

# ÇEV 715 Hava Kirliliği Modellemesi ve Uygulamaları

## Hava Kirleticileri

Özgür ZEYDAN (PhD.)

<http://www.ozgurzeydan.com/>

## Hava Kirleticileri

### Gazlar

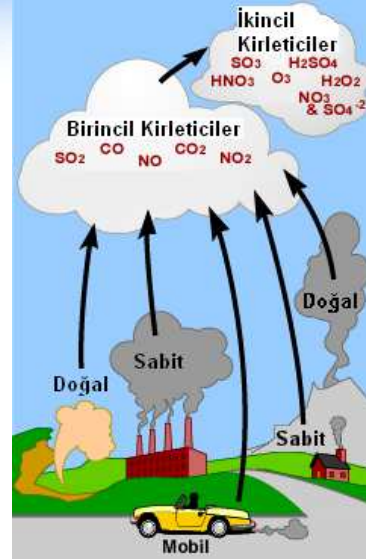
- Karbon monoksit
- Azot oksitler
- Kükürt oksitler
- Hidrojen sülfür
- Uçucu organik bileşikler

### Aerosoller

- Toplam çökebilin katılar  
(0.1 - 30  $\mu\text{m}$ )
- Partikül maddeler

## Hava Kirleticilerinin Sınıflandırılması

- Kaynaklarına göre:
  - Antropojenik
  - Doğal
- Harekete göre:
  - Sabit
  - Hareketli
- Atmosferde oluşumlarına göre
  - Birincil
  - İkincil
- Kaynak türüne göre
  - Noktasal
  - Çizgisel
  - Alansal



## Karbon Monoksit (CO)



- Renksiz ve kokusuz bir gazdır.
- Tam yanmama sonucu oluşur.
- Başlıca kaynağı motorlu taşıtlardır.
- Soba zehirlenmeleri
- Yüksek konsantrasyonda solunmasıyla kandaki hemoglobin ile birleşerek karboksihemoglobin (COHb) oluşumuna sebep olur. Kanın oksijen taşıma kapasitesi düşer. Tepkime geri dönüşümsüzdür.
- Zehirleyicidir, ölüme sebep olabilir.

## Karbon Monoksit Zehirlenmesi Belirtileri



## Azot Oksitler (NOx)

- (NOx = NO + NO<sub>2</sub>)
- Azot monoksit (NO)
- Azot dioksit (NO<sub>2</sub>)
  
- NO + NO<sub>2</sub> toplamı azot oksitler (NOx) olarak adlandırılır.
- (%95)(%5)

## Azot Monoksit (NO)



- Renksiz bir gazdır.
- Orta derecede toksik gazdır.
- Başlıca kaynağı motorlu taşıtlar ve diğer yanma işlemleridir.
- Oksijenle reaksiyonu sonucunda NO<sub>2</sub> oluşur.
- $\text{NO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$

## Azot Dioksit (NO<sub>2</sub>)

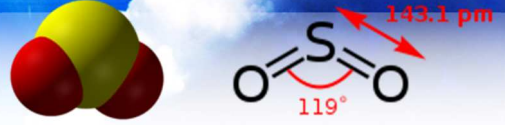


- Kahverengi veya turuncu renktedir.
- Yüksek konsantrasyonları toksiktir.
- Gün ışığında uçucu organik bileşikler ile reaksiyonu sonucunda yer seviyesi ozonu oluşur.
- Havadan ağır olan NO<sub>2</sub>'nin suda çözünmesi ile Nitrik Asit (HNO<sub>3</sub>) oluşur. (Asit yağmurlarına sebep olur)

## Kükürt Oksitler (SO<sub>x</sub>)

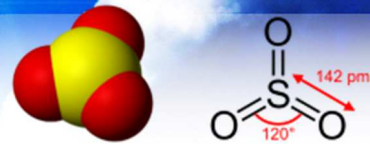
- (SO<sub>x</sub> = SO<sub>2</sub> + SO<sub>3</sub>)
- Kükürt Dioksit (SO<sub>2</sub>)
- Kükürt Trioksit (SO<sub>3</sub>)
- Hava kirliliği açısından önemli kükürt oksitlerdir.

