YEŞİL AJANDA

Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ

Hava Kirliliğinin Esasları

1 / 6

Temeller

Hava kirliliği nasıl oluşur ve nasıl yayılır: kirletici sınıfları, atmosfer kimyası, dispersiyon ve WHO 2021 PM2.5 kılavuz değeri 5 µg/m^3 tek çerçevede.

1 Temeller

2 Hava Kalitesi Yönetimi ve Envanter

3 Sanayi Kaynakları I

4 Sanayi Kaynakları II

5 Isınma Kaynakları

6 Hareketli Kaynaklar

1

Temeller

BU BÖLÜMDE

1.1	Hava Kirleticileri Nelerdir ve Nasıl Sınıflandırılır?	4
1.2	Birincil ve İkincil Kirletici: Atmosferde Ne Değişir?	15
1.3	Kirletici Havada Nasıl Dağılır? Dispersiyon ve Meteoroloji	22
1.4	Hava Kirliliği Sağlığı ve Ekosistemi Nasıl Etkiler?	37
1.5	Türkiye'de Hava Kirliliği: Çerçeve ve Kaynakların Manşeti	48
1.6	Sonuç	52

Hava kirliliği, küresel ölüm nedenleri sıralamasında **yüksek tansiyondan sonra ikinci risk faktörüdür**. Sağlık Etkileri Enstitüsü ile IHME'nin State of Global Air 2024[1] raporu, 2021 yılında dünya genelinde **8,1 milyon ölümü** hava kirliliğiyle ilişkilendirir; bu ölümlerin yaklaşık **%90'ı** kalp hastalığı, inme, diyabet, akciğer kanseri ve kronik obstrüktif akciğer hastalığı gibi bulaşıcı olmayan hastalıklardır. Maruziyet tarafındaki tablo aynı yönü gösterir: IQAir'in 2024 Dünya Hava Kalitesi Raporu[2], verisi değerlendirilen **138 ülke ve bölgenin yalnızca 7'sinin** Dünya Sağlık Örgütü'nün **5 µg/m³**'lük yıllık PM2.5 kılavuz değerini tutturduğunu, **126'sının (%91,3)** ise bu değeri aştığını bildirir; dünyadaki şehirlerin yalnızca **%17'si** kılavuzu sağlamaktadır. Bu tablonun okunmasında bir ayrım baştan kurulmalıdır: Dünya Sağlık Örgütü'nün kılavuz değeri hukuken bağlayıcı değildir, her ülke kendi yasal sınır değerini koyar ve bu sınırlar neredeyse her yerde kılavuzun belirgin üzerindedir. Kılavuz değer ile yasal sınır değer aynı şey değildir ve bu ayrım, bu serinin baştan sona koruyacağı ilk ayrımdır.

Yeşil Ajanda olarak bu teknik seride hava kirliliğini bir çevre mühendisliği dersi titizliğiyle, kaynak ekseninde ele alıyoruz. **Altı bölümlük** serinin haritası şöyle: bu ilk bölüm temelleri kuruyor, ikinci bölüm hava kalitesi yönetimi ile emisyon envanterini, üçüncü ve dördüncü bölümler sanayi kaynaklarını (önce yanma ve partikül kontrolü, sonra gaz kirleticiler ve uyum), beşinci bölüm ısınma kaynaklarını, altıncı bölüm hareketli kaynakları işliyor. Kavramsal bir giriş arayan okur için sitedeki hava kirliliğinin temel kavramları[3] yazısı hâlâ doğru başlangıç noktasıdır; bu seri oradan devralıp denklemlere, tasarım parametrelerine ve çözümlü hesaplara geçiyor. Aynı derinlik vaadini daha önce Atıksu Arıtımının Esasları serisinde[4] de kurmuştuk.

Bu bölümde sırasıyla şunları bulacaksınız:

- ✓ Kirletici sınıfları: partikül madde, kükürt dioksit, azot oksitler, karbon monoksit, uçucu organik bileşikler, ozon, amonyak, ağır metaller ve kalıcı organik kirleticiler
- ✓ Birincil ile ikincil kirletici ayrımı ve atmosfer kimyası: ozon oluşumu, NO_x ile UOB rejimleri, ikincil inorganik aerosol, fotokimyasal sis
- ✓ Dispersiyon ve meteoroloji: kararlılık sınıfları, karışım yüksekliği, sıcaklık inversiyonu, Gauss dağılım denklemi, Briggs duman yükselmesi ve çözümlü bir baca hesabı
- ✓ Sağlık ve ekosistem etkileri: doz-yanıt ilişkisi, eşiksiz etki tartışması, DALY, WHO 2021 kılavuz değerleri, asit çökelmesi ve ötrofikasyon
- ✓ Türkiye çerçevesi ve ulusal envanterde kaynak paylarının manşeti

1. Kaynak: stateofglobalair.org
2. Kaynak: iqair.com
3. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/hava-kirliligi-nedir-nedenleri-etkileri-ve-onlemler
4. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/atiksu-aritimi-esaslari-temeller-ve-fiziksel-aritma

Hava kalitesi standartlarının tam tablosu, hava kalitesi indeksi hesabı, izleme ağının teknik anlatımı, emisyon envanteri yöntemi ve Türkiye'nin tam kaynak haritası **serinin ikinci bölümünde** ele alınacak. Bu iki bölüm birlikte serinin ortak sözlüğünü kurar; üçüncü bölümden itibaren her bölüm bu sözlüğe geri referans verir.

1.1 Hava Kirleticileri Nelerdir ve Nasıl Sınıflandırılır?

Hava kirletici, atmosferde doğal fon düzeyinin üzerinde bulunduğunda insan sağlığına, canlı yaşamına, ekosistemlere ya da maddi varlıklara zarar veren her maddedir. Hava kirliliği bu yüzden tek bir madde değil, bir maddeler kümesidir ve bu kümenin altında son derece farklı fiziksel ve kimyasal türler bulunur ve bu türleri üç eksende sınıflandırmak, serinin geri kalanının çatısını kurar.

Birinci eksen, faz: kirletici ya bir **partikül** (katı ya da sıvı asılı tanecik) ya da bir **gazdır**. Bu ayrım teknik değil, tamamen pratiktir: partikülü tutmak ile gazı tutmak bambaşka ekipman gerektirir. Serinin üçüncü bölümü partikül kontrolüne, dördüncü bölümü gaz kirletici kontrolüne ayrılmıştır.

İkinci eksen, köken: kirletici ya kaynaktan doğrudan salınır (**birincil kirletici**) ya da atmosferde kimyasal dönüşümle oluşur (**ikincil kirletici**). Bu ayrım bir sonraki ana bölümün tamamının konusudur ve politika açısından belirleyicidir.

Üçüncü eksen, düzenleme: kirleticinin ölçülen ve yasal olarak sınırlanan bir eşiği var mıdır, yoksa yalnızca izlenmesi mi önerilir. Dünya Sağlık Örgütü'nün 2021 tarihli Küresel Hava Kalitesi Kılavuzu[5] altı kirletici için nicel kılavuz değer belirler (PM2.5, PM10, O_3, NO_2, SO_2, CO); ultra ince partikül, siyah karbon ve kum ile toz fırtınaları için ise sayısal eşik yerine **iyi uygulama beyanı** yayımlar.

Baştan kapatılması gereken bir karışıklık var: hava kirleticisi ile sera gazı aynı şey değildir. Karbondioksit ve metan iklim sistemini ısıtır ama solunan havada doğrudan bir sağlık eşiğiyle sınırlanmaz; buna karşılık siyah karbon ve ozon gibi bazı türler her iki listede birden yer alır. Sera gazı emisyonlarının[6] envanteri, hesaplaması ve raporlaması ayrı bir disiplindir ve bu serinin kapsamı dışındadır; buradaki her sayı hava kalitesi kirleticilerine aittir.

Partikül Madde: PM10, PM2.5 ve Ultra İnce Partiküller (UFP)

Partikül madde, havada asılı duran katı ve sıvı taneciklerin toplamıdır ve hava kirliliğinin sağlık yükü tablosunda tek başına en ağır kalemdir. Buradaki en yaygın yanlış, PM10'un "10 mikrondan küçük partikül" diye tanımlanmasıdır. Doğru tanım ölçümsel

5. Kaynak: who.int
6. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/sera-gazi-emisyonlari-nedir-nedenleri-etkileri-azaltimi

ve hukukidir: 2008/50/EC sayılı AB Hava Kalitesi Direktifi'nin[7] 2(18) ve 2(19) maddelerine göre **PM10**, referans yöntemde (EN 12341) tanımlanan boyut seçici bir girişten geçen partikül maddedir ve bu giriş **10 µm aerodinamik çapta %50 verimle** kesme yapar. **PM2.5** aynı mantıkla **2,5 µm aerodinamik çapta %50 verimle** kesen girişten geçen fraksiyondur. Yani 10 µm'lik taneciklerin yarısı geçer, yarısı tutulur: kesme keskin bir duvar değil, S biçimli bir eğridir. Güncel referans yöntem **EN 12341:2023**'tür ve her iki fraksiyonu tek standartta toplar.

Tanımın merkezindeki **aerodinamik çap**, bir partikülle aynı yerçekimi çökelme hızına sahip, yoğunluğu **1 g/cm³** olan küresel bir partikülün çapıdır. Gerçek geometrik çaptan farklıdır: yoğun ya da düzensiz şekilli bir tanecik, geometrik çapından büyük ya da küçük bir aerodinamik çap gösterebilir. Hava kirliliği ölçümünün ve sağlık değerlendirmesinin bu büyüklüğü seçmesinin nedeni basittir: hem solunum sistemindeki çökelmeyi hem örnekleyicideki davranışı belirleyen şey budur. Partikül boyut dağılımının log-normal yapısı, kütlece medyan çap ve fraksiyonel verim eğrisi bu serinin **üçüncü bölümünde**, toplama ekipmanlarının tasarımıyla birlikte ele alınacak; burada tanım düzeyinde kalıyoruz.

