Şekil (4. 6.b)'de görülen helisel giriş dizaynı düşünülmüştür. Ancak yapılan çalışmalarda bu amaçların gerçekleştirildiğini gösteren yeterli sonuçlar bulunamamıştır. Fazla yaygın bir tip değildir.

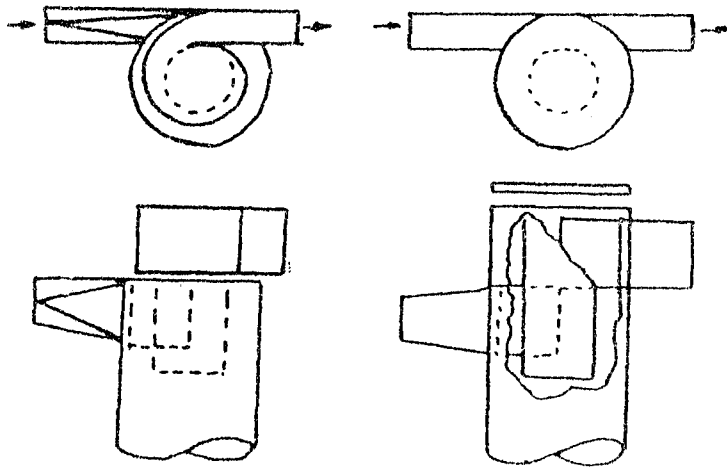
Girişteki çok kayıplarını ve gazın çalıs borusu ile temasını azalt-

mak amacı ile şekil (4. 6.c)'de görülen yuvarlak girişli tipler geliştirilmiştir. Bu tiplerin çok tablalı olması tesiri daha etkin kalabilir. Bu tipler için yapılmış yeterli deneysel sonuçlar yoktur.

#### 4.7.4. Çıkış kanalı ve çıkış kanalının etkisi

Genelde çıkış kanalı veya borusu kısa yapılıdır. Bu sayede yük kayıplarının azaltılmasına çalışılır. Buna karşı verimde bir azalma gözlenir. Optimum çözüm olarak siklona giriş yüksekliğinden küçük olanamak şartıyla one yakın değerler alınır. İç girdap çıkış boyunca devam ettiğinden parçacıkların tutulması devam eder. Gaz akımı parçacık akımının ters yönünde olduğundan burada tutulan tozlardan yararlanmak güçtür. Bunun için çıkış borusunda toz toplama yönünde bir miktar temizleme akışı verilir, bazen de bir ağrimsı malzemeyle yığey kaplanarak silme yoluyla tozların kazanılması yoluna gidilir.

Yük kayıplarını azaltmak amacıyla çıkış borusunun üstüne genişleme kutuları veya akın doğrultucular konarak girdapın ve kinetik enerjisinin geri alınarak statik basıncın iyileştirilmesi yoluna gidilir. Bu şekilde bir miktar kayıplar azaltılmış olur. Şekil (4.7) 'de bu uygulamalara ait 2 konstrüksiyon örneği verilmiştir.



Şekil 4.7. Çıkış borusu ve kutusu dizaynı örnekleri (Avcı, 1985).



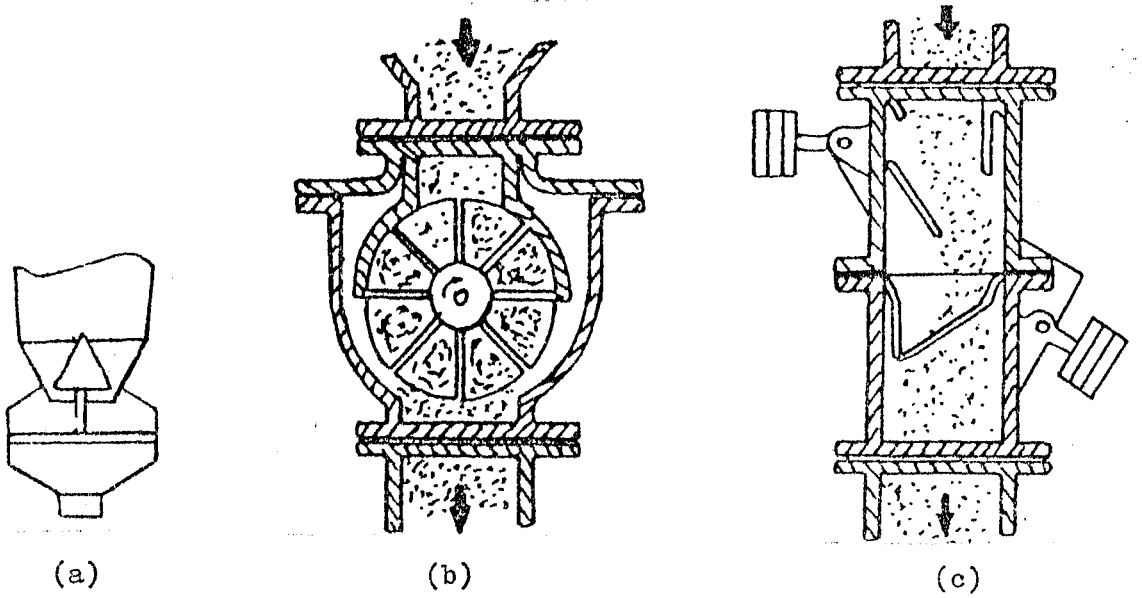
#### 4.7.5. Toz boşaltma dizaynı ve etkisi

Siklonda toplanmakta olan tozların siklon bölgesinden uzaklaştırılması gerekir. Bu işlem sürekli veya kademeli olarak yapılabilir. Ancak sürekli alınmasında yarar vardır.

Siklon bölgesinden tozları uzaklaştırmak için en basit gözünü koni ucuna (bir tarafı koni ucuna açık diğer tarafı kapalı) bir toz kutusu bağlanmaktadır. Bu halde kutunun en az iki saatlik, normalde sekiz saatlik toz yüküne sahip olması gerekir. Bu tip kutularda siklonda oluşan girdaba benzer girdaplar oluşur. Bu girdaplar sonucu tozların bir kısmı sürüklenerek siklon içine oradan iç girdapları siklon dışına çıkar. Bu durum verimi düşürür. Bu toz kaybını önlemek için siklon konisi ile toz kutusu arasına girdap yönlendirici kanatlar veya diskler konabilir. Bir örnek şekil (4. 8 .a)'da görülmektedir.

Siklondan tozları almanın diğer bir yolu periyodik valfler kullanmaktır. Döner valf kapakları ile hem yeterli gaz sızdırmazlığı sağlanabilir hem de sürekli toz alınması mümkün olur. Yüksek negatif basınçlar için daha kaliteli valflerin kullanılması lazımdır. Bu tür bir valf şekil (4. 8.b)'de görülmektedir. Diğer bir tip ise toz ağırlığı ile çalışan çift kapaklı valflerdir. Bu valflerde yeterli ağırlıkta toz yağıldığında 1. valf kapağı açılır ve toz boşaltıca kapanır. Bu esnada ikinci kapak açılarak tozları dışarı boşaltır. Bunların ağırlıkla çalışanları yanında mekanik kumandalı olanları da vardır. Şekil (4. 8 .c)'de ağırlıkla çalışan tip görülmektedir. Diğer bir tip boşaltma sistemide vidalı konveyörler kullanılmaktadır. Bunlar yeterli sızdırmazlığı sağladığı gibi sürekli boşaltmada yaparlar. Böyle bir konveyör tipi şekil (4.9 )'da görülmektedir.

Siklon toz kutusundan ve koni ağzından oluşan toz kayıplarını önlemenin bir yolu da temizleme akışı kullanmaktır. Genellikle ana akışın % 10 mertebesinde temizleme akışı toz emisyonunun % 20-25 azaltır. Temizleme akışı bazen % 25 oranına kadar çıkabilir. Pozitif basınçla çalışan sistemlerde temizleme akışı doğrudan çekilebilir. Negatif basınçlı sistemlerde ikinci bir fan kullanmak gerekir. Siklonlar genellikle negatif basınç altında çalışırlar. Temizleme akışı kullanıldıktan sonra ya siklona giriş kanalına yada ikinci bir siklo-



(a) Girdap yönlendirici engeli

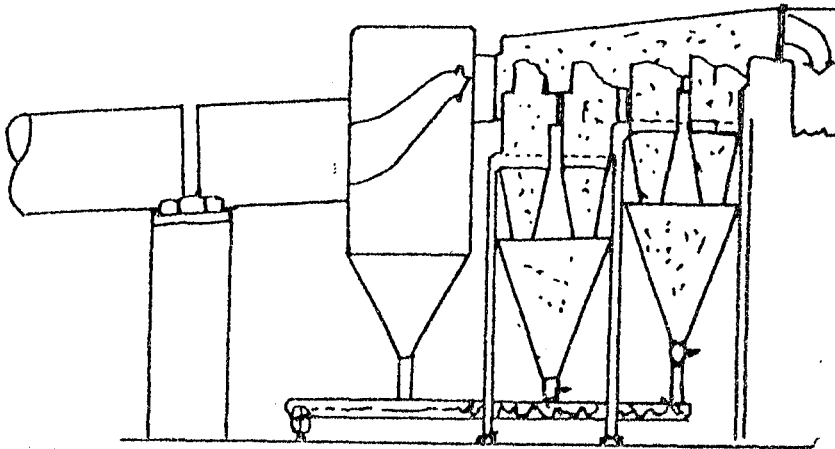
(b) Döner valfli toz boşaltma kapağı

(c) Ağırlık etkili çift kapaklı basınç kapağı

Şekil 4. 8. Toz boşaltma sistemleri (Avcı, 1985).

na gönderilerek temizlenir. Temizleme akımının bir avantajıda toz kutusunun veya toplama sisteminin siklondan uzakta yerleştirilebilmesini mümkün kılmasıdır. Cidardan boşaltmalı sistemlerde temizleme akışı daha düşüktür.