## Kükürt Dioksit (SO<sub>2</sub>)



- Renksiz bir gazdır.
- Başlıca kaynağı fosil yakıtlarıdır.
- Solunum sistemine, bitkilere ve materyallere zarar verir.
- Suda çözünerek H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>'ü (Sülfüroz Asidi) oluşturur.
- $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$
- Oksijen ile reaksiyonuyla SO<sub>3</sub> oluşur.
- $\text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$

## Kükürt Trioksit (SO<sub>3</sub>)



- Oldukça aşındırıcıdır.
- Solunum sistemini tahriş eder.
- Suda çözünerek H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ü (Sülfürik Asiti) oluşturur. (Asit yağmuru)
- $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$

## Hidrojen Sülfür ( $H_2S$ )



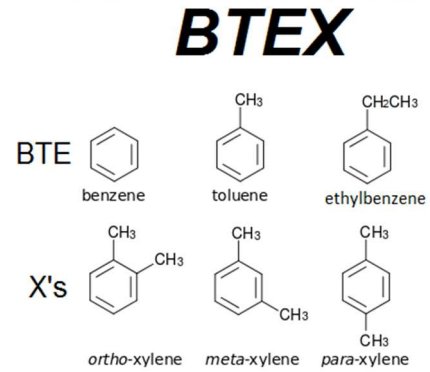
- Renksiz bir gazdır, çürük yumurta gibi kokar.
- Oldukça toksiktir, koroziftir, yüksek oranda alev alabilir.
- Organik maddenin oksijensiz ortamda bozunması (anaerobik digestion) sonucunda oluşur.
- Kanalizasyon sistemlerinde taç korozyonuna sebep olur.

## Uçucu Organik Bileşikler (UOB)

- Volatile Organic Compounds (VOC)
- Metan ( $CH_4$ ) ve Metan Dışı Uçucu Organik Bileşikler (NMVOC) olarak 2 gruba ayrılır.
- Metanın reaktivitesi oldukça düşüktür.
- NMVOC kaynakları motorlu taşıtlardır.
- Ayrıca, yeşil bitkilerin de uçucu organik bileşik emisyonları (biyojenik emisyonlar) vardır.

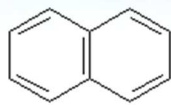
## BTEX Bileşikleri

- **B**enzen ( $C_6H_6$ )
- **T**oluen (Metil Benzen) ( $C_7H_8$ )
- **E**til Benzen ( $C_8H_{10}$ )
- **K**silenler
  - Orto Ksilen (1,2 Dimetil Benzen) ( $C_8H_{10}$ )
  - Meta Ksilen (1,3 Dimetil Benzen) ( $C_8H_{10}$ )
  - Para Ksilen (1,4 Dimetil Benzen) ( $C_8H_{10}$ )

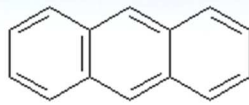


<http://www.gcesystems.com/what-is-btex/>

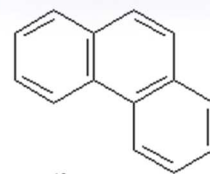
## Çokhalkalı Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)



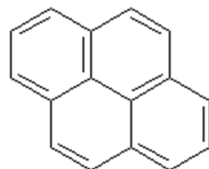
naphthalene



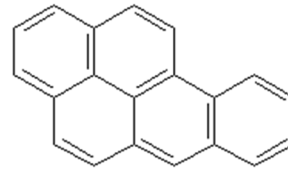
anthracene



phenanthrene



pyrene

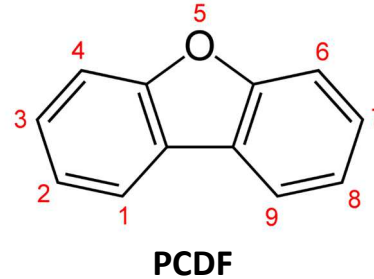
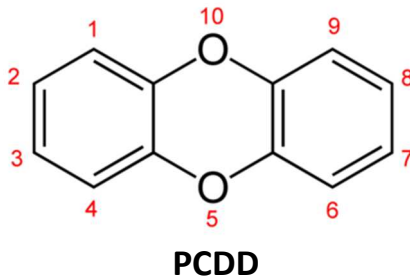


benzo [a] pyrene



## Dioksin (PCDD) ve Furanlar (PCDF)

- PVC, PCB ya da diğer organohalojenlerin 1200 °C'nin altında yanması veya pirolizi sonucunda oluşurlar.
- Cl atomları 1,2,3,4,6,7,8 veya 9 nolu karbonlara bağlanabilir.
- Kanserojen, mutajen ve teratojen bileşiklerdir.