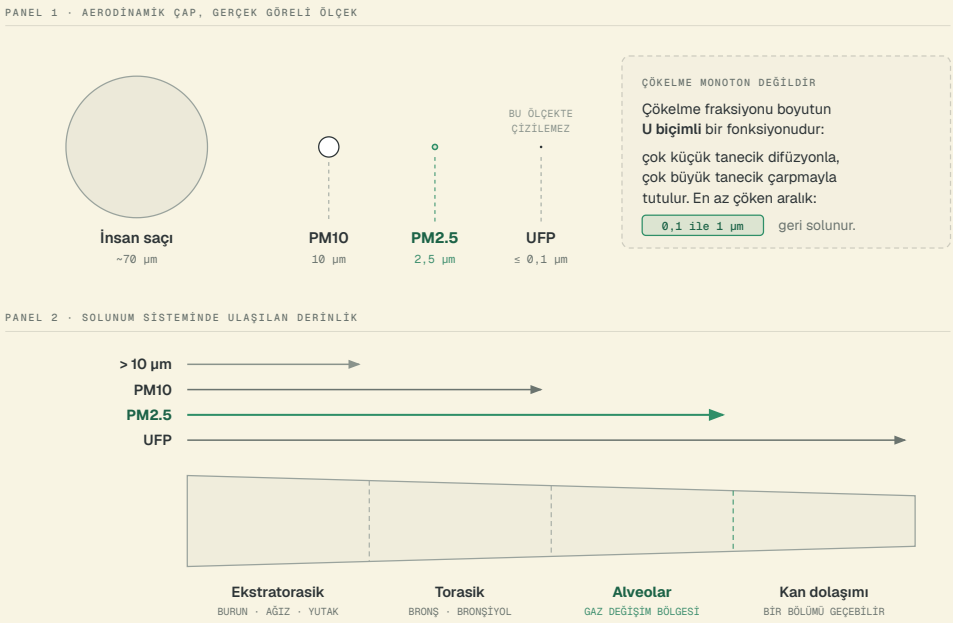
Boyut, partikülün solunum sisteminde nereye kadar ilerleyeceğini belirler. **10 µm'nin üzerindeki** tanecikler büyük ölçüde burun, ağız ve yutakta tutulur, akciğere ulaşmaz. **PM10 (torasik fraksiyon)** gırtlağı geçip bronş ve bronşiyollere ulaşır. **PM2.5 (alveolar fraksiyon)** gaz değişiminin yapıldığı en derin bölgeye, alveollere iner. **Ultra ince partiküller (UFP, PM0.1, 0,1 µm ve altı)** alveol bölgesinde çöker ve bir bölümü kan dolaşımına geçebilir; bu boyutta baskın çökelme mekanizması artık yerçekimi ya da çarpma değil, **difüzyondur** ve difüzyonun baskın hâle geldiği eşik yaklaşık **150 ile 300 nm** altındadır.

7. Kaynak: eur-lex.europa.eu

ŞEKİL 1.1

Partikül Boyutu ve Solunum Sisteminde Çökme

Aerodinamik çap, partikülün solunum sisteminde nereye kadar ilerleyeceğini belirler. Daireler birbirine göre gerçek ölçektedir.



PM10 ve PM2.5, referans yöntemde (EN 12341:2023) sırasıyla 10 µm ve 2,5 µm aerodinamik çapta %50 verimle kesen girişlerden geçen fraksiyonlardır; kesme keskin bir duvar değil, S biçimli bir eğridir. Ultra ince partikülde baskın çökelme mekanizması difüzyondur ve difüzyon yaklaşık 150 ile 300 nm altında baskın hâle gelir. İnsan saçı ölçeği: US EPA. Çökelme bölgeleri: ICRP Publication 66 solunum yolu çökelme modeli.

Burada çok tekrarlanan bir cümleyi düzeltmek gerekir: “partikül ne kadar küçükse o kadar tehlikelidir” ifadesi eksik bir doğrudur, çünkü çökelme mekanizması monoton değildir. Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu’nun solunum yolu çökelme modeli (ICRP Publication 66) ve bu modelin uygulamalı değerlendirmeleri, çökelme fraksiyonunun boyutun **U biçimli** bir fonksiyonu olduğunu gösterir: hem çok küçük (difüzyonla) hem çok büyük (çarpma ve çökelmeyle) tanecikler yüksek oranda tutulurken, **0,1 ile 1 µm arasındaki** partiküller en düşük çökelme olasılığına sahiptir ve büyük ölçüde geri solunur. İlginç biçimde bu aralık, birazdan göreceğimiz gibi görüş mesafesini en çok bozan aralıktır: en az çöken partikül, en çok ışık saçan partiküldür.

Ultra ince partikülün ayrı ölçülmesinin nedeni de fiziktir. UFP, kütlece neredeyse hiçbir şey tutmaz, PM2.5 kütlesinin ihmal edilebilir bir kesridir; buna karşılık **sayıca baskındır**. Kütle tabanlı bir eşik UFP’yi göremez. Bu yüzden WHO 2021 kılavuzu ultra ince partikül için nicel bir değer belirlemek yerine bir iyi uygulama beyanı yayımlamış

ve UFP'nin **partikül sayı derişimi (PNC)** olarak, **alt sınırı 10 nm ve altında olan, üst sınırı kısıtlanmayan** bir boyut aralığı için ölçülmesini istemiştir. Aynı statüdeki diğer iki konu **siyah karbon ile elementel karbon** ve **kum ile toz fırtınalarıdır**; siyah karbon için beyan, sistematik ölçüm yapılmasını, emisyon envanteri ile kaynak ayrıştırma üretilmesini ve uygun olduğunda ortam derişimleri için standart geliştirilmesini önerir. Bu, kütle derişiminin ($\mu g/m^3$) tek başına yeterli olmadığının ilk resmî kabulüdür.

Hava kirliliği kanıt tabanında partikül maddenin statüsü nettir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı'nın (IARC) Çalışma Grubu **8-15 Ekim 2013**'te Lyon'da toplanmış ve Monograf Cilt 109[8] ile hem **dış ortam hava kirliliğini** hem de **dış ortam havasındaki partikül maddeyi** ayrı ayrı **Grup 1, yani insan için kanserojen** olarak sınıflandırmıştır. Dayanak, akciğer kanseri için insanlarda yeterli kanıt, deney hayvanlarında yeterli kanıt ve mekanistik çalışmaların güçlü desteğidir; idrar kesesi kanseri için pozitif ilişki kaydı düşülmüştür.

Ölçek tarafında ne bekleneceğine gelince: Avrupa Çevre Ajansı ve Eionet ağının 2023 yılı hava kalitesi durum raporuna[9] göre Avrupa büyükşehirlerinin yıllık PM10 ortalamaları geniş bir bantta dağılır ve tekil istasyon uç değerleri **267 µg/m³**'e kadar çıkar. PM2.5 tarafında Avrupa Şehir Hava Kalitesi Görüntüleyicisi'nin 2022-2023 ortalamasında en temiz şehirler **5 µg/m³'ün altında** (İsveç'te Uppsala ve Umeå), en kirli şehir **26,5 µg/m³** (Hırvatistan'da Slavonski Brod) ölçülmüştür. Türkiye tarafında 2022 verisiyle üç büyükşehrin yıllık PM10 ortalaması **İstanbul 38,41 µg/m³**, **Ankara 39,25 µg/m³** ve **İzmir 45,18 µg/m³**'tür; ülkenin en yüksek ölçümleri ise **Hakkâri 110,71 µg/m³** ve **Iğdır 109,76 µg/m³** ile doğuda yoğunlaşır.

Kükürt Dioksit (SO_2) ve Azot Oksitler (NO_x: NO ve NO_2)

Hava kirliliğinin en eski tanınan üyesi olan **kükürt dioksit**, yakıtın içindeki kükürdün yanma sırasında oksitlenmesiyle oluşan, keskin kokulu, renksiz bir gazdır. Kaynağı bu yüzden doğrudan yakıt kalitesine bağlıdır: kükürt içeriği yüksek kömür ve ağır fuel-oil yakan tesisler baskın kaynaktır, doğalgaz yakan bir tesis pratikte SO_2 üretmez. Atmosferdeki kaderi iki yolla belirlenir: gaz faz oksidasyonuyla ömrü **yaklaşık 6 gün**, kuru çökelmeyle **yaklaşık 1 gündür**. Altı günlük bir ömür, SO_2'yi yerel bir sorun olmaktan çıkarıp bölgesel ve sınırötesi bir sorun hâline getirir; asit çökelmesi meselesinin coğrafi ölçeği buradan gelir.

Sağlık tarafında WHO 2021 kılavuzu SO_2 için **24 saatlik 40 µg/m³** kılavuz değerini önerir. Avrupa'da bu eşik büyük ölçüde sağlanır: Eionet'in derlemesine göre 2022-2023 döneminde istasyonların yalnız **%4 ile %6'sı** WHO günlük kılavuz değerini aşmıştır. Türkiye'de tablo farklıdır ve ulusal limiti aşan istasyonlarda yıllık ortalama

8. Kaynak: ncbi.nlm.nih.gov
9. Kaynak: eionet.europa.eu

58,20 µg/m³'e kadar çıkabilmektedir (Kahramanmaraş-Dulkadiroğlu, 2022, Kara Rapor 2024 derlemesi). Hava kirliliği envanteri tarafında ise ölçek büyüktür: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın CLRTAP kapsamında sunduğu ulusal envanter raporuna (IIR 2024)[10] göre Türkiye 2022'de atmosfere **2.738,20 kiloton SO_2** salmıştır ve bunun **%69,71'i** tek bir kategoriden, kamu elektrik ve ısı üretiminden gelmektedir.

Azot oksitler, NO (azot monoksit) ile NO_2'nin (azot dioksit) toplamını ifade eder ve seride **NO_x** olarak yazılır. Kükürtten farklı olarak NO_x'in kaynağı yakıtın bileşimi değil, yanmanın kendisidir: yüksek sıcaklıkta havanın azotu ile oksijeni birleşir. Yanma kaynaklarından çıkan NO_x'in büyük bölümü NO'dur; mühendislik pratiğinde tipik olarak hacimce **%90 ile %95** aralığında NO, **%5 ile %10** aralığında NO_2 kabul edilir. Bu aralık ders kitaplarında yerleşik bir kabuldür (Cooper ve Alley, 4. baskı; de Nevers, 3. baskı) ancak tek bir birincil ölçüm kaynağında doğrulanamamıştır, bu yüzden "tipik olarak" kaydıyla verilmelidir. Salındıktan sonra NO, ozon ve peroksi radikalleriyle hızla NO_2'ye döner: kentsel havada gündüz NO_2'nin fotoliz nedeniyle ömrü **yaklaşık 200 saniyedir**, kirli hava kütlelerinde toplam NO_x ömrü **2 ile 8 saat**, temiz kırsal havada **yaklaşık bir gündür**.

İki gösterim kuralı baştan sabitlenmelidir. Birincisi, baca gazı NO_x değerleri **NO_2 eşdeğeri** olarak, yani NO kütlesi 46 g/mol molekül ağırlığıyla ifade edilerek verilir; bu dönüşüm ve referans oksijen düzeltmesi serinin **üçüncü bölümünde** tek kez türetilecektir. İkincisi, ortam havası değerleri her zaman µg/m³ ve ortalama süresiyle birlikte yazılır.

NO_2'nin kılavuz değeri 2021'de sert biçimde indirildi: yıllık değer **40 µg/m³'ten 10 µg/m³'e**, yani **%75** düşürüldü ve ilk kez bir **24 saatlik 25 µg/m³** değeri tanımlandı. Sonuç, Avrupa'da bile çarpıcıdır: Eionet'in 2023 değerlendirmesine göre istasyonların **%68'i** WHO yıllık kılavuz değerini aşarken, yalnızca **%1'i** AB'nin 40 µg/m³'lük yasal sınır değerini aşmıştır ve sınır değeri aşan istasyonların neredeyse tamamı trafiğe yakın kentsel ya da banliyö istasyonlarıdır. Türkiye'de 2022 verisiyle kirlilik düzeyi en yüksek 10 NO_2 istasyonu **68,6 ile 107,6 µg/m³** bandındadır ve **158 istasyonun 140'ı** WHO kılavuz değerini aşmaktadır. Ulusal ölçekte NO_x emisyonu 2022'de **986,91 kiloton**, baskın kaynağı yine termik santrallerdir (**%37,36**), ikinci kaynak ağır ticari araçlardır.