Özellikle cidarlarda birikme özelliği gösteren tozların cidarlardan alınması için kaygan kalıf veya elek tipi kalıflar cidarlara konarak aralıklı titreşimlerle tozlar alınabilir.



Şekil 4.9. Vidalı konveyörlü toz boşaltma örneği (Avcı, 1985).

#### 4.7.6. Pürüzlülüğün etkisi

Pürüzlülük basınç kayıplarını azaltır. Cidarlarda küçük ikincil akımlar oluşturarak girdap şiddetini azaltmaya ve tozların cidarlara ulaşmasını önlemeye yarar. Bu nedenle verimde düşer.

0,5-Lmm. büyüklüğünde kum tozları ile oluşturulan suni pürüzlü bir yüzeye sahip siklonla yapılan deneyde  $K_p$  kayıp katsayısı 8 den 4.1 e düşmüştür. Yine 0,5 mesh'lik bar ağla belli yüzdelerde kaplanan siklon cidarları için 18 m/sn.lik giriş hızına sahip duman gazından kül toplama deneyinden Tablo 4 .6.'daki şu sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.6. Pürüzlülüğün verime etkisi (Avcı, 1985).

| Ağ ile kaplı alan yüzdesi | Toplam verim (%) |
|---------------------------|------------------|
| 0                         | 87,5             |
| 11,6                      | 86,1             |
| 75,5                      | 81,9             |
| 87,0                      | 78               |

Bu sonuçlardan görüleceği üzere verimin artırılması için cidarların mümkün mertebe pürüzsüz olması gerekir. Kaynak ve bağlantılarda hassas yapılmalıdır. Nemli ve yapışkan tabiatlı tozların titreştirme ve akustik etkiyle ve cidarların ısıtılması ile cidarlarda birikmesi önlenmeye çalışılabilir.

#### 4.7.7. Debi ve hızın etkisi

Siklonlarda yük kayıpları hızın (1,5-2) üssü ile ve genellikle karesiyle değişir. Verim ise hızın kare köküyle orantılı değişir. Ancak belli bir hız sınırından sonra verim artışı azalır ve durur. Bu olaya türbülansın neden olduğu sanılmaktadır. Bu özellikle büyük parçacıklarda etkin olur. Küçük parçacıklarda ise etkinliği azdır. Siklonların genelde çalışma hızları 20-25 m/s min altında olup bu hızlarda çalışmak türbülans açısından bir problem oluşturmaz. Yüksek hızlarda

çalışma yapışkan tabiatlı tozların parçalanmasına ve yığının temiz kalmasına neden olur. Optimum hız 15 m/sn. civarındadır.

Deneyssel olarak elde edilmiş bir bağıntı yok ise debi ile verim arasındaki bağıntı şöyle alınır.

$$\frac{100 - E_a}{100 - E_b} = (Q_b/Q_a)^{1/2} \quad (4.55)$$

burada;

$E_{a,b}$  = a ve b şartlarındaki verimi,

$Q_{a,b}$  = a ve b şartlarındaki debiyi gösterir.

#### 4.7.3. Gazın fiziksel özelliklerine etkisi

Gaz viskozitesi, yoğunluğu ve sıcaklığı verim ve yük kayıplarına etkir. Gaz sıcaklığının artması verim ve yük kayıplarının bir miktar düşmesine neden olur. Ayrıca viskozitesinde değiştirir. Verim ile viskozite arasında şu bağıntı kullanılabilir,

$$\frac{100 - E_a}{100 - E_b} = (\mu_a/\mu_b)^{1/2} \quad (4.56)$$

burada;

$\mu_{a,b}$  : Gazın a ve b şartlarındaki viskozitesidir.

Gaz yoğunluğu toz yoğunluğu yanında ihmal edilebilir. Ancak çok yüksek basınçlarda gözönüne alınması gerekir. Yoğunluk arttıkça yük kayıpları artar. Verime etkisi azaltacak şekildedir.

$$\frac{100 - E_a}{100 - E_b} = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p - \rho_a} \quad (4.57)$$

burada;

$\rho_p$  : Parçacık yoğunluğunu  
 $\rho_{a,b}$  : Gazın a ve b şartlarındaki yoğunluğunu verir.

#### 4.7.9. Toz parçacıklarının özelliklerinin etkisi

Tozun yoğunluk, sertlik, yapışkanlık, kitlesel yapısı ve granulometrik dağılımı verimi etkilemesine rağmen bunlardan ancak yoğunluk ve granulometrik dağılımın etkisini ölçebilmekteyiz. Granulometrik dağılım irileştikçe verim artar. Yoğunluk arttıkça verim artar. Verim ile yoğunluk arasında şu bağıntı alınabilir,

$$\frac{100 - E_a}{100 - E_b} = (\rho_a / \rho_b)^{1/2} \quad (4.58)$$

burada;

$\rho_{a,b}$  : a ve b şartlarındaki parçacık yoğunluğudur.

#### 4.7.10. Toz yükünün etkisi

Toz yükünün artması yük kayıplarını azaltır ve verimi yükseltir. Yük kaybıyla toz yükü arasında şu bağıntı kullanılabilir,

$$\Delta P = \frac{\Delta P_T}{(0,03 \sqrt{C} + 1)} \quad (4.59)$$

burada;

$\Delta P_T$  : Toziz havada oluşabilecek kayıp

$C$  : Toz yükü ( $\text{gr}/\text{m}^3$ ).

Toz yükü verimi arttırmasına rağmen yüksek yüklerde toz emisyonu da artar. Yüksek yüklerde ayrıca aşınma ve tıkanma problemi de olur. Yük ile verim arasında şu bağıntı kullanılabilir,

$$\frac{100 - E_a}{100 - E_b} = (C_b / C_a)^{0,171} \quad (4.60)$$

burada;

$C_{a,b}$  = a ve b şartlarında toz yüküdür ( $\text{gr}/\text{m}^3$ ).

#### 4.7.11. Siklonlarda erozyon

Yüksek toz yükü, yüksek gaz hızı ve kaba granulometrik toz dağılımında toz parçacıklarının cidarlara çarpması sonucu erozyon oluşur. Ancak bu özellikler siklon verimini arttırıcı faktörler olduklarından birer dezavantajlardır. Uygun olmayan toz beşaltma sisteminde önemli bir aşındırıcı faktördür. Pürüzlülükte bunlara ilave edilebilir.

En çok erozyona maruz bölgeler ise giriş kangası, koni alt cidarları uygun olmayan bağlantılar, pürüzlü ve asal gerilmelerin olduğu bölgelerdir. Aşınmaya maruz bölgelerin dirençli malzemelerden yapılmalı veya aşınmaya dirençli astarla kaplanmalıdır.

Belli toz yüklerinin belli gaz hızlarında erozyon olayı belirlenlik kazanır. Bu etki Tablo 4. 7 'de görülmektedir.

Tablo 4.7. Toz yükü ve hızın erozyon etkisi (Avcı, 1985).

| Toz yükü ( $\text{gr/m}^3$ ) | Hız (m/s) |
|------------------------------|-----------|
| 0,72                         | 35        |
| 7,12                         | 20        |
| 7128,0                       | 2         |

Erozyonu önlemek için yüzey astarla kaplanacaksa, astar döküm veya savama kabuk yapılabilir. Bu halde astar kalınlıkları 15-25 mm ve uygun gaz hızları 16-25 m/s civarında olmalıdır. Gaz hızlarının daha fazla olması zararlıdır.

Yüksek hızlarda erozyonun azaltmanın bir yolu da  $D_1 / D_2$  oranını arttırmaktır. Ancak bu durumda yük kayıpları artar.

#### 4.7.12. Siklonlarda kirlenme

Genellikle kirlenme ya cidarlarda toz birikmesi yada toz çakışının tıkanması ile meydana gelir. Erozyonu ve yük kayıplarına arttırır, verimi azaltır.

Tozun yapışma özelliği, nem, pürüzlülük, parçacıkların yonuşak

olması vs. cidarlarda toz birikmesini sağlayan faktörlerdir. Toz kutusundan tozun geri çıkışı, koni ucunun dar olması, toz kutusunda gaz sıkışması ve toz kutusunun dolması toz çıkışının tıkanmasına neden olan faktörlerdendir.