## Dibenzo-p-dioksinler ve dibenzofuranlar için eşdeğerlik faktörleri

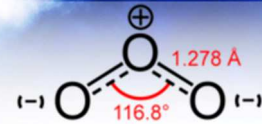
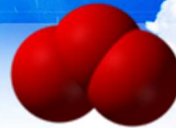
### Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik – Ek 1

|                 |                                    | Toksosite eşdeğerlik faktörü |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------|
| ➤ 2,3,7,8       | – Tetraklorodibenzodioksin (TCDD)  | 1                            |
| ➤ 1,2,3,7,8     | – Pentaklorodibenzodioksin (PeCDD) | 0,5                          |
| ➤ 1,2,3,4,7,8   | – Heksaklorodibenzodioksin (HxCDD) | 0,1                          |
| ➤ 1,2,3,6,7,8   | – Heksaklorodibenzodioksin (HxCDD) | 0,1                          |
| ➤ 1,2,3,7,8,9   | – Heksaklorodibenzodioksin (HxCDD) | 0,1                          |
| ➤ 1,2,3,4,6,7,8 | – Heptaklorodibenzodioksin (HpCDD) | 0,01                         |
| ➤               | – Oktaklorodibenzodioksin (OCDD)   | 0,001                        |
| ➤ 2,3,7,8       | – Tetraklorodibenzofuran (TCDF)    | 0,1                          |
| ➤ 2,3,4,7,8     | – Pentaklorodibenzofuran (PeCDF)   | 0,5                          |
| ➤ 1,2,3,7,8     | – Pentaklorodibenzofuran (PeCDF)   | 0,05                         |
| ➤ 1,2,3,4,7,8   | – Heksaklorodibenzofuran (HxCDF)   | 0,1                          |
| ➤ 1,2,3,6,7,8   | – Heksaklorodibenzofuran (HxCDF)   | 0,1                          |
| ➤ 1,2,3,7,8,9   | – Heksaklorodibenzofuran (HxCDF)   | 0,1                          |
| ➤ 2,3,4,6,7,8   | – Heksaklorodibenzofuran (HxCDF)   | 0,1                          |
| ➤ 1,2,3,4,6,7,8 | – Heptaklorodibenzofuran (HpCDF)   | 0,01                         |
| ➤ 1,2,3,4,7,8,9 | – Heptaklorodibenzofuran (HpCDF)   | 0,01                         |
| ➤               | – Oktaklorodibenzofuran (OCDF)     | 0,001                        |

## Hazardous Air Pollutants

- Kansere veya diğer ciddi sağlık etkilerine sebep olan toksik hava kirleticileridir.
- Evsel, sanayi veya mobil kaynaklardan salınabilirler.
- EPA [Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications](#)

## Troposferik Ozon (O<sub>3</sub>)

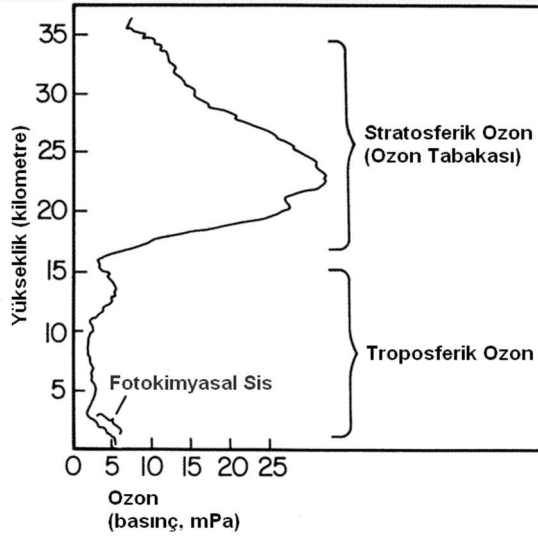


- Troposferde ikincil kirletici olarak oluşmaktadır.
- Fotokimyasal sis olarak da adlandırılır.
- Azot oksitler ile uçucu organik bileşiklerin güneş ışığındaki reaksiyonu sonucu ortaya çıkan fotokimyasal bir kirleticidir.