10. Kaynak: webdosya.csb.gov.tr

UZMAN NOTU

NO_2, Türkiye'de hava kalitesi indeksini **en sık belirleyen kirleticidir**, ancak izleme altyapısı bu ağırlığı taşıyacak durumda değildir: Temiz Hava Hakkı Platformu'nun 2024 verisine dayanan derlemesine göre NO_2, istasyonların **%84'ünde (319 istasyon)** ölçülmekte, ama yalnızca **150'sinde (%47)** değerlendirmeye yetecek veri elde edilebilmektedir. Ölçülen kirletici ile değerlendirilebilen kirletici arasındaki bu fark, serinin ikinci bölümünün ana konularından biridir.

Karbon Monoksit (CO) ve Uçucu Organik Bileşikler (UOB)

Hava kirliliğinin yanma verimine en duyarlı göstergesi olan **karbon monoksit**, karbon içeren yakıtların **eksik yanmasının** ürünüdür: yeterli oksijen bulunmadığında karbon, karbondioksite kadar oksitlenemez ve CO olarak kalır. Bu yüzden CO derişimi, bir yanma sisteminin verimsizliğinin doğrudan göstergesidir ve kontrolü çoğunlukla ayrı bir ekipman değil, yanmanın düzeltilmesi anlamına gelir. Renksiz ve kokusuzdur, atmosferdeki ömrü **yaklaşık bir aydır** ve bu ömür onu yarıküresel ölçekte dağılan bir tür yapar.

WHO 2021 kılavuzu CO için ilk kez **24 saatlik 4 mg/m³** değerini tanımlamıştır. Daha kısa süreli değerler 2021'de yeniden değerlendirilmemiş ama geçerliliğini korumuştur: **8 saatlik 10 mg/m³**, **1 saatlik 35 mg/m³** ve **15 dakikalık 100 mg/m³**. Birimin mg/m^3 olduğuna dikkat edilmelidir, yani CO diğer gaz kirleticilerden **bin kat daha yüksek** bir derişim ölçeğinde raporlanır. Avrupa'da tablo rahattır: Eionet'in 2022 yılı durum raporuna[11] göre istasyonların **%97'si** alt değerlendirme eşiği olan 5 mg/m^3'ün altındadır ve WHO günlük kılavuz değerini aşan tek istasyon 2022'de Türkiye'de bulunmuştur. Ulusal envanterde ise CO toplamı 2022'de **1.618,07 kiloton** ve baskın kaynağı **evsel ısınmadır (%44,31)**, yani CO Türkiye'de bir sanayi göstergesinden çok bir ısınma göstergesidir.

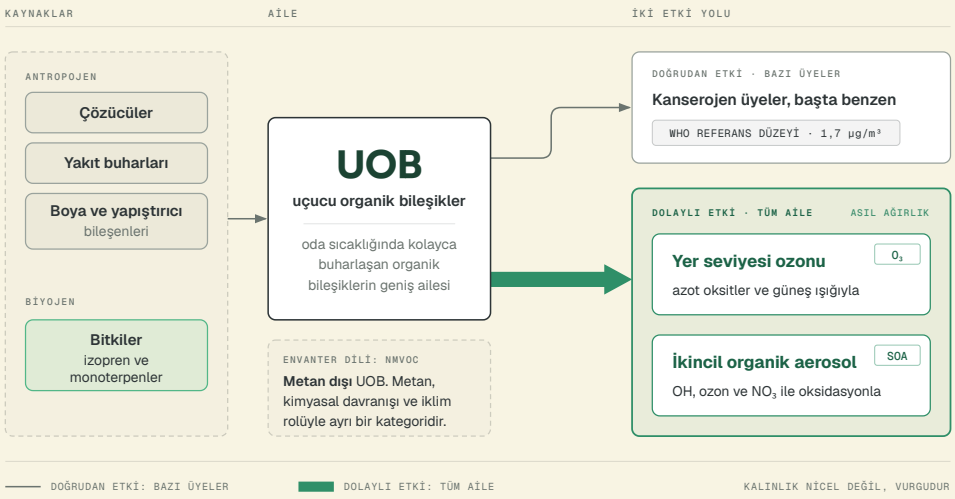
Uçucu organik bileşikler (UOB, İngilizcesi VOC), oda sıcaklığında kolayca buharlaşan organik bileşiklerin geniş ailesidir: çözücüler, yakıt buharları, boya ve yapıştırıcı bileşenleri, bitkilerin saldığı izopren ve monoterpenler. Envanter ve mevzuat dilinde çoğunlukla **metan dışı uçucu organik bileşikler (NMVOC)** ayrımı kullanılır, çünkü metan kimyasal davranışı ve iklim rolüyle ayrı bir kategori oluşturur. UOB'nin hava kalitesi açısından iki ayrı önemi vardır: bazı üyeleri (başta **benzen**) doğrudan kanserojendir, tamamı ise yer seviyesi ozonunun ve ikincil organik aerosolün öncüsüdür. Yani UOB, çoğu zaman solunduğu için değil, atmosferde neye dönüştüğü için önemlidir.

11. Kaynak: eionet.europa.eu

ŞEKİL 1.2

Uçucu Organik Bileşikler: Asıl Etki Dönüşümde

UOB çoğu zaman solunduğu için değil, atmosferde neye dönüştüğü için önemlidir. Bazı üyeleri doğrudan kanserojendir; tamamı yer seviyesi ozonunun ve ikincil organik aerosolün öncüsüdür.



Kavramsal şemadır, ölçekli değildir: yolların kalınlığı nicel bir pay değil, metindeki vurguyu gösterir. Benzen referans düzeyi WHO'nundur ve Avrupa Çevre Ajansı ile Eionet'in 2022 hava kalitesi durum raporunda (ETC-HE Rapor 2024/3) aktarıldığı biçimiyle verilmiştir. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2024-3-status-report-of-air-quality-in-europe-for-year-2022-using-validated-data

Benzen tarafında Avrupa'da tablo iyidir: 2022'de istasyonların **%96'sı** 2 µg/m³'ün altındadır ve hiçbir istasyon 5 µg/m³'lük AB limitini aşmamıştır; WHO'nun referans düzeyi **1,7 µg/m³**'tür. Türkiye'nin NMVOC emisyonu 2022'de **1.143,01 kiloton** ve baskın kaynağı beklenenden farklıdır: ulusal envanterin kendi ifadesiyle NMVOC'nin **%36,7'si tarım sektörlerinden** gelir, tek başına en büyük kategori ise tarımsal topraklar ve otlatılan hayvan gübresidir (**%20,72**). Çözücü ve ürün kullanımı ile gıda sanayii bunu izler. UOB'nin baca tarafındaki ölçümü karbon eşdeğeri üzerinden yapılır ve kontrol teknolojileri (adsorpsiyon, termal ve katalitik oksidasyon, biyofiltrasyon) serinin **dördüncü bölümünün** konusudur.

Yer Seviyesi Ozonu (O_3) ve Amonyak (NH_3)

Yer seviyesi ozonu, hava kirliliği listesinin tek tam ikincil üyesidir: hiçbir baca ozon salmaz. Troposferdeki tek kimyasal üretim yolu, NO_2'nin güneş ışığıyla parçalanıp açığa çıkardığı oksijen atomunun moleküler oksijenle birleşmesidir. Mekanizması bir sonraki ana bölümün konusudur; burada önemli olan iki şeydir. Birincisi, ozon bir arka plan kirleticisi hâline gelmiştir: sanayi öncesi troposferik ozon arka planı

yaklaşık 10 ppb iken bugün **30 ile 40 ppb** düzeyindedir, izole kırsal alanlarda tipik değerler **40 ile 80 µg/m³** bandındadır. İkincisi, ozon kentte değil, kentin **rüzgâr altında** zirve yapar.

Bu ikinci nokta sayılarla çarpıcıdır. Eionet'in 2023 değerlendirmesinde raporlanan **472 kırsal ve arka plan istasyonunun yalnızca 6'sı** WHO'nun 8 saatlik 100 µg/m³ kılavuz değerinin altında kalmıştır; benzer biçimde **451 kırsal istasyonun yalnızca 2'si** zirve sezon kılavuz değerinin (60 µg/m³) altındadır. Kentsel istasyonlarda ise tablo daha iyidir, çünkü kent merkezindeki yoğun NO, ozonu aktif olarak tüketir. Aynı raporda istasyonların **%17'si** 120 µg/m³'lük hedef değeri aşmış, kutu grafiğin uç değeri **213 µg/m³** olmuştur (Bosna-Hersek). WHO 2021 kılavuzu ozon için 8 saatlik 100 µg/m³ değerini korumuş ve ilk kez bir **zirve sezon** göstergesi tanımlamıştır: günlük maksimum 8 saatlik ortalamaların, en yüksek ardışık **altı aylık** dönemdeki ortalaması, kılavuz değeri **60 µg/m³**.

Amonyak (NH_3), bu listedeki en az tanınan ama envanterde en büyük paya sahip kirleticilerden biridir. Hayvancılıkta gübre yönetiminden ve azotlu gübre uygulamasından salınır. Doğrudan solunan bir kirletici olarak etkisi sınırlıdır; asıl önemi, atmosferde sülfürik ve nitrik asidi nötralize ederek **amonyum sülfat ve amonyum nitrat** üretmesi, yani **ikincil PM2.5'in** yapı taşlarından biri olmasıdır. Kısacası tarım, bir amonyak meselesi olduğu kadar bir ince partikül meselesidir; mekanizma bir sonraki bölümde kurulacak, ulusal kaynak payı ise ikinci bölümde verilecektir.

Amonyağın ölçüm tarafında bir boşluk vardır: AB Hava Kalitesi Direktifi'nin izleme ağı NH_3 ölçmez, veriler ayrı bilimsel ağlardan gelir. Avrupa'nın beş ülkesinde (Finlandiya, Fransa, İtalya, İspanya, İngiltere) yürütülen bir ölçüm çalışmasına göre kentsel ortalama **3,3 ± 1,5 µg/m³**, banliyö **2,7 ± 1,3 µg/m³**, bölgesel arka plan **1,0 ± 0,3 µg/m³** düzeyindedir; hayvancılığın yoğun olduğu noktalarda ise **30,1 µg/m³**'e kadar çıkan değerler ölçülmüştür. Türkiye'nin ulusal NH_3 emisyonu 2022'de **898,88 kiloton** ve bunun **%89,69'u** tarımdandır.

Ağır Metaller (Pb, Hg, Cd, As)

Ağır metaller, hava kirliliği ölçümünde bir büyüklük mertebesi farkıyla ayrılır: partikül madde µg/m³ ile ölçülürken ağır metaller **ng/m³**, yani **mikrogramın binde biri** ölçeğinde raporlanır. Ölçüm pratiğinde PM10 fraksiyonu içinde toplanır ve filtre analiziyle belirlenir. Eser derişimde bulunmaları, sağlık etkilerinin küçük olduğu anlamına gelmez: etki mekanizması çoğunlukla birikimlidir (biyobirikim) ya da genotoksiktir, yani düşük derişimde uzun süre maruz kalmak belirleyicidir.