Cidarlarda toz birikmesini önlemek için hızları 15 m/s üzerinde tutulmak, varsa ön temizleyiciyi kaldırarak iri parçacıkların siklona girmesini sağlamak, nem oluşumunu önlemek için siklonu ısıtmak, belli sürelerde siklonu yıkamak, cidarları bir astarla kaplayarak zaman zaman titreştirmek, büyük siklonlarda temizleme kapakları açmak belli önlemler olarak düşünülebilir. Koni ucunun geniş yapılması, temizleme akımının kullanılması, tozların toz kutusundan sıkı sık veya sürekli alınması ve toz kutusunda sıkışan havanın alınması suretiyle toz çıkışının tıkanması önlenebilir.

#### 4.8. Siklon Seçimi

En uygun siklonun seçiminde özel bir işin gerektirdiği şartlar, toplama kanalı, toplama verimliliği, topladığı alan, başlangıç maliyeti ve işletme maliyeti (basınç düşüşüne bağlı olarak) gözönünde bulundurulur. Bu parametreler arasındaki oldukça karmaşık ilişki ile, çeşitli dizaynların çok farklı olması seçimi güçleştirmektedir. Genelde, siklonun istenilen toplama kanalına ve istenilen verimliliğe, en düşük basınç düşüşüne sahip olması tercih edilecektir. Çoklu küçük siklonların, tekli büyük üniteli siklonlarda artan inalat maliyetleri ilişkisi karşılaştırıldığında daha avantajlı olduğu gözönünde bulundurulur.

Dizaynlar aerodinamiklik yönünden verimli, konstrüksiyonu bakımından iyi, kaliteli, düzgün pürüzsüz hücre çeperlemine ve tümüyle daireasal bölüme sahip olmalıdır. Uzun konili tiplerin modern dizaynları ( $L \leq 3 + 4 D_1$ ) eğer uygun yer bulunurse tercih edilebilir. Uzunluğun arttırılması, konstrüksiyona karmaşıklık getirir. İyi sonuçlar veren siklon boyut oranları örnekleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Ayırma indeksi B ve basınç kayıp indeksi  $Z_D$  ile değişik dizaynlar uygun bir şekilde karakterize edilmişlerdir (Barth ve Leinefeber, 1964; Dorman, 1974). Bu parametreler,

$$v_D = 4Q / \pi D_1^2 \quad (4.61)$$

partikül sınırlaması ve basınç düşmesiyle gerçek anlamda aksyonel hıza bağlıdır. Giriş hızı  $v_E$  daha yaygın olarak kullanılmaktadır.  $v_D$ , performansı direkt olarak  $D_1$  çapına bağlama avantajına sahiptir.  $D_1$  çapı kullanıcı için daha önemli ölçüdür. Sonuçta eğer,

$$B = v_D \zeta_L / D_1 \quad (4.62)$$

değeri, siklonun verilen şekli için bilinir.  $v_D$ 'nin değişik değerleri için  $\zeta_L / D_1$  değerini yazabiliriz. Her  $v_D$  değeri 760 mmHg basıncında ve 20°C'da hava için,

$$Z_D = \Delta p / (v_D^2 g / 2) (= \Delta p / (0,602 v_D^2)) \quad (4.63)$$

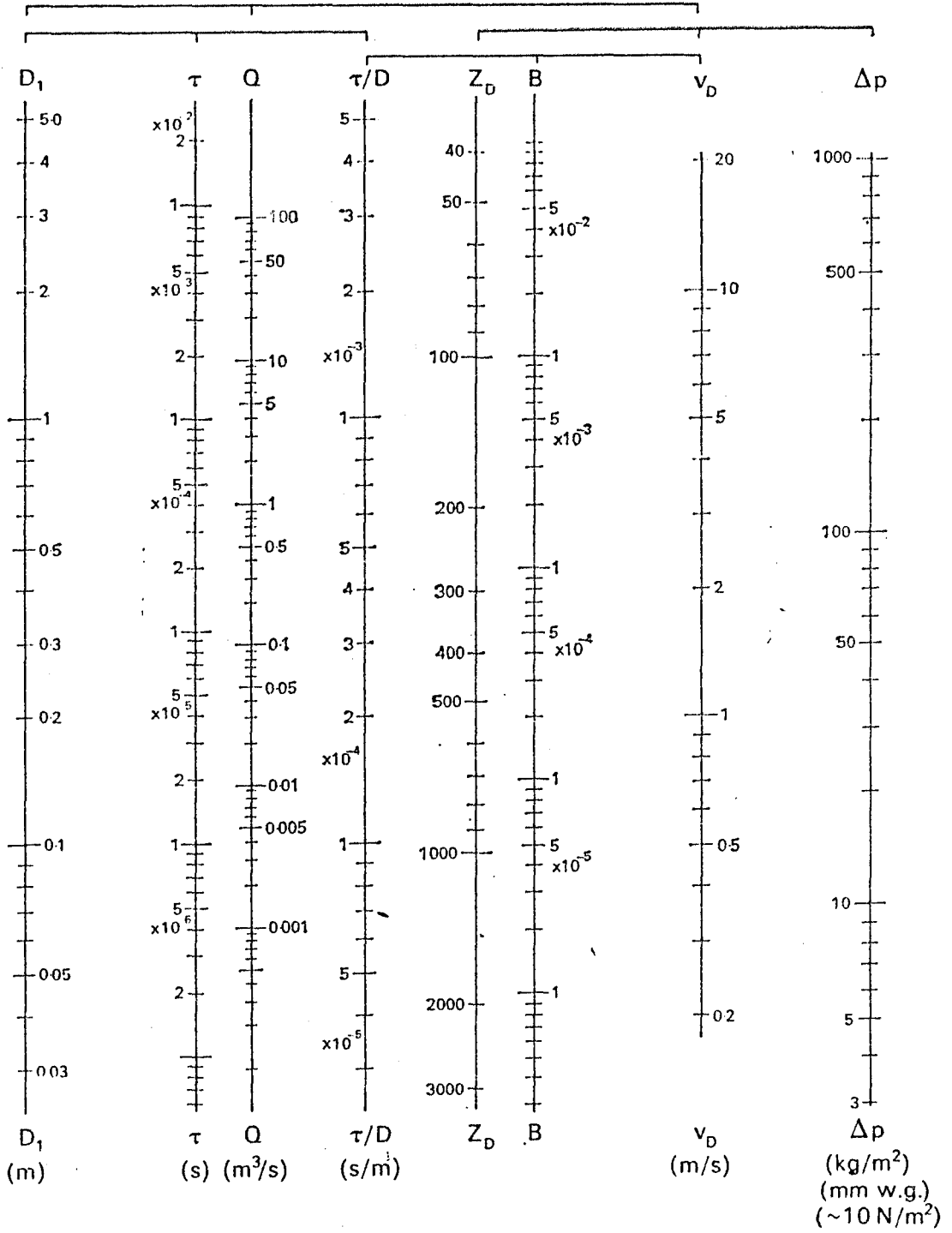
bağıntısı ile verilen belirli bir basınç düşüşüne karşılık gelir.  $Q$  debisi,

$$Q = v_D \pi D_1^2 / 4 \quad (4.64)$$

bağıntısından alınmıştır. Sonuçta  $\Delta p$ ,  $Q$  ve  $D_1$  değerlerinin kombinasyonunun serisi ile istenilen ayırma verimini elde ederiz. Kıyaslamalar, diğer dizaynlar için benzer veriler ile seçilen en uygun dizayn ve ölçüler ile yapılabilir.

Sayısal çizelge nomogram Şekil (4. 10) bu hesaplamaları çözmeye kullanılabilir. Bir model üzerinde verilen  $D_1$  çapı,  $\zeta_L$ ,  $\Delta p$  ve  $Q$ 'nun deneysel ölçülerinden  $B$  ve  $Z_D$ 'yi elde etmek için bu nomogram kullanılabilir.  $D_1$  ve  $Q$  skalası üzerinde belirlenen noktaları birleştirecek bir doğru çizilir. Bu doğru  $v_D$  skalasını kesecektir. Bu elde edilen noktadan  $\Delta p$  skalasındaki değere ikinci bir doğru çizildiğinde bu doğrunun  $Z_D$  skalasında kestiği nokta bize  $Z_D$  değerini verecektir.  $D_1$  ve  $\zeta_L$  skalaları üzerinde belirlenen noktaları birleştiren bir doğru çizildiğinde bu doğrunun uzantısının  $\zeta_L / D_1$  skalası üzerinde kestiği nokta bize  $\zeta_L / D_1$  değerini verecektir. Son olarakta  $\zeta_L / D_1$  ve  $v_D$  skalasının  $B$  skalasını kestiği nokta bize  $B$  değerini verir. Skalaların bu ilişkisi nomogramın üst kısmında gösterilmiştir.





Şekil 4.10. Siklon hesaplamalarında kullanılan nomogram.

(Dorman, 1974)

B ve  $Z_D$  değerleri bilindiği zaman  $D_1$ ,  $Q$ ,  $Z_L$  ve  $\Delta p$  hesaplanmaları bu yapılan işlemin tersinden gidilerek bulunur.