Güneş ışığı

- UOB + NO<sub>x</sub>  $\xrightarrow{\text{Güneş ışığı}}$  Troposferik ozon
- Oldukça reaktiftir, canlılara ve materyallere zarar verir.
- Solunduğunda boğazda tahriş, öksürük, boğaz kuruluğu, baş ve göğüs ağrısı, akciğer fonksiyonlarında azalma ve astım atakları görülür.

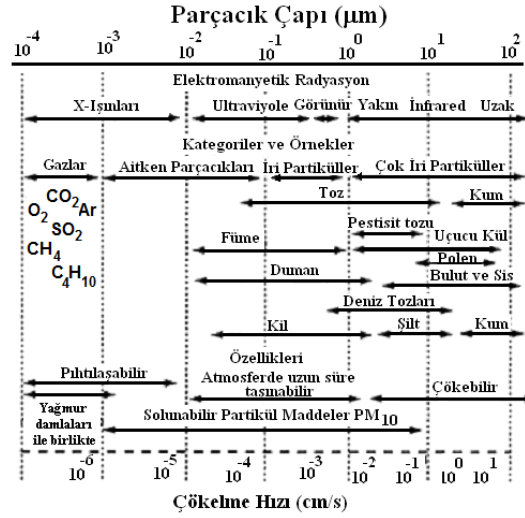
## Ozonun Atmosferde Bulunuđu



## Partikül Maddeler (PM)

- Boyut, kaynak ve kimyasal yapıları bakımından kompleks bir karışım gösteren tozlardır.
- PM<sub>10</sub>: kaba partiküller (aerodinamik çap  $\leq 10 \mu\text{m}$ )
  - Kısa sürede çökerler
- PM<sub>2.5</sub>: ince partiküller (aerodinamik çap  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )
  - Atmosferde uzun süre kalırlar
- PM<sub>0.1</sub>: süper ince partiküller (aerodinamik çap  $\leq 0.1 \mu\text{m}$ )

## Partikül maddelerin boyut dağılımları, özellikleri ve çökme hızları



Godish, T., *Air Quality*, 4<sup>th</sup> ed., CRC Press, U.S.A., 2004

## Partikül Maddelerin Kaynakları

### Doğal

- Volkanlar
- Orman yangınları
- Deniz spreyleri
- Rüzgar ile taşınan çöl tozları
- Biyolojik kaynaklar (polenler, bakteriler gibi)
- Meteor parçacıkları

### Antropojenik

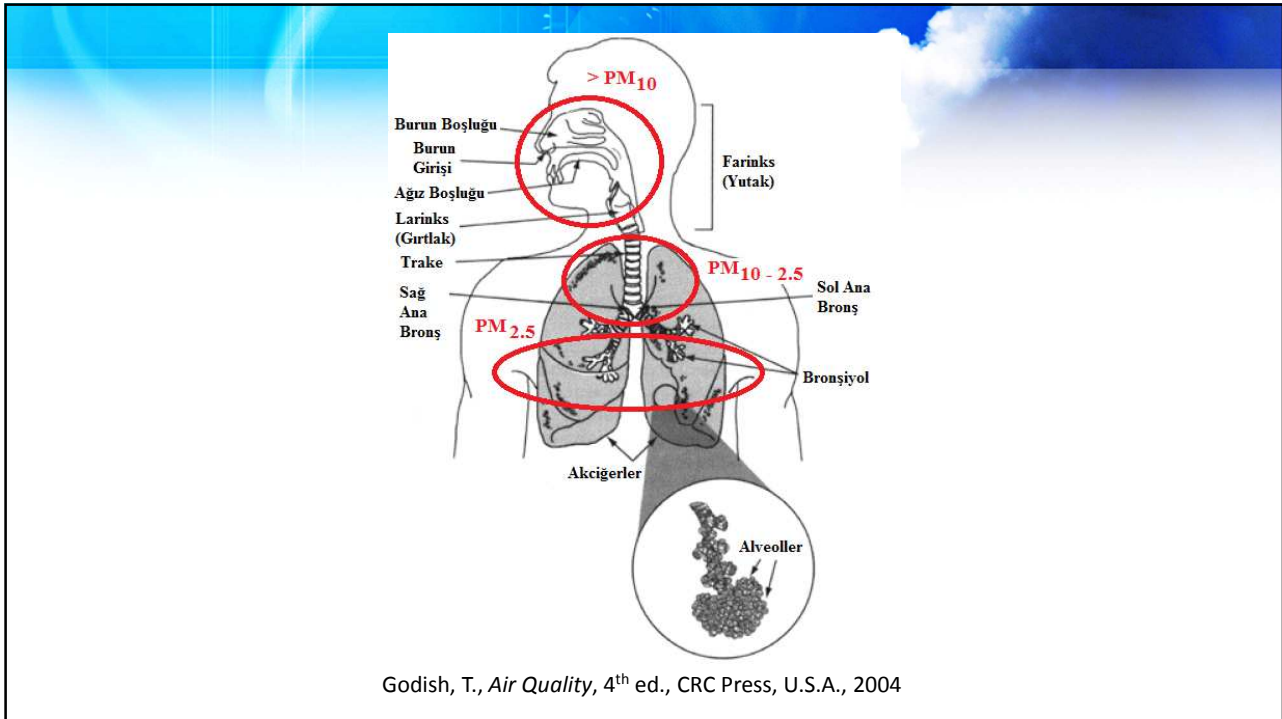
- Ulaşım (dizel yakıt tüketen araç emisyonları)
- Isınma amaçlı tüketilen yakıtların yanması
- Odun sobaları
- Fosil kaynaklı güç santralleri
- Çimento fabrikaları
- Taş ocakları
- Katı ve tehlikeli atık yakma tesisleri
- Çeşitli endüstriyel faaliyetler