Kurşun (Pb), hava kalitesi tarihinin en başarılı müdahalesinin konusudur. Benzine katılan kurşunlu katkı maddelerinin aşamalı olarak yasaklanması, kentsel kurşun derişimlerini büyüklük mertebesi düzeyinde düşürdü. Bugün Avrupa'da 2022

verisiyle istasyonların **%100'ü** alt değerlendirme eşiği olan 0,25 µg/m³'ün altındadır ve **hiçbir istasyon** 0,5 µg/m³'lük AB limitini aşmamıştır. Türkiye'nin ulusal envanterinde ise kurşunun baskın kaynağı sezgiye aykırıdır: **%47,20 ile karayolu taşımacılığının egzoz dışı emisyonları**, yani lastik ve fren aşınmasıdır. Bu, yakıttan gelen kurşunun tarihe karıştığının ama kurşunun trafikten tümüyle çıkmadığının kaydıdır; egzoz dışı partikül serinin **altıncı bölümünde** ayrı bir başlık olarak ele alınacaktır.

Cıva (Hg), atmosferde elementel buhar hâlinde aylarca hatta bir yıla yakın kalabildiği için küresel dolaşıma giren tek ağır metaldir; bu yüzden yerel bir ölçüm, yerel bir kaynağı işaret etmeyebilir. Türkiye'nin envanterinde cıvanın baskın kaynağı **%92,59 ile atığın açıkta yakılmasıdır**, yani düzenlenmiş bir baca değil, kayıt dışı bir yakma pratiğidir. **Kadmiyum (Cd)** için de tablo benzerdir: iki atık yakma kategorisi toplamın neredeyse tamamını (**%49,24 artı %49,24**) oluşturur. **Arsenik (As)** ise kömür yakma ve metalurjik proseslerle ilişkilidir.

Cıva ve dioksin kontrolünde kullanılan aktif karbon enjeksiyonu ile sıcaklık penceresi yönetimi serinin **dördüncü bölümünün** konusudur; arsenik, kadmiyum ve nikel için hedef değerler ise **ikinci bölümde**, mevzuat tablosuyla birlikte verilecektir.

Kalıcı Organik Kirleticiler: Dioksin, Furan ve PAH

Kalıcı organik kirleticiler (KOK), çevrede ayrışmaya direnen, besin zincirinde birikiyen ve uzun mesafelere taşınan organik bileşiklerdir. Hava kalitesi bağlamında iki grup öne çıkar.

Dioksin ve furanlar, klor içeren malzemelerin uygun olmayan koşullarda yanmasıyla istem dışı oluşan bir bileşik ailesidir. Ölçüm ölçeği bu serinin en küçük birimidir: **pg I-TEQ/Nm³**, yani normal metreküp başına pikogram uluslararası toksik eşdeğer. **I-TEQ**, 17 toksik dioksin ve furan konjenerinin toksisitelerinin, en toksik üye olan 2,3,7,8-TCDD eşdeğerine çevrilerek toplanmasıyla bulunur; bu çeviri katsayıları NATO/CCMS'nin 1988 tarihli uluslararası toksik eşdeğerlik faktörü şemasından gelir ve AB tarafında atık yakma mevzuatının eklerinde kullanılır. Dioksin ve furanın oluşumu ile kontrolü, atık yakma ve metalurjik prosesler bağlamında serinin **dördüncü bölümünde** ele alınacaktır.

Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), eksik yanmanın ürünüdür ve ısınmanın, özellikle katı yakıt yakmanın imzasıdır. Ortam havasında **ng/m³** ölçeğinde ölçülür ve grubun tamamı için vekil gösterge olarak **benzo(a)piren (BaP)** kullanılır. Avrupa'da 2022 verisiyle istasyonların **%79'u** 0,12 ng/m³'lük referans düzeyinin altındayken, **%25'i** 1 ng/m³'lük hedef değerin üstündedir ve bu istasyonlar çoğunlukla kentsel ve banliyö istasyonlarıdır; kutu grafiğin uç değeri **9 ng/m³** ile Polonya'dadır. Bu dağılım tek başına bir şey söyler: benzo(a)piren, Avrupa'da hâlâ katı yakıtla ısınan bölgelerin göstergesidir. Isınma kaynaklı PAH profili serinin **beşinci bölümünde** işlenecektir.

Bu iki grup, “sınır değerin altındayız” savunmasının neden yetersiz olduğunu gösteren en açık örneklerdir: genotoksik ve birikimli etki mekanizmalarında güvenli kabul edilebilecek bir eşik tanımlamak, mevcut bilimsel kanıtla mümkün değildir.

Derişim Nasıl Yazılır? µg/m³, Ortalama Süresi ve Sık Yapılan Hata

Bu alt başlık bir ayrıntı gibi görünür ama hava kirliliği verilerinin en sık karıştırılan noktasını baştan kapatır. Ortam havası derişiminin kanonik birimi **µg/m³**‘tür ve bu sayı, **ortalama süresi yazılmadan anlamsızdır**. “İstanbul’da PM10 45 µg/m³” cümlesi eksiktir: yıllık ortalama mı, 24 saatlik ortalama mı, saatlik değer mi olduğu söylenmedikçe ne bir kılavuz değerle ne bir başka şehirle kıyaslanabilir. Bu seride her ortam havası değeri **derişim artı ortalama süresi** çiftiyle yazılır.

İkinci kural, kılavuz değerin nasıl okunacağıyla ilgilidir. WHO 2021’in 24 saatlik ve 8 saatlik kılavuz değerleri **99. persentil** olarak tanımlıdır, yani yılda **3 ile 4 gün** aşılmasına izin verir. “24 saatlik kılavuz değer” hiçbir gün aşılmayacak bir tavan değildir; bu dipnot atlandığında tablo yanlış okunur.

Üçüncü ve en kritik kural, iki farklı dünyanın birbirine karıştırılmamasıdır. **Ortam havası** derişimi µg/m³ ile, **baca gazı** derişimi ise **mg/Nm³** ile ölçülür ve baca değeri her zaman **referans oksijen yüzdesi** ile **kuru ya da ıslak baz** bilgisiyle birlikte yazılır (örnek gösterim: 50 mg/Nm³, kuru baz, %6 O_2). Buradaki Nm³, **normal metreküp**, yani 0 °C ve 101,3 kPa koşullarındaki hacimdir. İki değer aynı cümlede kıyaslanmaz: ölçekleri bin kat, tanımları tamamen farklıdır. Bir bacadan çıkan 50 mg/Nm³’lük toz derişimi ile bir istasyonda ölçülen 50 µg/m³’lük PM10 ortalaması arasında kurulacak her doğrudan karşılaştırma hatalıdır. Baca gazı tarafının tanımları, ppm ile mg/Nm³ arasındaki dönüşüm ve referans oksijen düzeltmesi serinin **üçüncü bölümünde** tek kez ve tam olarak verilecek, diğer bölümler oraya bağlanacaktır.

Son olarak ölçek farklarını tek yerde toplamak gerekir: partikül madde ve klasik gaz kirleticiler **µg/m³**, karbon monoksit **mg/m³**, ağır metaller **ng/m³**, dioksin ve furanlar **pg I-TEQ/Nm³**, ultra ince partiküller ise kütle değil **sayı/cm³** ile raporlanır. Aralarındaki fark üç ile altı büyüklük mertebesine ulaşır ve bu fark, tehlikelilik sırası değil, ölçüm ölçeğidir.

TABLO 1.1

Kirletici	Köken	Baskın kaynak · Türkiye 2022	Birim	Başlıca etki
PM10 ve PM2.5	Birincil ve ikincil	Evsel ısınma PM2.5 %54,03 · PM10 %42,70	µg/m³	Solunum ve kalp damar hastalıkları, erken ölüm
Ultra ince partikül (UFP)	Birincil ve ikincil	Yanma kaynaklı envanterde ayrı satır yok	sayı/cm³	Alveolde çökme, bir bölümü kan dolaşımına geçebilir
Kükürt dioksit (SO_2)	Birincil	Termik santraller %69,71	µg/m³	Solunum yolu tahrişi; sülfata oksitlenip ikincil PM2.5 üretir
Azot oksitler (NO_x)	NO birincil, NO_2 büyük ölçüde ikincil	Elektrik üretimi %37,36	µg/m³ NO_2 eşdeğeri	Solunum etkisi; ozonun ve nitrat aerosolünün öncülü
Karbon monoksit (CO)	Birincil	Evsel ısınma %44,31	mg/m³	Hemoglobine bağlanır; eksik yanmanın doğrudan göstergesi
Uçucu organik bileşikler (NMVOC)	Birincil	Tarım sektörleri %36,7	µg/m³	Ozon öncülü; benzen ayrıca kanserojen
Yer seviyesi ozonu (O_3)	Tam ikincil	Hiçbir baca ozon salmaz NO_x ve UOB'den pişirilir	µg/m³	Solunum etkisi; bitkide verim kaybı
Amonyak (NH_3)	Birincil	Tarım %89,69	µg/m³	Amonyum aerosolüyle ikincil PM2.5; ötrofikasyon
Ağır metaller (Pb, Hg, Cd, As)	Birincil	Pb: karayolu, egzoz dışı aşınma (%47,20) Hg: atığın açıkta yakılması (%92,59)	ng/m³	Biyobirikim ve genotoksisite; eşik düşük olsa da etki birikimli
Dioksin ve furanlar	Birincil, istem dışı	Klorlu malzemenin uygun olmayan koşullarda yanması	pg I-TEQ/Nm³	Kalıcı, biyobirikimli ve toksik; 2,3,7,8-TCDD eşdeğeriyle toplanır
PAH (vekil gösterge BaP)	Birincil	Katı yakıtlı ısınma eksik yanmanın imzası	ng/m³	Kanserojen; kentsel ve banliyö istasyonlarında yoğunlaşır

KİLİT MESAJ

Bir hava kirleticisini tanımak, adını bilmek değil, dört şeyi birlikte bilmektir: hangi süreçten çıktığı, hangi birimle ve hangi ortalama süresiyle ölçüldüğü, atmosferde ne kadar yaşadığı ve hangi mekanizmayla zarar verdiği. Bu dörtlü, serinin geri kalanının ortak sözlüğüdür.

1.2 Birincil ve İkincil Kirletici: Atmosferde Ne Değişir?

Bir önceki bölüm kirleticileri tek tek tanıttı. Şimdi serinin kavramsal kilidine geliyoruz: bu kirleticilerin bir kısmı bacadan çıktığı hâliyle solunur, bir kısmı ise atmosferde **üretilir**. Bu ayrım akademik bir incelik değildir: hava kirliliği politikasının tamamını doğrudan biçimlendirir. Birincil bir kirletici için azaltım aritmetiği basittir: emisyonu yarıya indirirseniz, her şey sabitken derişim de yaklaşık yarıya iner. İkincil bir kirletici için bu cümle kurulmaz; hatta bazı koşullarda tersi olur.