Bir siklonun debisi  $Q$ 'nun  $\text{lm}^3/\text{sn}$ . ile  $1 \text{ kN/m}^2$  değerini aşmayan basınç düşmesi değerleri ile istendiğini düşünelim. Bu şartları sağlayan değişik dizaynlar değişik çap boyutları ve değişik verimler vereceklerdir.  $\Delta p$ 'yi,  $\Delta p = 1 \text{ kN/m}^2$  olarak ve  $Z_D$ 'yi verilen dizayn için uygun alırsak,  $v_D$  nomogramdan okunabilir. Buradan  $Q=1$  olarak alındığında  $D_1$  değeri bulunabilir. Benzer şekilde  $v_D$  den bilinen B değeri bize  $Z_L/D_1$ 'i bulmamızı sağlar ve oradan  $D_1$  kullanılarak  $Z_L$  elde edilir.

Bu yöntem ile üç dizayn (a), (b) ve (c) için Tablo 4. 4 'den elde edilen veriler alınmış ve tabloda verilen B ve  $Z_D$  değerlerini kullanarak aşağıda verilmiştir.

| Siklon | $Q$<br>(m/s) | $\Delta p$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | $v_D$<br>(m/s) | $D_1$<br>(m) | $Z_L$<br>(s)         | $d_p$ ( $\rho=10^3 \text{ kg/m}^3$ )<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|--------------|-----------------------------------|----------------|--------------|----------------------|---|
| (a)    | 1            | 1                                 | 2.3            | 0.75         | $4 \times 10^{-5}$   | 3.6   |
| (b)    | 1            | 1                                 | 6.0            | 0.46         | $5 \times 10^{-4}$   | 14  |
| (c)    | 1            | 1                                 | 4.3            | 0.54         | $2.7 \times 10^{-5}$ | 2.9   |

Siklon (c) en iyi ayırma verimine sahiptir. (c), (a) dan daha küçüktür fakat bu dezavantajına karşılık salyangoz bir girişe sahip olmasından dolayı imalat maliyeti yüksektir. (c) ve (b) arasındaki seçimde ise, (c) daha küçüktür. Fakat partikülleri toplamada daha az verime sahiptir. Tabii bu işlemde geçirilecek tozun büyüklüğüne bağlıdır.

Eğer siklonun boyut oranları değiştirilmek istenirse, etkili olabilecek karakteristikler, yol gösterme amacı ile Tablo 4.3 'de verilen verilerden alınabilir. Bununla birlikte unutulmaması gereken şudurki, bu tabloda B için verilen değerler havanın açılma momentumunun ölçülmesine bağlıdır ve gerçek partikül ayırma testlerine dayanmaz. Şekil (4.5) 'deki  $b_1$  eğrisini ele alalım ve onu  $Z_L$ 'nin değişik değerlerine ayarlayalım (bu ayarlama Şekil (4.5) 'deki logaritmik ska-

la üzerindeki basit transpozisyon ile yapılır). Gerekli ayrıntılı verimliliğin üçlü hesaplamalarında  $\zeta_I$  değerine yaklaşık olarak ulaşıldığında sonuçta gerekli ayrıntılı verimliliği elde edebiliriz. Burada, bilinen  $Z_D$  ve B değerleri ile  $D_1$  ve Q değerlerini ele alabiliriz ve değişik dizaynlardaki siklonlar için  $\Delta p$  kombinasyonuna ve buradan optimum kombinasyon seçimine geçebiliriz. Seçilen siklon için verimlilik kullanılarak genel verimliliğin hesaplanmasına tekrar kontrol etmek akıllıca bir yol olabilir. Pahalı tesisatın kurulmasına başlamadan önce kurmayı düşündüğümüz siklonun modelini inşa edip ondan gerçek duman numuneyi geçirerek sonuçları elde etmek ve değerlendirmek daha iyi olacaktır.

Eğer tekli siklon ile istenen verini almak mümkün değilse, bir sayı kombinasyonunun kullanılması gözönünde bulundurulabilir. Bu durumda, paralel iki veya daha fazla siklonun kullanılması daha uygun olur. Burada muhtemel tehlike toz bulutunu geniş bir partikül büyüklük aralığında taneciği ihtiva etmesidir. Bu durumda yüksek hızlı küçük siklonlar büyük partiküllerin aşırı derecede sıçraması ve karılması olayı ile karşılaşabilir. Benzer durumlarda, büyük tanecikler için düşük basınçlı ön ayırıcılar daha avantajlı olabilir.

## 5. DENEYLER ve SONUÇLAR

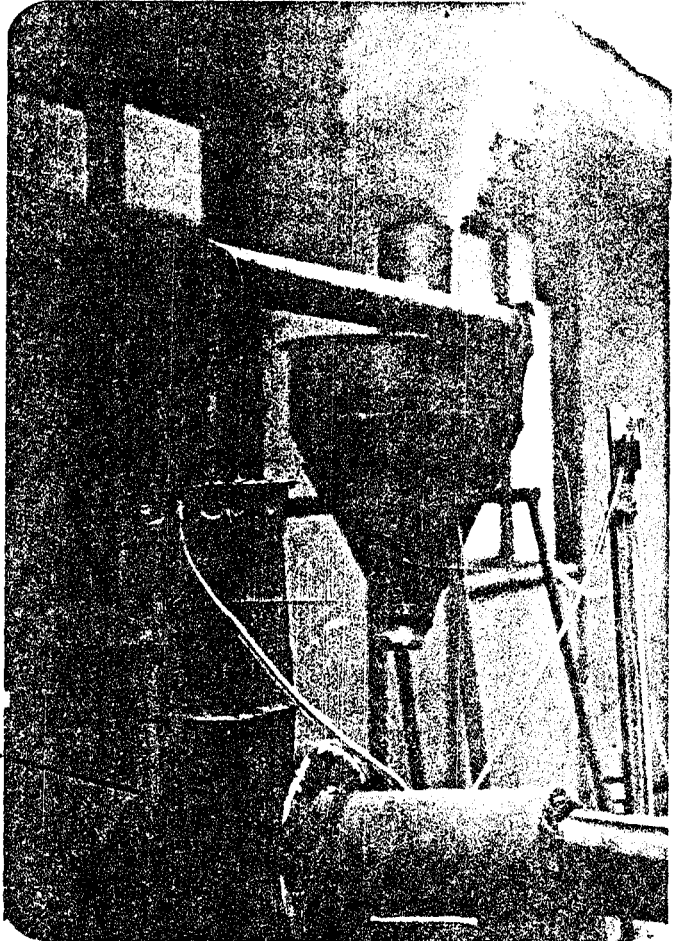
### 5.1. Deneylelerin Amacı

İmalatı yapılan prototip bir siklonun kurum tutma kabiliyeti araştırılarak, kurum tutma deneyleri yapılmış ve bu sırada siklon ana gövdesi içinde çeşitli konfigürasyonlar ayrı ayrı denemeye tabi tutulmuştur.

### 5.2. Deneylein Yapıldığı Yer

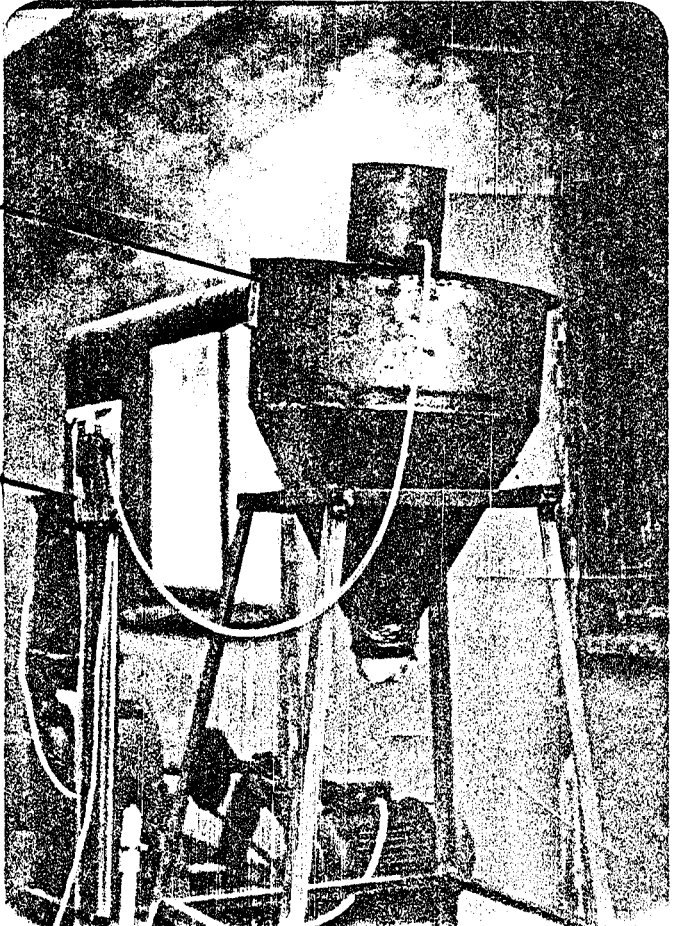
Deney Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında Şekil (5.1)'de fotoğrafı görülen prototip siklonla gerçekleştirilmiştir.