## Partikül Maddelerin Kimyasal Yapıları

- Sülfat
  - Nitrat
  - Amonyum
  - Organik bileşikler
  - Asidik maddeler
  - Metaller
- Dizel yakıt emisyonlarında:
- n-alkanlar
  - n-alkanoik asitler
  - Aromatik aldehitler ve asitler
  - Çok halkalı aromatik hidrokarbonlar (PAH)

## Partikül Maddelerin Etkileri

- Güneş panellerinden üretilecek enerji miktarında kayıplar
- Görüş seviyesinin azalması
- Karasal ve sucul ekosistemlerin kimyasal yapılarında değişiklikler
- İklim değişikliği
- Sağlık etkileri



## Temiz ve kirli havadaki kirletici miktarları

| Hava Kirletici        | Temiz kabul edilen havadaki konsantrasyon (ppm) | Kirli havadaki konsantrasyon (ppm) |
|-----------------------|---|------------------------------------|
| SO <sub>2</sub>       | 0.001 - 0.01                                    | 0.02 - 3.2                         |
| CO                    | 1   | 2 - 300                            |
| NOx                   | 0.001 - 0.01                                    | 0.30 - 3.5                         |
| Toplam hidrokarbonlar | 1   | 1 - 20                             |
| Partikül madde        | 10 - 20 µg/m <sup>3</sup>                       | 260 - 3200 µg/m <sup>3</sup>       |

Schnelle, K., B., Brown, C., A., *Air Pollution Control Technology Handbook*, CRC Press LLC, U.S.A., 2002

## Hava Kirleticileri ve Etkileri

| Etkiler                      | Kirleticiler | NH <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | NMVOC | CO | PM <sub>2.5</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | Ağır metallar | Benzen |
|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|----|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|--------|
| Yer seviyesi Ozonu           |              |                 |                 | ++              | ++    | ++ |                   |                 |                 |                  |               |        |
| Asidifikasyon                |              | ++              | ++              | ++              |       |    |                   |                 |                 |                  |               |        |
| Ötrofikasyon                 |              | ++              |                 | ++              |       |    |                   |                 |                 |                  |               |        |
| Kentsel hava kalitesi        |              |                 |                 |                 |       | +  | ++                |                 |                 |                  | +             | ++     |
| Toprak kirliliği             |              |                 |                 |                 |       |    |                   |                 |                 |                  | ++            |        |
| Görüş seviyesinde azalma     |              |                 |                 |                 |       |    | ++                |                 |                 |                  |               |        |
| Aerosol oluşumu              |              | ++              | ++              | ++              | ++    |    | ++                |                 |                 |                  |               |        |
| Sera etkisinin kuvvetlenmesi |              |                 |                 |                 |       |    |                   | ++              | +               | +                |               |        |

+ : orta seviyede etki      ++ : kuvvetli etki

Reis, C. (2005) Costs of Air Pollution Control, Springer

## Hava Kirleticilerin Sağlık Etkileri

### Kısa süreli maruziyet

- Akut semptomlar (öksürük, boğazda tahriş, hırıltılı solunum)
- Baş ve göğüs ağrısı
- Dolaşım ve solunum sistemi sorunları
- İşgücü kaybı
- Ölüm