Birincil ile İkincil Ayrımı ve Neden Politika Sonucu Doğurduğu

Birincil kirletici, kaynaktan atmosfere doğrudan salınan kirleticidir: SO_2, NO, karbon monoksit, birincil partikül madde, uçucu organik bileşikler, amonyak ve ağır metaller bu sınıfa girer. **İkincil kirletici**, atmosferde kimyasal dönüşümle oluşan kirleticidir: yer seviyesi ozonu, NO_2'nin büyük bölümü, sülfat, nitrat ve amonyum aerosolleri, ikincil organik aerosol ve peroksiasetil nitrat bu sınıftadır.

Ayrımın önemi, ikincil kirleticinin derişiminin öncülünün emisyonuyla **doğrusal olmamasında** yatar. Üç somut sonucu vardır. Birincisi, bir ikincil kirleticinin "kaynağı" tek bir sektör değildir: ikincil inorganik aerosol, enerji sektörünün SO_2'si, ulaşımın NO_x'i ve tarımın NH_3'ü birlikte pişirilir. İkincisi, ikincil kirletici emisyon envanterlerinde **görünmez**: envanter, bacadan çıkan kütleyi sayar, atmosferde oluşan kütleyi değil. Bu yüzden bir ulusal envanterin "PM2.5" satırı ile bir istasyonda ölçülen PM2.5 kütlesi aynı şeyi ölçmez. Üçüncüsü, ikincil kirleticinin oluşumu meteorolojiye (güneş ışığı, sıcaklık, bağıl nem) bağlıdır, yani emisyon sabit kalsa bile derişim mevsimle ve hava durumuyla değişir.

Bu üçüncü nokta, Türkiye'den somut bir örnekle görünür hâle gelir. Ulusal envanter, PM2.5'in baskın kaynağını **evsel ısınma (%54,03)** olarak verir. Buna karşılık **Mertoglu ve arkadaşlarının** İstanbul'da Beşiktaş trafik istasyonunda dört mevsim boyunca yürüttüğü, temel bileşen analizine dayanan 2022 tarihli kaynak ayrıştırma çalışması[12], ölçülen PM2.5 kütlesinin en büyük bileşenini **ikincil aerosol (%43,9)** olarak bulmuş, evsel ısınmayı ikinci sıraya (%34,6) yerleştirmiştir. İki sonuç birbiriyle çelişmez, farklı

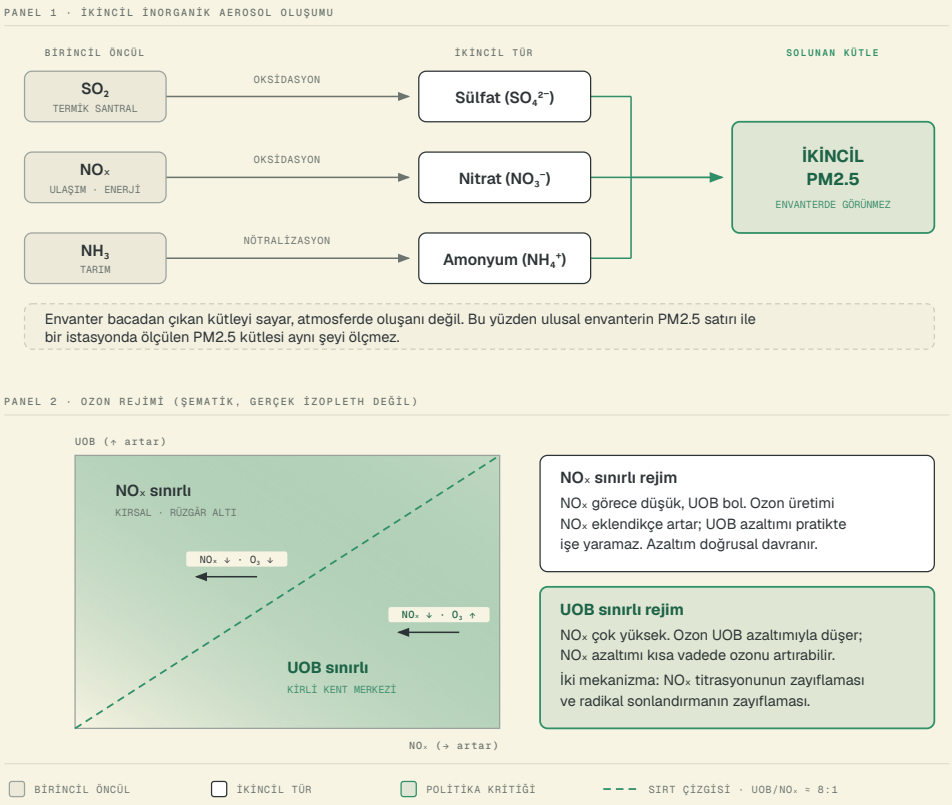
12. Kaynak: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov

şeyleri ölçerler: envanter ülke genelindeki **birincil emisyon üretimini**, reseptör modeli tek bir noktada **solunan havanın bileşimini** anlatır. İkincil aerosol envanterin hiçbir satırında görünmez, çünkü öncülleri NH_3, NO_x ve SO_2 olarak başka satırlardadır. Bu tek istasyon sonucu İstanbul'un tamamını temsil etmez; reseptör modeli sonuçları ölçüm noktasına aittir, şehir ortalaması değildir.

ŞEKİL 1.3

Birincilden İkincile: Atmosferde Ne Değişir?

İkincil kirletici bacadan çıkmaz, atmosferde üretilir. Bu yüzden azaltım aritmetiği doğrusal değildir.



Alt panel şematiktir, ölçekli bir izopleth diyagramı değildir. Sırt oranı (UOB/NO_x ≈ 8:1) Ulusal Araştırma Konseyi'nin 1991 tarihli raporundan bir büyüklük göstergesidir; izopleth biçimi yerel UOB karışımına, sıcaklığa ve radikal kaynaklarına duyarlıdır ve oran kayar. Türkiye kentleri için doğrulanmış bir sırt oranı bulunmamaktadır.

Troposferik Ozon Oluşumu: NO_2 Fotolizi ve Fotostasyoner Denge

Yer seviyesi ozonu, kimyasının en iyi bilinen ikincil kirleticisidir. Temel çevrim üç tepkimeden oluşur ve troposferde **ozonun bilinen tek kimyasal üretim yolu** ikinci tepkimedir:

(R1) $NO_2 + h\nu\ (\lambda < 420\ nm) \rightarrow NO + O(^3P)$

(R2) $O(^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$

(R3) $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$

Bu üçlü, kendi başına **kapalı bir çevrimdir** ve net ozon üretmez: yalnızca azotu NO ile NO_2 arasında, oksijeni O_2 ile O_3 arasında dolaştırır. Literatürde "boş çevrim" (null cycle) denmesinin nedeni budur. Çevrim hızlı dengeye ulaşır ve ozonun kararlı hâl derişimi **fotostasyoner denge**, yani Leighton ilişkisiyle verilir:

$$[O_3]_{ss} = J_{NO2} \cdot [NO_2] / (k_{(NO+O3)} \cdot [NO])$$

Buradaki J_{NO2}, NO_2'nin fotoliz hızı sabitidir (s^{-1}) ve öğle güneşinde tipik olarak **0,005 ile 0,008 s^{-1}** aralığındadır; $k_{(NO+O3)}$ ise NO ile ozon arasındaki tepkimenin hız sabitidir ve 298 K'de **yaklaşık 2×10^{-14} cm^3 $molekül^{-1}$ s^{-1}** ölçülmüştür (ölçülen değer $1{,}90 \times 10^{-14}$, yaklaşık %10 belirsizlikle; Arrhenius biçimi $k = 4{,}3 \times 10^{-12} \cdot \exp(-1598/T)$). İki sabitin oranı, yani $J_{NO2} / k_{(NO+O3)}$ **≈ 10 ile 15 ppb**, ozonun denge derişiminin büyüklük ölçeğini doğrudan verir. Kentte ölçülen ozonun neden kırsaldan düşük olduğunun ilk yanıtı bu ifadenin paydasındadır: NO derişimi büyüdükçe denge ozonu küçülür.

Peki çevrim kapalıysa, kirli havada ozon nasıl yükseliyor? Cevap, çevrimi **kıran** başka bir yolda: uçucu organik bileşiklerin ve karbon monoksitin OH radikaliyle oksidasyonu, **peroksi radikalleri** (HO_2 ve RO_2) üretir. Bu radikaller NO'yu **ozon tüketmeden** NO_2'ye çevirir, yani R3'ün yerine geçer:

(R4) $HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$ $\quad (k \approx 8 \times 10^{-12}\ cm^3\ molekül^{-1}\ s^{-1}$, 298 K)

(R5) $RO_2 + NO \rightarrow RO + NO_2$

R3 devre dışı kaldığında R1 ve R2 çalışmaya devam eder ve her çevrimde bir ozon molekülü **net** olarak birikir. Ozon üretim hızı böylece peroksi radikali derişimleriyle NO derişiminin çarpımına bağlanır: $P(O_3) = (k_{(HO2+NO)} \cdot [HO_2] + k_{(RO2+NO)} \cdot [RO_2]) \cdot [NO]$. Net tepkimeler yazıldığında tablo şaşırtıcı biçimde sadeleşir: $CO + 2\ O_2 + h\nu \rightarrow CO_2 + O_3$ ve $CH_4 + 4\ O_2 + 2\ h\nu \rightarrow HCHO + 2\ O_3 + H_2O$.

Kısacası ozon salınmaz, **pişirilir**. Malzemesi azot oksitler ile uçucu organik bileşikler, fırını güneş ışığıdır. Zirvesinin öğleden sonra ve yaz aylarında olmasının, kışın düşük kalmasının nedeni budur; ozon, diğer kirleticilerin aksine, güneşli ve durgun havalarda kötüleşen tek kirleticidir.

NO_x Sınırlı ve UOB Sınırlı Rejim: Azaltım Neden Ters Tepebilir?

Ozon üretiminin iki öncülü (NO_x ve UOB) birbirinin yerine geçmez, birbirine bağımlıdır. Bu bağımlılığın yönü, ikisinin göreli bolluğuna göre değişir ve iki rejim tanımlar.

NO_x sınırlı rejim: NO_x görece düşük, UOB görece boldur. Ozon üretimi NO_x eklendikçe artar, UOB azaltımı ise pratikte işe yaramaz. Kent dışı alanların, rüzgâr altı bölgelerin ve kırsal kesimin tipik rejimidir.

UOB sınırlı rejim (NO_x doymuş rejim): NO_x çok yüksektir. Ozon üretimi UOB azaltımıyla düşer; **NO_x azaltımı ise kısa vadede ozonu artırabilir**. Yoğun kirli kent merkezlerinin tipik rejimidir.

İki rejimin arasında bir **geçiş bölgesi** vardır: ozonun her iki öncüle de yaklaşık eşit ama zayıf duyarlı olduğu, EKMA izopleth diyagramında sol alttan sağ üste uzanan **sırt çizgisi**. Ulusal Araştırma Konseyi'nin ozon sorununu yeniden düşünen 1991 tarihli raporunda[13] verilen tipik sırt oranı **UOB/NO_x ≈ 8:1**'dir. Bu bir kural değil bir büyüklük göstergesidir: izopleth biçimi yerel UOB karışımına, sıcaklığa ve radikal kaynaklarına duyarlıdır ve oran kayar; Türkiye kentleri için doğrulanmış bir sırt oranı bulunmamaktadır.