Vantilatör

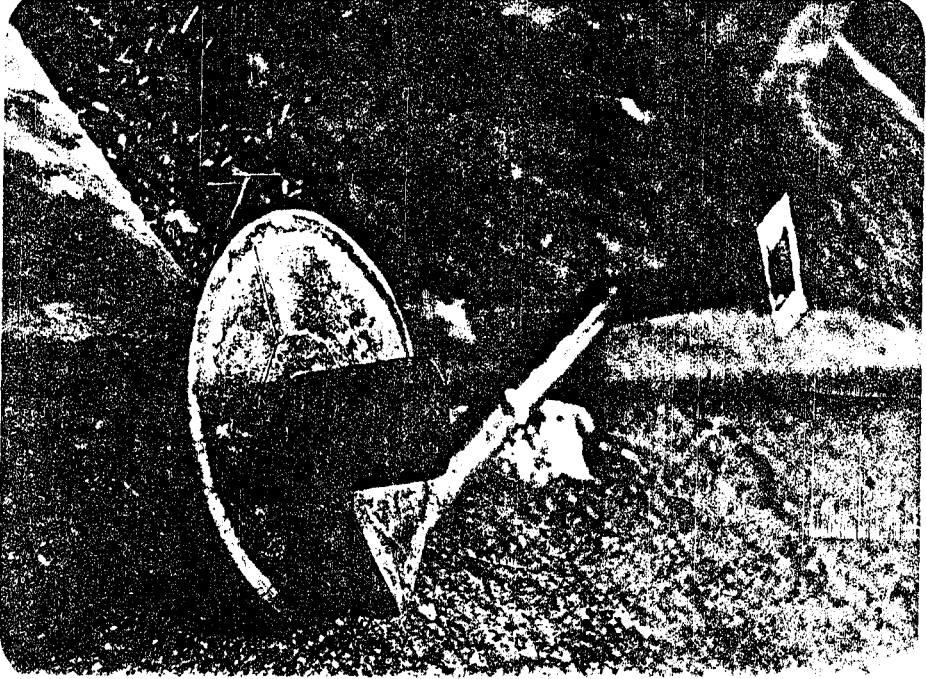


Siklon

Diferansiyel  
Manometre



Şekil 5.1. Siklon seperatörün  
resimleri



Şekil 5.3. Siklon üst kapağı ve duman bağlantısı resmi

### 5.3. Deney Tesisatını Oluşturan Elemanlar

Yapılan deneyler sırasında belli verileri alabilmek için kullanılan ölçüm ve deney elemanları şunlardır.

#### 5.3.1. Siklon

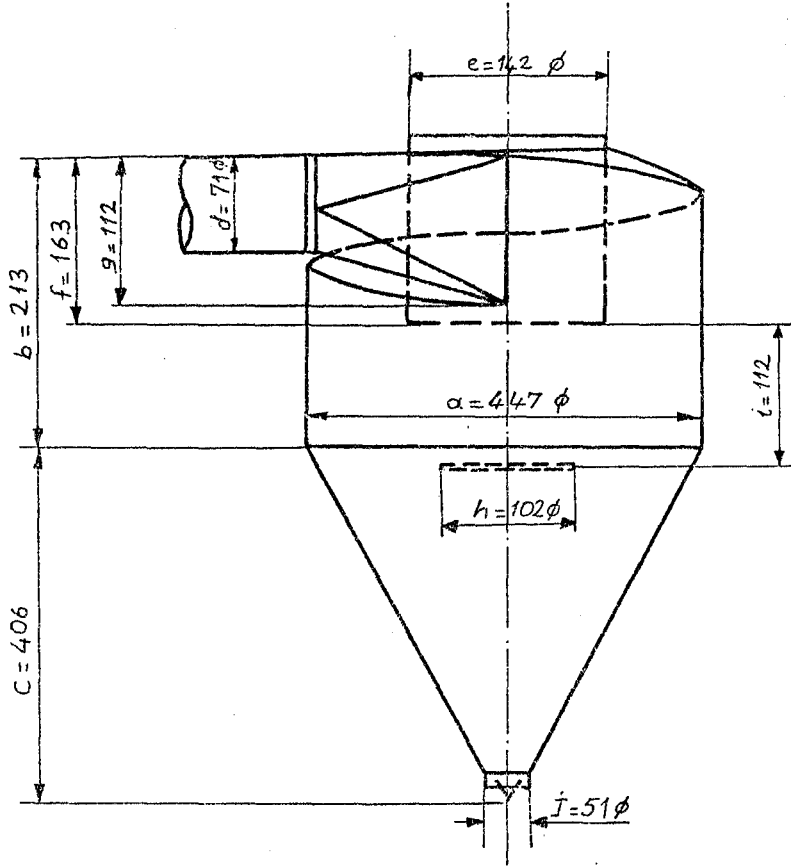
Teğetsel girişli, aksenal boşaltmalı ve silindirik cidarlı tipik siklon olup Tablo 5.1'den seçilen siklon boyutlandırılmış halde Şekil (5.2)'de görülmektedir.

#### 5.3.2. Diferansiyel manometre = (su hazneli)

Basit bir manometredir. Burada siklondaki basınç farkını ölçmek amacı ile kullanılmıştır.

#### 5.3.3. Vantilatör

Deneyde siklon için gerekli gaz debisini sağlayan radyal vantilatördür. Vantilatör bir asenkron motorla tahrik edilmektedir. Deneyde  $n=2845$  d/d ve  $n=1380$  d/d olmak üzere ayrı ayrı iki vantilatör



Şekil 5.2. Denejde kullanılan siklona ait ana ölçüler ve şematik gösterimi.

kullanılmıştır.

#### 5.3.4. Termometre

-40 ile 1200°C arasında elektronik ölçüm yapabilen kontak termometre olup, siklon giriş ve siklon çıkış gaz sıcaklıkları ile siklon sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır.

#### 5.3.5. Terazi

±0,05 gram toleransa sahiptir. Deneyde yakılan yakaçakların ve deney sonucunda elde edilen kurumun miktarının ölçümünde kullanılmıştır.

#### 5.4. Deneyler

Dizaynı gerçekleştirilen prototip siklon, vantilatör ve tesisatı ile beş ayrı deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde havayı kirletici maddeler olarak odun, kömür, lastik kullanıldı. Deneylerde dış ortam sıcaklığı, siklona giriş sıcaklığı ve vantilatör dönme hızı (1380 d/d ve 2845 d/d) sabit tutulmasına karşın, yakalanan kurum yapıcı maddelerde, mukayeseyi rahatlatacak oranlı yükleme yapılamamıştır.

##### 1. Deney;

Vantilatör çalıştırılıp siklona taze hava basılarak debi tayini yapıldı. Vantilatör devir hızı 2845 d/d dır.

Vantilatör çıkış ağız ölçüleri = 14x12 cm<sup>2</sup> olup;

$$v = \sqrt{2 g \Delta h \left( \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1} \right)} \quad (5.1)$$

5.1 denkleminde;  $v = 13,51$  m/sn.

$Q = 0,22$  m<sup>3</sup>/sn.

olarak saptandı.

##### 2. Deney;

Bu grup deneyde ısı kaynağında odun ve kömür (Tunçbilek kömürü) yakıldı.

### 3. Deney;

Bu grup deneydede ısı kaynağında 2. grup deneyden farklı miktarda olmak üzere odun, kömür ve bantlı konveyör lastiği yakılmıştır.

### 4. Deney;

Bu deneyde Şekil (5.3)'de görülen prototip siklonun kapağına Şekil (5.4-5)'de görüldüğü üzere 10x9 cm boyutlarında 6 adet, 10x4,5 cm boyutlarında 5 adet kanat belli düzen içinde aralık bırakılarak tespit edildi. Bu deney esnasında vantilatör dönüş hızı 1380 d/d ya düşürülmüştür.

### 5. Deney;

Bu deneyde siklon gaz çıkış kesiti aynı bırakılıp üst kapağa monte edilen kanatlar çıkarıldı. Kurum dönüş engelleyicisi boyu 10 cm uzatıldı Şekil (5.6) ve (5.7).