### Uzun süreli maruziyet

- Dolaşım ve solunum sistemi sorunları
- Astım, KOAH gibi kronik hastalıklar
- Akciğer kanseri
- Ölüm

## Hava Kalitesi Mevzuatı

- Güncel mevzuata erişmek için:
- <http://www.mevzuat.gov.tr/>
- **HAVA KALİTESİ DEĞERLENDİRME VE YÖNETİMİ YÖNETMELİĞİ**  
(Resmi Gazete Tarih: 06.06.2008 Sayı: 26898)
- **SANAYİ KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ**  
(Resmi Gazete Tarih: 03.07.2009 Sayı: 27277)
- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Genelgesi (2013/37)

## Ulusal Hava Kalitesi İndeksi Kesme Noktaları

| İndeks           | HKİ       | SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | CO [µg/m <sup>3</sup> ] | O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] |
|------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                  |           | 1 Sa. Ort.                           | 1 Sa. Ort.                           | 8 Sa. Ort.              | 8 Sa. Ort.                          | 24 Sa. Ort.                           |
| <b>İyi</b>       | 0 – 50    | 0-100                                | 0-100                                | 0-5500                  | 0-120                               | 0-50                                  |
| <b>Orta</b>      | 51 – 100  | 101-250                              | 101-200                              | 5501-10000              | 121-160                             | 51-100                                |
| <b>Hassas</b>    | 101 – 150 | 251-500                              | 201-500                              | 10001-16000             | 161-180                             | 101-260                               |
| <b>Sağlıksız</b> | 151 – 200 | 501-850                              | 501-1000                             | 16001-24000             | 181-240                             | 261-400                               |
| <b>Kötü</b>      | 201 – 300 | 851-1100                             | 1001-2000                            | 24001-32000             | 241-700                             | 401-520                               |
| <b>Tehlikeli</b> | 301 – 500 | >1101                                | >2001                                | >32001                  | >701                                | >521                                  |



## EPA Hava Kalitesi İndeksi

| Hava Kalitesi İndeksi (AQI) Değerler | Sağlık Endişe Seviyeleri | Renkler    | Anlamı   |
|--------------------------------------|--------------------------|------------|--|
| 0 - 50                               | İyi                      | Yeşil      | Hava kalitesi memnun edici ve hava kirliliği az riskli veya hiç risk teşkil etmiyor.   |
| 51 - 100                             | Orta                     | Sarı       | Hava kalitesi uygun fakat alışılmadık şekilde hava kirliliğine hassas olan çok az sayıdaki insanlar için bazı kirlenmeler açısından orta düzeyde sağlık endişesi oluşabilir. |
| 101 - 150                            | Hassas                   | Turuncu    | Hassas gruplar için sağlık etkileri oluşabilir. Genel olarak kamunun etkilenmesi olası değildir.   |
| 151 - 200                            | Sağlıksız                | Kırmızı    | Herkes sağlık etkileri yaşamaya başlayabilir, hassas gruplar için ciddi sağlık etkileri söz konusu olabilir.   |
| 201 - 300                            | Kötü                     | Mor        | Sağlık açısından acil durum oluşturabilir. Nüfusun tamamının etkilenme olasılığı yüksektir.  |
| 301 - 500                            | Tehlikeli                | Kahverengi | Sağlık alarmı: Herkes daha ciddi sağlık etkileri ile karşılaşabilir.   |

## İndeks Hesaplanan Parametrelerin Sınır Değerleri

| Parametre                                  | SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | CO [µg/m <sup>3</sup> ] | O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] | PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|  | 1 Sa. Ort.                           | 1 Sa. Ort.                           | 8 Sa. Ort.              | 8 Sa. Ort.                          | 24 Sa. Ort.                           |
| <b>Ulusal Sınır Değer (2019 yılı için)</b> | 350                                  | 250                                  | 10000                   | 120                                 | 50                                    |
| <b>AB Üye Ülkeleri Sınır Değeri</b>        | 350                                  | 200                                  | 10000                   | 120                                 | 50                                    |

## Uluslararası Hava Kalitesi Mevzuatı

- EPA NAAQS
  - <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaq-table>
  
- AB standartları
  - <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
  
- WHO Ambient (outdoor) air quality and health
  - <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>