NO_x azaltımının ozonu artırabilmesinin **iki ayrı mekanizması** vardır ve ikisi karıştırılmamalıdır. Birincisi **NO_x titrasyonunun zayıflamasıdır**: R3 tepkimesi kent merkezinde ozonu aktif olarak tüketir, trafik NO_x'i azalınca bu tüketim zayıflar ve ölçülen ozon yükselir. Bu, kimyasal ozon üretimi değil, **kaybın azalmasıdır**. İkincisi **radikal sonlandırmanın zayıflamasıdır**: yüksek NO_x derişiminde $OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$ tepkimesi radikal zincirini keser ve ozon üretimini baskılar; NO_x düştüğünde bu sonlandırma zayıflar, radikal havuzu büyür ve ozon üretim verimi artar.

Bu ders kitabı bilgisi, 2020 baharında dünya ölçeğinde bir doğal deneyle sınandı. Pandemi kapanmaları sırasında TROPOMI uydu ölçümleri Avrupa'nın kaynak bölgelerinde NO_2 toplam kolonlarında **%30 ile %40** azalma gösterdi. Yer ölçümü tarafında Avrupa'daki **1.100'den fazla izleme istasyonunun dörtte üçünde**, Mart-Mayıs 2020 döneminde ortalama NO_2 derişimi önceki yedi yılın aynı dönemine kıyasla en az **2,7 µg/m³ (yaklaşık %25)** düştü. Şehir kırılımları daha da keskindi: Milano'da TROPOMI NO_2 kolonu bir önceki yılın aynı dönemine göre **%38** (±%10) düşük ölçüldü, Roma'da düşüş kentsel alanlarda **%43** iken kırsal noktalarda **%17**'de kaldı, Almanya'da sekiz metropolde meteoroloji etkisi arındırıldıktan sonra yer seviyesi NO_2 **%23**, kolon NO_2 **%16** azaldı.

Dersin asıl kısmı ise şuydu: aynı dönemde **yüzey ozonu arttı**. NO_x doymuş kentsel rejimlerde titrasyonun zayıflaması, ozonu yukarı taşıdı. Yani trafiğin durduğu bir şehirde birincil kirleticiler çöktü ama ikincil kirletici yükseldi.

Buradan çıkarılacak politika sonucu dikkatli kurulmalıdır. Kent merkezinde ölçülen ozonun yükselmesi, NO_x politikasının **başarısızlığı değildir**; NO_2 ve birincil partikül düşerken ozonun yükselmesi beklenen bir geçiş davranışıdır ve bölgesel ölçekte

13. Kaynak: nap.nationalacademies.org

tablo terstir. "NO_x azaltmak ozonu artırır" biçimindeki kısaltma yanlış politika üretir; cümle her zaman **rejim ve ölçek kaydıyla** kurulmalıdır.

İkincil İnorganik Aerosol: Sülfat, Nitrat ve Amonyum (SIA)

İkincil hava kirliliği yalnız ozondan ibaret değildir. Gaz hâlde salınan SO_2, NO_x ve NH_3, atmosferde oksitlenip birleşerek **partikül** hâline geçer ve doğrudan PM2.5 kütlesine katkı verir. Bu üçlüye **ikincil inorganik aerosol (SIA)** denir ve kentsel ince partikül kütlesinin en büyük bileşenlerinden biridir.

Sülfat oluşumunun iki yolu vardır. Gaz fazda OH radikali SO_2'yi ardışık adımlarla sülfürik aside çevirir ($OH + SO_2 + M \rightarrow HSO_3 + M$, ardından $HSO_3 + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2$ ve $SO_3 + H_2O + M \rightarrow H_2SO_4$); hız belirleyici ilk adımın hız sabiti 298 K'de **yaklaşık 9×10^{-13} cm^3 $molekül^{-1}$ s^{-1}**'dir. Üretilen sülfürik asidin buhar basıncı o kadar düşüktür ki neredeyse anında partikül fazına geçer. Sulu fazda ise bulut damlacıklarında ve nemli aerosolde çözünen SO_2, **hidrojen peroksitle**, **ozonla** ya da **geçiş metali iyonu (demir, manganez) katalizli oksijenle** sülfata yükseltgenir. Kış episodlarında ve yüksek bağıl nemde baskın olan yol budur: ölçümler, sulu faz tepkimelerinin sülfat oluşumuna hâkim olduğunu ve en yüksek hızın geçiş metali katalizinde ile hidrojen peroksit oksidasyonunda görüldüğünü göstermektedir.

Nitrat oluşumunun da iki yolu vardır ve ikisi günün farklı saatlerinde çalışır. Gündüz yol basittir: $OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$. Gece OH radikali bulunmadığı için başka bir zincir devreye girer: $NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3$, ardından $NO_3 + NO_2 \rightleftharpoons N_2O_5$ ve son adımda **N_2O_5'in nemli aerosol yüzeyinde heterojen hidrolizi** ile $N_2O_5 + H_2O(aq) \rightarrow 2\ HNO_3$. Gece yolunun hızı ozon derişimine ve aerosolün su içeriğine bağlıdır, yani nemli ve ozonlu bir gece nitrat üretimi için elverişlidir.

Üçüncü bileşen, tarımın bu denklemdeki yerini açıklar. **Amonyum nitrat, gaz fazı ile partikül fazı arasında termodinamik dengede durur:**

$NH_3(g) + HNO_3(g) \rightleftharpoons NH_4NO_3$ (katı ya da sulu)

Bu denge üç sonuç doğurur. Birincisi, nitrat aerosolünün oluşumu yalnız NO_x emisyonuna değil, **mevcut amonyak miktarına, sülfat miktarına, bağıl neme ve sıcaklığa** da bağlıdır. İkincisi, **sülfat önceliklidir**: amonyak önce sülfürik asidi nötralize eder (amonyum sülfat ve bisülfat oluşur), ancak sülfat doyduktan sonra artan amonyak nitratla birleşebilir. Bunun sezgiye aykırı sonucu şudur: **SO_2 azaltımı, serbest amonyak bırakarak nitrat aerosolünü artırabilir.** Üçüncüsü, denge **düşük sıcaklık ve yüksek nemde partikül fazına kayar**; kış episodlarında nitratın öne çıkmasının nedeni budur.

UZMAN NOTU

İkincil inorganik aerosolün toplam PM2.5 içindeki payı tek bir sabit sayı değildir, istasyon tipine ve mevsime göre değişen bir banttır. On beş Avrupa istasyonunu kapsayan ICARUS projesinin beş faktörlü kaynak ayrıştırmasında SIA ortalama **%12** pay almıştır (trafik %33, toz %24, biyokütle yakımı %21, deniz tuzu %10 ile birlikte); Prag'daki bir kentsel trafik istasyonunda ise SIA payı ilkbaharda **%20**, kışın **%36**'ya çıkmaktadır. Yani kabaca **%12 ile %36** arasında bir banttan söz edilebilir; ikincil organik aerosol de eklendiğinde toplam ikincil pay bu bandın üstüne çıkar. Tek bir konsolide Avrupa ortalaması veren kurumsal bir kaynak bulunamamıştır, bu yüzden bant çalışma bazında verilmiştir.

İkincil organik aerosol (SOA) ise bu tablonun karbon tarafıdır: uçucu organik bileşiklerin (özellikle bitkisel kökenli izopren ve monoterpenlerin, ayrıca antropojen aromatiklerin) OH, ozon ve NO_3 ile oksidasyonu, buhar basıncı düşük ürünler üretir ve bunlar yoğuşarak organik aerosol oluşturur. SOA, kentsel ve kırsal organik aerosolün baskın bileşenidir ve genellikle doğrudan salınan birincil organik aerosolden daha büyük paya sahiptir; oluşum yolları çok kuşaklı olduğu için envanterlerin en belirsiz kalemlerindendir.

Bu bölümün tarımla ilgili sonucu, serinin ikinci bölümüne köprü kurar: amonyak azaltımı bir tarım politikası gibi görünür ama sonuçları bir **ince partikül politikasıdır**. Tarımın ve doğal kaynakların ulusal envanterdeki payı, kaynak haritası başlığı altında ikinci bölümde verilecektir.

Fotokimyasal Sis ve Kükürtlü Kış Sisi: İki Farklı Mekanizma

Hava kirliliği tarihinin en çok anılan iki olayı, aynı adla anılan ama kimyaca birbirinin zıddı iki olgudur. Londra tipi sis **indirgeyici**, Los Angeles tipi sis **oksitleyicidir**.

TABLO 1.2

Özellik	Londra tipi (kükürtlü, indirgeyici)	Los Angeles tipi (fotokimyasal, oksitleyici)
Baskın kirletici	SO_2, is, birincil partikül madde	O_3, peroksiasetil nitrat, NO_2, ikincil aerosol
Kaynak	Kömür yakma (ısınma ve sanayi)	Trafik ve çözücü kaynaklı NO_x ile UOB
Meteoroloji	Soğuk, nemli, radyasyon inversiyonu, düşük güneşlenme	Sıcak, güneşli, çökme inversiyonu
Mevsim ve saat	Kış, sabahın erken saatleri	Yaz, öğleden sonra
Kimyasal karakter	İndirgeyici	Oksitleyici
Tarihsel olay	Londra Büyük Sisi, 5-9 Aralık 1952	Los Angeles havzası, 1940'lardan itibaren

Londra Büyük Sisi, 5 ile 9 Aralık 1952 arasında, yani **beş gün** sürdü. Dönemin resmî tahmini **yaklaşık 4.000 fazladan ölümdü**. Sonraki epidemiyolojik yeniden değerlendirmeler, ilk dalgadaki bu sayının üzerine izleyen yıl boyunca **yaklaşık 8.000 gecikmeli ölüm** ekleyerek toplamı **yaklaşık 12.000**'e çıkarır; gecikmeli ölümlerin büyük bölümü solunum yolu enfeksiyonlarıdır. İki sayı çelişmez, farklı şeyleri ölçer: ilki olay sırasındaki fazladan ölümü, ikincisi akut maruziyetin kronik sonuçlarını da kapsar. Olay, **1956 tarihli İngiliz Clean Air Act**'inin doğrudan gerekçesi olmuştur ve modern hava kalitesi mevzuatının başlangıç noktası sayılır.

Bu ikili karşıtlığın bugün için anlamı şudur: Londra tipi sis **yakıt sorunudur**, Los Angeles tipi sis **kimya ve güneş sorunudur**. Türkiye'de kış episodları büyük ölçüde birinci tipe benzer; ozon zirveleri ise yaz aylarında ikinci tipin mantığıyla oluşur. Aynı şehirde, altı ay arayla, iki farklı kirlilik rejimi yaşanır ve ikisi aynı önlemle çözülmez.

Atmosferik Ömür ve Taşınım Mesafesi

Bir hava kirleticisinin atmosferde ne kadar kaldığı, onun ne kadar uzağa gideceğini ve dolayısıyla kimin sorunu olduğunu belirler. Ömür ve ölçek arasındaki bu bağ, yerel sorun ile sınırötesi sorun ayrımının fiziksel tabanıdır.