## 5.5. Sonuçlar

### a) 2. ve 3. grup deneylerde;

Dış hava sıcaklığı (2-3)<sup>o</sup>C olmuş, vantilatör dönüş hızı ise 2845 d/d da tutulmuştur. 4. ve 5. grup deneylerde ise dış hava sıcaklığı (3-4)<sup>o</sup>C olmuş ve vantilatör dönüş hızı 1380 d/d 'da tutulmuştur (Tablo 5.1).

b) 2. ve 3. grup deneylerde toplam direnç ( $\Delta p$ ) ve giriş hızı sabit tutulmasına rağmen 2. deneyde yakılan 22,3 kg yakıttan 800 gr kurum, 3. deneyde ise 460 gr kurum, 4. deneyde hız artmasına ve toplam direnç düşmesine karşın 1380 d/d lık vantilatör ile 260 g kurum, 5. deneyde ise vantilatör dönüş hızı 1380 d/d da iken 12 kg yakıt ile toplam direnç minimum değere indirgenip, 420 gram kurum tutulmuştur (Tablo 5.1).

c) Hernekadar eşdeğer miktarda yakıt kullanılmadıysada; Hava kanatçıklarının kullanıldığı 4. grup deneyde vantilatör dönüş hızı 1380 d/d ya düşürülmüş olmasına karşın daha fazla kurum tutulmuştur. Dolayısı ile siklonlarda kurum tutma verimini içine konacak perdelerle arttırabiliriz.

d) 1. deney Hidrolik Makinalar Laboratuvarı mevcut deney seti ü-

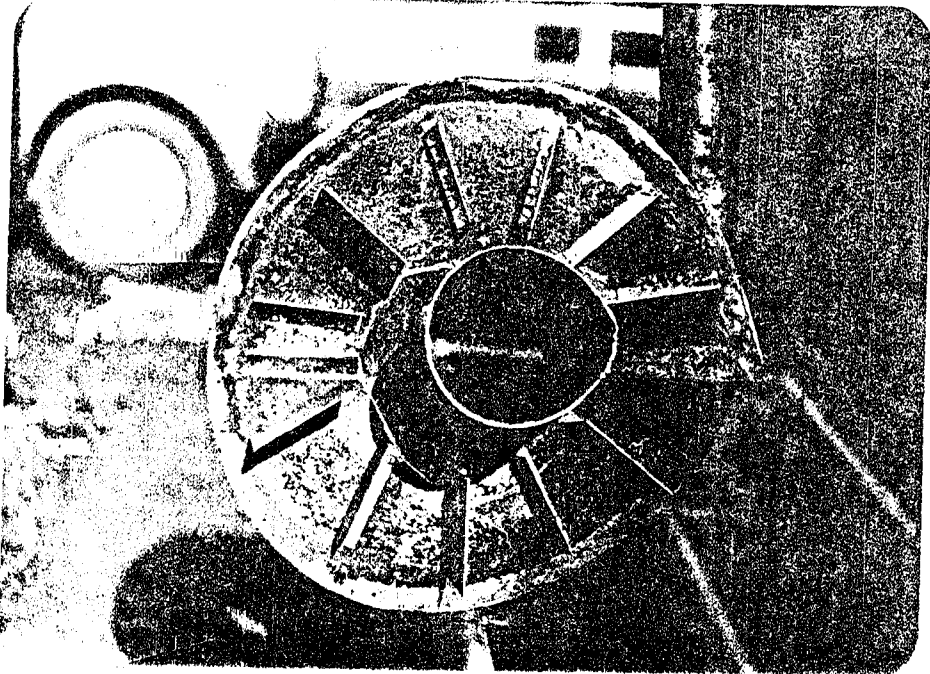


Tablo 5.1. Yapılan deneylerin verileri.

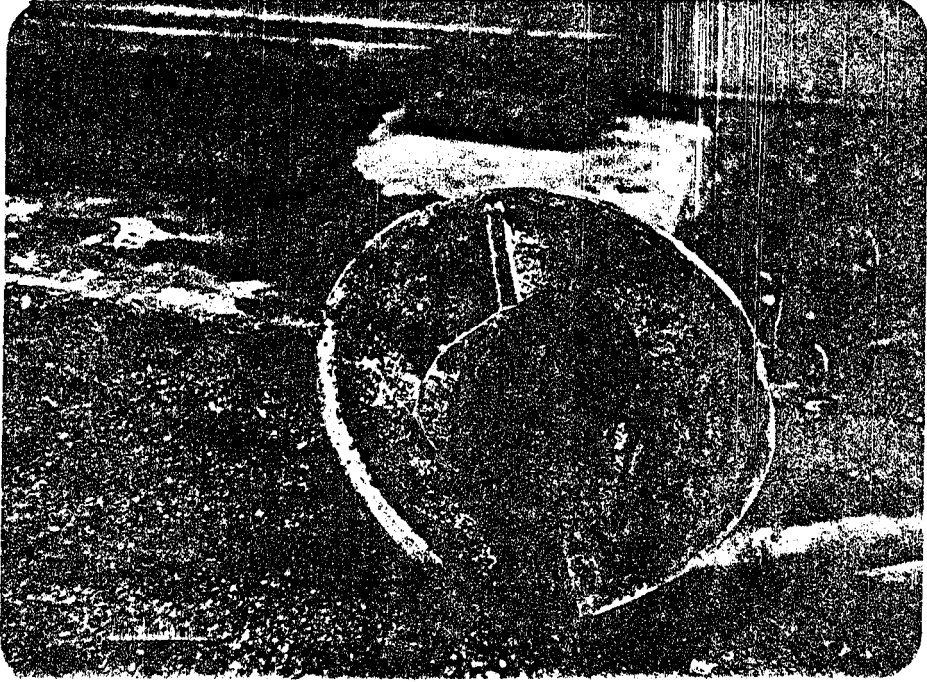
| Deney No | Odun Mik. (kg) | Kömür Mik. (kg)<br>Tunç bilek | Lastik Mik. (kg) | v m/sn | $\Delta P$ mmSS | Tutulan kurum | Dış hava sıcaklığı °C | Siklon giriş °C | Siklon sic. °C | Siklon çıkış duman sic. °C | Fan motoru devri d/d |
|----------|----------------|-------------------------------|------------------|--------|-----------------|---------------|-----------------------|-----------------|----------------|----------------------------|----------------------|
| 1        | -              | -                             | -                | 13.51  | 11              | -             | 20                    | 20              | 10             | 10                         | 2845                 |
| 2        | 2,3            | 20                            | -                | 9.98   | 5               | 800 g         | 2-3                   | 208             | 76             | 106                        | 2845                 |
| 3        | 8              | 12                            | 6                | 10     | 5               | 460 g         | 2                     | 260             | 110            | 147                        | 2845                 |
| 4        | 5              | -                             | 2                | 8.15   | 4               | 280 g         | 0-3                   | 275             | 215            | 152                        | 1380                 |
| 5        | 12             | -                             | -                | 5.76   | 2               | 420 g         | 4                     | 258             | 206            | 148                        | 1380                 |



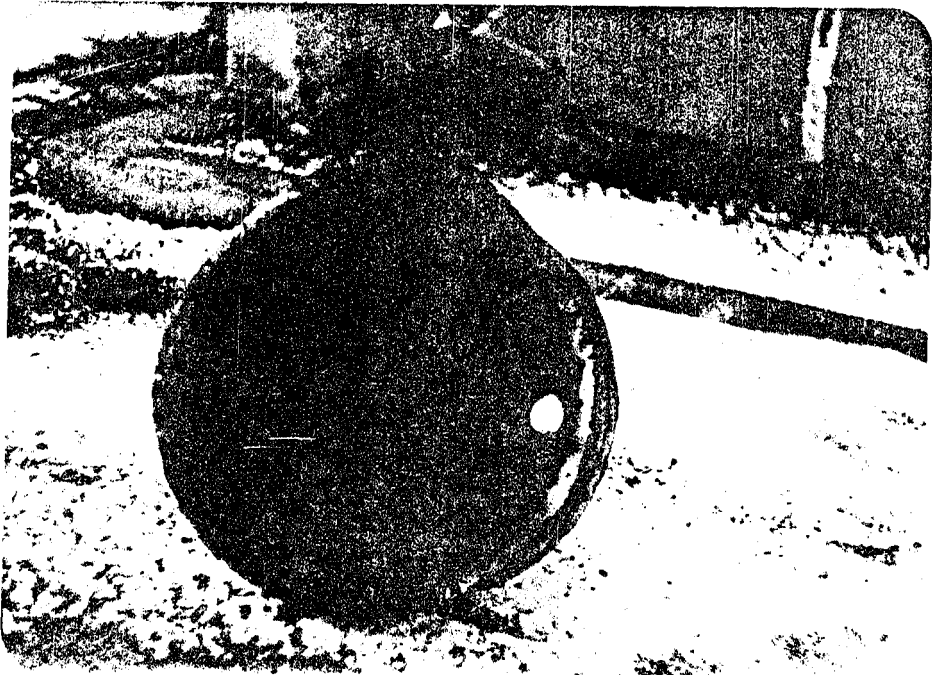
Şekil 5.4. Siklonun kanatlı üst kapağının resmi



Şekil 5.5. Kanatlı üst kapağın önden görünüşü



Şekil 5.6. Kânatçıkları çakartılan üst kapak resmi



Şekil 5.7. Toz engelleyicinin görüntüsü

zerinde yapıldığından ( $\Delta p$ ) direnç yüksek çıkmıştır.

Deneylerden anlaşıldığı üzere, siklon çıkış sıcaklığı düşük tutulduğu sürece siklon veriminin artacağı söylenebilir. Fakat sıcaklığın fazla düşürülmesinin yoğunlaşmaya neden olacağı unutulmamalıdır.