TABLO 1.3

Tür	Tipik atmosferik ömür	Ölçek sonucu
Atomik oksijen, O	~1,3 × 10^{-5} s	Anlık, yalnız yerel kimya
NO_2 (gündüz, fotoliz)	~200 s	Kimyasal çevrim, taşınmaz
NO_x (kirli hava)	2 ile 8 saat	Kent ve yakın çevresi
NO_x (temiz kırsal hava)	~1 gün	Bölgesel
SO_2 (gaz faz oksidasyon)	~6 gün	Bölgesel ve sınırötesi
SO_2 (kuru çökelme)	~1 gün	Yerel kayıp yolu
CO	~1 ay	Yarıküresel
CH_4	Yıllar	Küresel
PM2.5 (yağış yokluğunda)	Haftalar	Kıtalar arası taşınım
O_3 (yüksek NO derişiminde)	Dakikalar	Kent merkezinde titrasyonla yok olur

Tablodan üç okuma çıkar. Birincisi, **NO_x büyük ölçüde salındığı bölgede kalır**, bu yüzden trafik kaynaklı NO_2 sorunu esas olarak yerel bir sorundur ve yerel önlemlerle (düşük emisyon bölgeleri, filo dönüşümü) yönetilebilir. İkincisi, **SO_2 ve PM2.5 ülke sınırı tanımaz**; asit çökelmesi ve ince partikül, uluslararası sözleşmelerin konusu olmasını bu özelliklerine borçludur. Üçüncüsü, ozonun ömrünün kent merkezinde dakikalarla ölçülmesi, kent içi ozon ölçümlerinin neden düşük çıktığını ve bölgesel ozon değerlendirmesinin neden kırsal istasyonlara dayandığını açıklar.

KİLİT MESAJ

Bir kirleticinin nereden çıktığını bilmek, onu nasıl azaltacağınızı bilmek anlamına gelmez. İkincil kirleticide azaltım aritmetiği doğrusal değildir, öncüller arasında rekabet vardır ve yanlış öncülü azaltmak sonucu ters çevirebilir. Bu yüzden hava kalitesi yönetimi, emisyon listesiyle değil, atmosfer kimyasıyla başlar.

1.3 Kirletici Havada Nasıl Dağılır? Dispersiyon ve Meteoroloji

Emisyon, hava kirliliğinin yalnızca yarısıdır; diğer yarısı meteorolojidir. Diğer yarısı, salınan kütlenin ne kadar havada seyreldiğidir ve bunu belirleyen şey bacanın kendisi değil, atmosferin o anki hâlidir. Aynı tesis, aynı debiyle, aynı derişimde salım yaparken bir gün yer seviyesinde ölçülemeyecek kadar düşük, başka bir gün sınır değeri zorlayan katkı üretebilir. Bu bölüm, o farkın fiziğini kurar ve serideki **dispersiy-**

onun tek kanonik yeridir: üçüncü bölümdeki sanayi bacası hesapları buraya geri referans verecek, denklemi yeniden türetmeyecektir.

Atmosferik Kararlılık: Adyabatik Gradyan ve Pasquill A-F Sınıfları

Hava kirliliğinin seyrelmesini yöneten atmosferik karışma eğilimi, tek bir kıyaslamayla belirlenir: yükselen bir hava parselinin kendi sıcaklığı, çevresindekine göre nasıl değişir. Kuru bir hava parseli yükseldiğinde genişler ve ısı alışverişi olmadan soğur; bu soğuma hızı **kuru adyabatik sıcaklık gradyanıdır** ve yerçekimi ivmesinin sabit basınçtaki özgül ısıya oranından çıkar.

DENKLEM 1.1 · KARARLILIK ÖLÇÜTÜ · KURU ADYABATİK SICAKLIK GRADYANI

$$\Gamma_d = \frac{g}{c_p} = 9{,}8\ ^\circ\mathrm{C/km} \approx 1\ ^\circ\mathrm{C} / 100\ \mathrm{m} \tag{1.1}$$

Gerçek çevresel gradyan Γ ile kıyas

$\Gamma > \Gamma_d$ süperadyabatik: **kararsız**, düşey karışım güçlü (A ile C)

$\Gamma = \Gamma_d$ nötr (D sınıfı)

$\Gamma < \Gamma_d$ subadyabatik: **kararlı** (E ve F sınıfları)

$\Gamma < 0$ yükseklikle sıcaklık artıyor: **sıcaklık inversiyonu**, çok kararlı

Yükselen hava parseli çevresinden sıcak kalıyorsa yükselmeye devam eder ve kirletici seyrelir; soğuk kalıyorsa geri iner ve kirletici salındığı katmanda birikir. Pasquill A-F sınıflarının fiziksel tabanı bu kıyastır.

Sezgisi şudur: yükselen parsel çevresinden **sıcak** kalıyorsa yükselmeye devam eder, atmosfer kendi kendini karıştırır ve kirletici seyrelir. Parsel çevresinden **soğuk** kalıyorsa geri iner, düşey hareket bastırılır ve kirletici salındığı katmanda birikir. Hava kirliliğinin kötüleştiği günlerin ortak özelliği rüzgârsızlık değil, bu ikinci durumdur.

Saha pratiğinde düşey sıcaklık profili her yerde ölçülmediği için, kararlılık üç kolay gözlemden okunur: **rüzgâr hızı, gündüz güneşlenme şiddeti ve gece bulutluluğu**. Pasquill'in 1961'de önerdiği ve Turner'ın düzenlediği sınıflandırma bugün hâlâ standarttır.

TABLO 1.4

Yüzey rüzgâr hızı (10 m'de, m/s)	Gündüz: kuvvetli güneşlenme	Gündüz: orta	Gündüz: zayıf	Gece: bulutluluk ≥ 4/8	Gece: bulutluluk ≤ 3/8
< 2	A	A ile B arası	B	E ya da F	F
2 ile 3	A ile B arası	B	C	E	F
3 ile 5	B	B ile C arası	C	D	E
5 ile 6	C	C ile D arası	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A çok kararsız, D nötr, F kararlı.

Sınıfların anlamı sırasıyla şöyledir: **A çok kararsız, B kararsız, C orta kararsız, D nötr, E kararlı, F çok kararlıdır.** Güneşlenme eşikleri sayısaldır: **kuvvetli 700 W/m² üzeri, orta 350 ile 700 W/m², zayıf 350 W/m² altı**. Bulutluluk, gökyüzünün bulutla kaplı kesridir ve sekizde birlerle ifade edilir.

Tablonun en önemli okuması, kış episodunun meteorolojik imzasının nerede olduğudur: **sağ üst köşede**. Rüzgârın 2 m/s altında olduğu, açık (bulutluluk 3/8 ve altı) bir gece, doğrudan **F sınıfına**, yani en kararlı koşula karşılık gelir. Aynı tablonun bir başka okuması da politika açısından değerlidir: rüzgâr **6 m/s'yi** geçtiğinde tablo, gece de gündüz de **D sınıfına kilitlenir**. Yani yeterince kuvvetli bir rüzgâr, güneşlenme ile bulutluluk arasındaki tüm farkları siler; mekanik türbülans termik etkileri bastırır.

Düşey sıcaklık profili ölçülebiliyorsa (yaklaşık 100 m'lik bir yükseklik farkı üzerinden), sınıf doğrudan gradyandan okunur:

TABLO 1.5

Kararlılık sınıfı	Düşey sıcaklık gradyanı ΔT/Δz (°C / 100 m)
A	ΔT/Δz < −1,9
B	−1,9 ile −1,7 arası
C	−1,7 ile −1,5 arası
D	−1,5 ile −0,5 arası
E	−0,5 ile 1,5 arası
F	1,5 < ΔT/Δz

D sınıfının sınırlarının (−1,5 ile −0,5 °C/100 m) tam da kuru adyabatik gradyanın (−1 °C/100 m) çevresinde olması tesadüf değildir: tablo, Formül kartı 1'deki ölçütün

sayısal karşılığıdır. Daha ileri düzeyde, hem sıcaklık hem rüzgâr profili varsa **bulk Richardson sayısı** kullanılır: $Ri_b = [g / T(z_1)] \cdot [\Delta T/\Delta z] / [\Delta u/\Delta z]^2$, ve sınıf eşikleri A için −0,86 altı, D için −0,10 ile 0,053 arası, F için 0,134 üstüdür. Bu gösterim, kararlılığın aslında **termik üretim ile mekanik üretim arasındaki oran** olduğunu açıkça gösterir.

Karışım Yüksekliği ve Derişimle İlişkisi

Kararlılık sınıfı bir koşulu tanımlar; **karışım yüksekliği** ise o koşulun ne kadar kalın bir hava tabakasında geçerli olduğunu söyler. Karışım yüksekliği (H_{mix}), yerden itibaren kirleticinin düşeyde karışabildiği tabakanın kalınlığıdır ve üstünü genellikle bir inversiyon tabanı kapatır. Kentsel ölçekte derişimle ilişkisi, basit kutu modelinde açıkça görülür:

$$C = (E \cdot L) / (u \cdot H_{mix})$$

Burada **E** alansal emisyon hızı ($g/m^2 \cdot s$), **L** kutunun rüzgâr yönündeki uzunluğu (m), **u** karışım tabakası içindeki ortalama rüzgâr hızı (m/s), $\mathbf{H_{mix}}$ karışım yüksekliğidir (m). İfadenin söylediği şey tek cümleyle özetlenebilir: **derişim, karışım yüksekliğiyle ters orantılıdır.** Karışım yüksekliği 1.000 metreden 200 metreye düşerse, emisyon hiç değişmese bile derişim **beş katına** çıkar. Kış episodlarının mekanizması buradadır ve bu, "emisyon artmadığı hâlde hava neden kirlendi" sorusunun tek cümlelik yanıtıdır.

Karışım yüksekliğinin klasik hesabı **Holzworth yöntemidir**: sabah radyosonda sıcaklık profili ile öğleden sonraki beklenen maksimum yüzey sıcaklığı kullanılır ve kuru adyabat boyunca yükseltilen bir hava parselinin profili kestiği yükseklik bulunur. Sabah karışım yüksekliği için sabah minimum yüzey sıcaklığının **5 °C** üstünden çizilen adyabat kullanılır (bu ekleme kentsel ısı adasının kaba karşılığıdır); öğleden sonraki değer için beklenen maksimum sıcaklık esas alınır. Holzworth'un 1972 tarihli çalışması[14], yaz aylarındaki yağışsız günler için günlük maksimum karışım yüksekliğini iklimsel olarak **2.000 metreyle** sınırlar.