#### 5.6. Siklonların Baca Gazı Temizleyicisi Olarak Kullanılmasının Tahlihi

Baca emisyonunu oluşturan yakıtların bacaları odun, kömür ve petrol ürünleridir. Bu yakıtlardan en önemlisi kömür yakıtlardır. Parçacık kirlenmesinin büyük bir kısmı kömür yakıtların yakılması ile oluşur. Bu yakıtların bileşiminde Tablo 3.2'de görüldüğü gibi bir çok maddenin bulunması ve bunlardan bir kısmının daha sonra zararlı bileşikler oluşturması ve genelde herbirinin az veya çok zararlı etkiye sahip olması nedeniyle emisyonun önlenmesi veya asgariye indirilmesi gerekmektedir. Bu kontrolü yapabilmek için gerek yakıtların ve gerek yakma sistemlerinin sürekli kontrolü ve standardizasyon gereklidir. Aksi halde şimdi olduğu gibi bir kısım kontrol imkanları ortadan kalkınca geriye daha kısıtlı şartlar altında emisyon kontrolü kalır. Bunun sonucunda yapılan kontrollerin maliyetide hızla yükselir.

Ülkemizde kirlenme kontrolü için geliştirilmiş bir kontrol mekanizması yoktur. Bu konuda yapılan çalışmalar daha yenidir. Ankara gibi büyük oranda kirlenmeye maruz bölgelerde kısıntılı yakma, kaliteli kömür kullanma ve kömür yakma türü ile filtreleme gibi emisyonu azaltıcı çarelere başvurulmaktadır. Bu çarelerden biri olan kaliteli kömür kullanımı kendi başına bir problemdir. Ülkemizde yeterince bulunamayan ve mevcut kaynaklardan önemli bir bölümü için özel kullanım sahaları bulunduğundan ısınma amacıyla kullanılacak kaliteli kömür ithal etmek durumuna kadar gelindi. Oysa ülkemizde kalitesiz ve normal kömürlere bol miktarda bulunmaktadır. Bunların kullanımı hem ülke ekonomisi için hem de dar gelirli vatandaşların alım gücüne uygun olması açısından gereklidir. Bununla beraber imkanların araştırılarak optimum çözümlerin bulunması zorunludur. Tablo 5.2'de kömür kalitesinin emisyon ve emisyon kontrol imkanlarına etkisi görülmektedir.

Tabloda görüldüğü gibi kömür kalitesi iyileştikçe emisyon azalmakta ve daha kolay kontrol imkanı oluşmaktadır. Kömür kalitesi azaldıkça parçacık emisyonu artmakta ve gerekli verimde büyümektedir. Bu

Tablo 5.2. Kömür kalitesinin parçacık emisyonu ve gerekli verime etkisi (Avcı, 1985).

| Isı ihtiyacı | Kömürün ısısal değeri | Gerekli yakıt | Kül oranı | Emisyon faktörü | Emisyon | $E_T$ |
|--------------|-----------------------|---------------|-----------|-----------------|---------|-------|
| kcal/h       | kcal/kg               | kg/h          | % A       | kg/ton          | kg/h    | %     |
| 350000       | 6500                  | 54            | 10        | 10              | 5,4     | 90    |
|              | 5000                  | 70            | 10        | 10              | 7       | 93    |
|              | 3500                  | 100           | 20        | 10              | 20      | 97    |
|              | 2000                  | 175           | 30        | 10              | 52,5    | 99    |

durumda emisyon kontrolü yanında standartlarında büyütülmesi gerekir ki buda arzulanan bir durumdur.

Değişik ülkelerde kirlilik kontrolü amacı ile değişik standartlar uygulanmaktadır. Bölüm 2'de bu standartlara örnekler verilmişti. Biz burada kirlenme konusuna değinirken Tablo 2.4'de giriş ısı yüküne bağlı olarak verilen standartları gözönüne alacağız. Çeşitli yakma sistemleri için emisyon faktörü ve kül granulometrisi içinde Tablo 2.3'te verilen değerler gözönüne alınacaktır.

Tablo 2.3'te görüldüğü gibi kömür kalitesi yanında emisyonu etkileyen diğer önemli bir etkende ateşleme sistemidir. Görüldüğü gibi siklon ve stokerli sistemlerde emisyon faktörü daha küçük iken diğerlerinde daha büyüktür. Elle ateşlemeli sistemler için verilen emisyon faktörü oldukça büyük olduğu gibi kül granulometriside oldukça küçüktür. Ancak bu sistem için verilen değerlerin dizayn açısından kullanılmaması tavsiye edilmiştir. Böyle olmakla birlikte buradan anlaşılan elle ateşlemeli sistemlerde emisyonun fazla ve toz granulometrisinin daha ince olduğudur. Bu hal bu tür sistemlerin kontrolünü güçleştirir.

Parçacık emisyonu kontrolünde kullanılan araçlardan biri olan siklonlarla normal olarak 15 mikron civarı için % 95 üzerinde verim elde edilebilir. Çok küçük siklonlarla % 95 verim için 2-3 mikron

civarına kadar inebilir. Deneyde kullanılan  $D_1 = 480$  mm çapında tipik siklon örneği için  $d_k = 0,9$  mikron ve % 95 verim için  $d = 6$  mikron elde edilmişti. Bu sonuç siklonlar için oldukça iyi olarak kabul edilebilir. Bu deneyde kullanılan toz numunesi uçucu kül bileşenleri ile büyük benzerlik gösterdiğinden bu deney siklonunu ve deney sonuçlarını baca gazı temizlemesi hali için irdelenmek daha gerçekçi olacaktır. Böyle bir siklonun herhangi bir ateşleme sistemine sahip bir ocağın baca gazı temizleyicisi olarak kullanılması halinde değişik kritik çaplar için elde edilebilecek verimler Tablo 5.3'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Tipik siklonla değişik kritik çaplarda değişik ateşleme sistemlerinden elde edilebilecek verimler (Avcı, 1985).

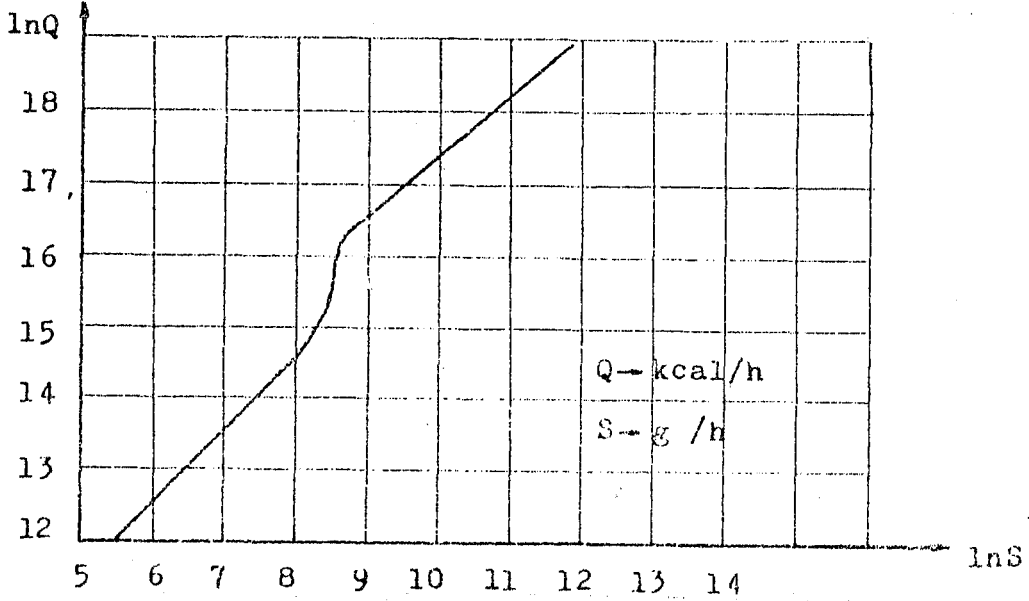
(verimler Tablo 2.3'teki granulometrilere için elde edildi)

| Kritik parçacık çapı mikron | Ateşleme sistemi |           |        |          |                 |
|-----------------------------|------------------|-----------|--------|----------|-----------------|
|                             | elle at.         | pülverize | siklon | stokerli | yayıcı stokerli |
| 0,9                         | 75               | 95,7      | 83,1   | 99,2     | 99,6            |
| 1,5                         | 67               | 93,5      | 78     | 98,5     | 98              |
| 3                           | 53               | 87        | 63     | 97       | 95,3            |
| 5                           | 37               | 82        | 54     | 95,5     | 94              |

Tablo 5.2'de görüldüğü gibi elle ateşlemeli sistemler hariç diğer bütün sistemler için elde edilebilir verimler oldukça iyidir. Elle ateşlemeli sistemlerde de muhtemelen toz granulometrisi daha büyük ve emisyon faktörü daha küçüktür. Burada gösterilenler sınır değer olabilir. Elle ateşlemeli bir sistem için deneysel sonuçlar olmadığından bu ateşleme sistemi için yine Tablo 2.3'teki değerler gözönüne alınacaktır. Ancak azda olsa bir kısım parçacıkların daha büyük çaplara sahip olacağı gözden uzak tutulmayacaktır.

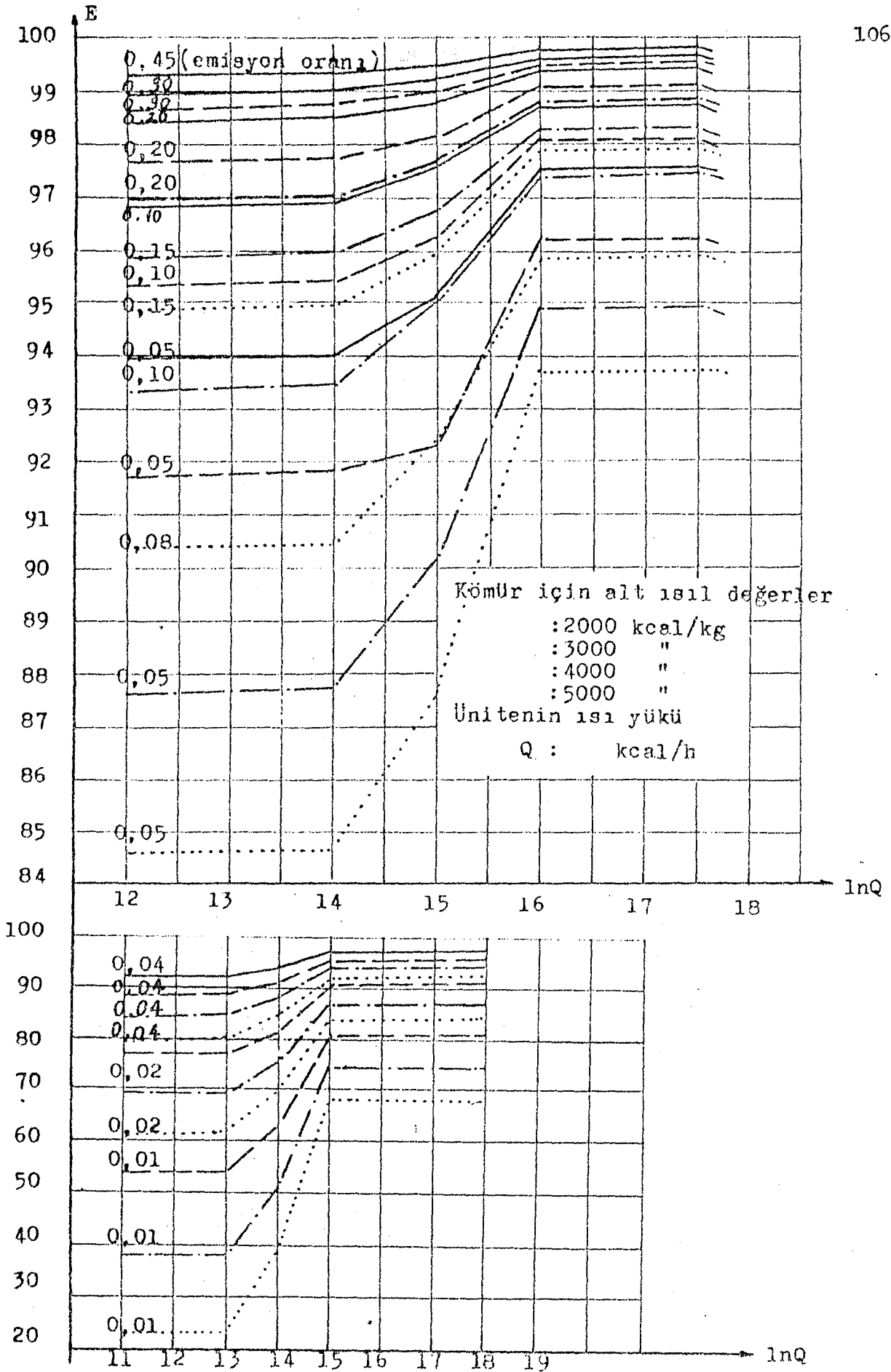
Değişik sistemlerin kontrol edilebilme imkanlarını değerlendirmek için Tablo 2.4'de verilen ve altta grafik olarak verilen standartlar gözönüne alınarak değişik kalitede kömürlerin değişik emisyon oranla-

rı için gerekli verimi gösterir eğriler çizilmiştir. Bu eğriler Şekil (5.8)'da görülmektedir.



Şekil 5.8. Isıl yüke bağlı olarak parçacık emisyonu standartları (Avcı, 1985).

Ateşleme sistemlerinden biri ve ülkemiz açısından en yaygın olanı elle ateşlemeli sistemlerdir. Daha önce verilen verim değerlerinden ve kabul edilen granulometrik dağılımından görüleceği gibi bu tür sistemler için siklonlarla elde edilebilecek verim normalde %70-75'i geçmez. Ancak paralel siklon düzeneği, toz yükünün fazlalığı ve granulometrik dağılımın daha büyük olma ihtimali gözönüne alındığında elde edilebilecek verim % 90 civarına kadar çıkabilir. Küçük üniteler için tek siklon kullanılarak % 85 civarına kadar verim elde edilebilir. Çapı 1 m üzerinde olan siklonlarda verim % 30-40 civarına kadar düşebilir. Bu tür sistemlerde her kalitede kömür yakmak mümkün olduğu için yanma sonucu oluşacak emisyon oranları ve bunlara gerekli kontrol verimleri de farklı değerdedir. Bu sistemlerde oluşabilecek minimum emisyon oranı 0,07 kg/ kg yakıt'dan daha fazladır. Bu şartlarda herhangi bir kömür kalitesi için gerekli verim % 90'ın üzerindedir. Bu durumda siklonlarla standartları gerçekleyecek verim elde etmek çok güç veya imkansızdır. Ancak kaliteli kömür kullanarak çok küçük siklon-



Şekil 5.9. Değişik kömür kalitesi ve emisyon oranı için ünitenin ısı yüküne göre standartları gerçekleştirilmesi için gerekli verim (Avcı, 1985).



larla veya standartları yüksek tutarak gerekli verim elde edilebilir-  
sede birincisi ekonomik değil ve ikincisi ise kirlenme açısından uy-  
gun değildir. Bu sistemlerde siklonları kullanmak ancak parçacık  
emisyonunu büyük oranda azaltır. Başka bir alternatif varsa onu yoksa  
siklonları kullanmak hem faydalı hem de gereklidir.

Siklon atışleme sistemleri için siklonlarla elde edilebilecek ve-  
rim %50-85 arasındadır. Siklon büyüklüğüne bağlı olarak ve toz yüküne  
bağlı olarak elde edilebilecek verim değişir. Küçük yada paralel sik-  
lonlarla %85 verim üzerine hatta %90 civarına çıkabilir. Bu tür sis-  
temler yapıları nedeniyle parçacıkların bir kısmını tutarlar ve az  
miktarında ve çoğunlukla küçük parçacıkların emisyonuna müsaade ederler.  
Bu sistemlerden ortalama olugabilecek maksimum emisyon oranı %5 civa-  
rındadır. Genelde bu oranın altında olup kcal/kg asal değere sahip  
kömürlerden daha kaliteli kömürler için gerekli verim %90'nın altın-  
dadır. Normal ve kaliteli kömürler kullanıldığında siklonlarla rahat-  
lıkla emisyon kontrolü yapılabilir. Bu tür sistemlerde siklonların  
emisyon kontrolünde kullanılması ekonomik olduğu gibi çoğunlukla ye-  
terlidir.

Pülverize sistemlerde siklonlar kullanıldığında %80-95 civarında  
verim elde edilebilir. Fazla büyük siklonlarla elde edilebilir verim  
%70 altına kadar düşebilir. Bu tür sistemlerde emisyon oranı nispeten  
fazla olup %30 civarına kadar çıkabilir. Bu halde gerekli verim %99  
civarındadır. Bu verim 3000 kcal/kg'dan daha yüksek kalitede kömür kul-  
lanılmasıyla %97 civarına düşürülebilir. Kül nisbeti %20'nin altında  
olan kömürler kullanıldığında nisbeten küçük siklonlar kullanılarak  
emisyon kontrolü sağlanabilir. Kaliteli kömürler kullanıldığında ra-  
hatlıkla emisyon kontrolü yapılabilir. Bu tür sistemler için siklon-  
larla uygun dizaynlar yapılarak emisyon kontrolü yapılabilir. Başka  
alternatif çözümler olduğunda onlar kullanılabilir.

Yayıcı stokerli sistemlerde siklonlarla elde edilebilecek verim  
%85-99 civarındadır. Bu sistemlerde emisyon oranları diğerlerine nisbe-  
ten daha fazladır. Bunlar genellikle büyük sistemler olduklarından  
çoğunlukla kalitesiz kömürler kullanılmaktadırlar. Özellikle enerji  
üreten tesislerde kullanılırlar. Bunlarda standartları gerçekleyecek  
gerekli verimler %86-99,8 arasında değişmektedir. Küçük verimler ka-