Modern modellerde karışım yüksekliği iki bileşenin büyüğü olarak alınır: **konvektif** karışım yüksekliği (yüzey ısı akısından türetilir) ve **mekanik** karışım yüksekliği (rüzgâr kaynaklı türbülanstan türetilir). Kararlı sınır tabakada, yani gece ve kış koşullarında, karışım tamamen mekaniktir. Venkatram'ın orta enlemler için verdiği ampirik bağıntı, $z_{ie} = 2300 \cdot u^{*3/2}$ (u* sürtünme hızı, m/s), bu bağımlılığı somut sayılara çevirir:

14. Kaynak: nrc.gov

TABLO 1.6

Sürtünme hızı u* (m/s)	Denge mekanik karışım yüksekliği (m)	Tipik koşul
0,05	26	Neredeyse durgun, kararlı gece
0,10	73	Zayıf rüzgâr, kararlı gece (F sınıfı)
0,20	206	Hafif rüzgâr
0,30	378	Orta rüzgâr, nötr (D sınıfı)
0,50	813	Kuvvetli rüzgâr
0,70	1.347	Fırtınalı, güçlü mekanik karışım

Tablo, kutu modeliyle birlikte okunduğunda kış episodunun tüm aritmetiğini verir. Durgun bir kış gecesinde karışım yüksekliği birkaç on metreye inebilirken, rüzgârlı bir günde bir kilometreyi aşar; arada **on kattan fazla** bir fark vardır ve bu fark doğrudan derişime yansır. Gözlemlenmiş mevsimlik karışım tabakası yükseklikleri için (bir Akdeniz kenti üzerinde lidar ölçümüne dayanan yaz 955 m, kış 556 m gibi değerler) birincil künyesi doğrulanabilen bir kaynak bulunamamıştır; bu yüzden burada yalnız mekanizma ve bağıntı verilmiş, gözlemsel mevsim ortalaması sayı olarak yazılmamıştır.

> **UZMAN NOTU**
>
> Aynı bacanın çözümlü örneğini bu bölümün ilerleyen kısmında iki kararlılık sınıfında hesaplayacağız ve sonuç şu olacak: nötr havada 2 kilometrede **1,25 µg/m³** olan yer seviyesi katkısı, çok kararlı havada **pratikte sıfıra** iner. Bu, kararlı havanın “temiz” olduğu anlamına gelmez. Kirletici yok olmamıştır, yalnızca seyrelmeden daha uzağa taşınmıştır ve sabah inversiyon çözüldüğünde toptan yere inebilir. Dispersiyon bir arıtma yöntemi değil, bir yer değiştirme mekanizmasıdır.

Sıcaklık İnversiyonu: Radyasyon, Çökme ve Cephe İnversiyonu

Sıcaklık inversiyonu, yükseklikle sıcaklığın **arttığı** hava tabakasıdır ve atmosferin düşey karışımını fiilen durduran bir kapak işlevi görür. Tek bir olgu değildir; oluşum mekanizmasına göre dört tipi ayırt etmek gerekir, çünkü ömürleri ve coğrafi ölçekleri farklıdır.

Radyasyon (yayınım) inversiyonu açık ve durgun gecelerde oluşur: yer yüzeyi uzun dalga ışınımla hızla soğur, yere temas eden hava tabakası da soğur ve gradyan tersine döner. **Yerden başlar**, tipik kalınlığı onlarca metreden birkaç yüz metreye kadar değişir ve gün doğumundan birkaç saat sonra çözülür. Isınma kaynaklı kış episodlarının ana mekanizması budur ve Türkiye’nin çanak topografyalı illerinde her kış tekrarlanır.

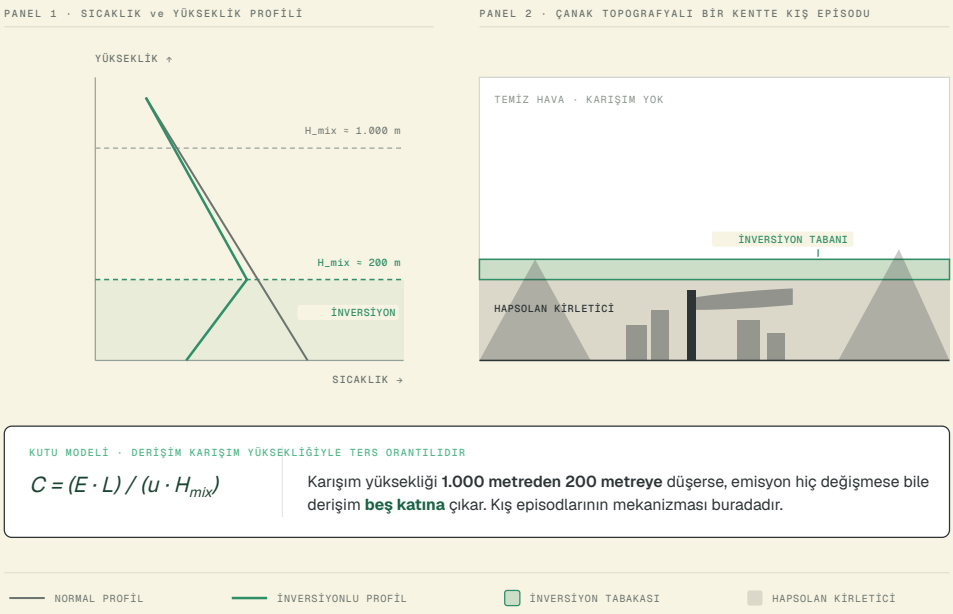
Çökme (subsidence) inversiyonu yüksek basınç merkezlerinde oluşur: geniş ölçekli alçalan hava adyabatik olarak sıkışıp ısınır ve altındaki soğuk havayı bastırır. **Yerden yüksekte** oluşur, günlerce sürebilir ve geniş bir alanı kapsar. Los Angeles tipi uzun süreli episodların klasik nedenidir ve radyasyon inversiyonundan farklı olarak gün içinde çözülmez.

Cephe (frontal) inversiyonu, sıcak hava kütlesinin soğuk hava kütlesinin üzerine tırmanmasıyla oluşur; cephe yüzeyi boyunca eğik bir inversiyon tabakası kurulur ve ömrü cephenin geçişi kadardır. **Advektif inversiyon** ise sıcak havanın soğuk bir yüzey (kar örtüsü, soğuk deniz) üzerine yatay taşınmasıyla oluşur.

ŞEKİL 1.4

Sıcaklık İnversiyonu ve Karışım Yüksekliği

İnversiyon, yükseklikle sıcaklığın arttığı tabakadır ve atmosferin düşey karışımını durduran bir kapak gibi davranır.



Radyasyon inversiyonu açık ve durgun gecelerde yerden başlar, kalınlığı onlarca metreden birkaç yüz metreye değişir ve gün doğumundan birkaç saat sonra çözülür; çökme inversiyonu ise yüksek basınç merkezlerinde yerden yüksekte oluşur, günlerce sürebilir ve gün içinde çözülmez. Panel 2 radyasyon inversiyonunu, yani Türkiye'nin çanak topografyalı illerinde her kış tekrarlanan mekanizmayı çizer.

Kış Episodları: Meteorolojik Mekanizma

Kış episodu, hava kirliliğini kat kat artıran ve üç koşulun aynı anda sağlandığı bir meteorolojik kilitlenmedir: **düşük rüzgâr hızı**, **açık gece**, ve bunların ürettiği **yüzey tabanlı radyasyon inversiyonu**. Pasquill tablosunda bu, F sınıfına karşılık gelir;

Venkatram bağıntısında sürtünme hızının 0,10 m/s civarına inmesine, yani **70 ile 80 metrelik** bir mekanik karışım yüksekliğine karşılık gelir; kutu modelinde ise derişimin kat kat yükselmesi demektir. Topografya bu kilidi güçlendirir: çanak ya da vadi tabanındaki bir yerleşimde soğuk hava yamaçlardan aşağı akarak tabanda birikir ve inversiyon hem daha erken kurulur hem daha geç çözülür.

Mekanizmanın kritik yanı, **emisyonun artmasına gerek olmamasıdır**. Aynı şehir, aynı sayıda soba, aynı sayıda araçla, meteoroloji değiştiği için üç beş kat daha kirli bir hava soluyabilir. Bunun hava kirliliği politikası açısından sonucu iki yönlüdür. Bir yandan episod yönetimi (kısa vadeli eylem planları, geçici trafik ve yakma kısıtları) gerçek ve gerekli bir araçtır. Öte yandan episod yönetimi **emisyon azaltımının yerine geçemez**: meteoroloji kirliliği yaratmaz, yalnızca görünür kılar. Aynı emisyon düzeyiyle bir sonraki durgun gecede tablo aynen tekrarlanır.

Türkiye tarafında bir ayrıntı bu resmi tamamlar. İstanbul'da 2004-2010 döneminde günlük ortalama PM10'un 50 µg/m^3 eşiğini aştığı gün sayısı ortalama olarak **ilkbaharda 49, kışın 45, sonbaharda 41 gündür**. Aşımların kışta değil **ilkbaharda** zirve yapması, ısınma dışı bir katkıya, büyük olasılıkla çöl tozu taşınımına işaret eder: Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün toz taşınımı modeline göre Türkiye'yi Sahra ve Orta Doğu kaynaklı toz etkiler ve taşınım özellikle **ilkbahar, yaz ve sonbahar** aylarında, Basra alçak basınç merkezinin etkili olduğu dönemlerde yoğunlaşır. Yani bir aşım gününün nedenini meteorolojiye bakmadan yakıt tüketimine yüklemek, hem teşhisi hem önlemi yanlışlar.

Kış episodunun yakıt ve davranış tarafı, yani soba ve kazanlarda eksik yanma, katı yakıt kalitesi ve doğalgaz dönüşümünün etkisi, serinin **beşinci bölümünün** konusudur. Burada kurulan şey yalnız meteorolojik mekanizmadır.

Gauss Dağılım Modelinin Temel Denklemi

Bir noktasal kaynaktan sürekli salınan, tepkimeye girmeyen bir kirleticinin rüzgâr altındaki derişim alanını hesaplamanın klasik yolu **Gauss duman izi modelidir**. Model, duman izinin kesitindeki derişim dağılımının hem yatayda hem düşeyde normal (Gauss) dağılımlı olduğunu, dağılımın genişliğinin ise mesafeyle büyüdüğünü varsayar.

DENKLEM 1.2 · GAUSS DAĞILIM DENKLEMİ · YER YANSIMALI

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\, u\, \sigma_y\, \sigma_z} \cdot \exp(-y^2 / 2\sigma_y^2) \cdot \{ \exp(-(z-H)^2 / 2\sigma_z^2) + \exp(-(z+H)^2 / 2\sigma_z^2) \} \quad (1.2)$$

YER SEVİYESİ MERKEZ HATTI (Z = 0, Y = 0)

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi\, u\, \sigma_y\, \sigma_z} \cdot \exp(-H^2 / 2\sigma_z^2)$$

BURADA

- C derişim (g/m³; µg/m³ için 10^6 ile çarpılır)
- Q kaynak kütle debisi (g/s)
- u baca yüksekliğinde rüzgâr hızı (m/s)
- σ_y, σ_z yatay ve düşey dağılım katsayıları (m)
- $H = h_s + \Delta h$ efektif baca yüksekliği (m)
- x, y, z rüzgâr yönünde, rüzgâra dik ve yerden yükseklik (m)

İkinci üstel terim yer yansımasıdır: yere ulaşan kirletici emilmez, yerin altında bir sanal kaynak varsayımıyla geri karıştırılır. Yer seviyesinde iki terim özdeşleşir ve sadeleşmiş hâl çıkar. Model tepkimesiz kirletici içindir; ozon ve ikincil aerosol için uygun değildir.

Denklemdeki **ikinci üstel terim yer yansımasıdır**: yere ulaşan kirletici emilmez, geri karışır ve bu, yerin altında, gerçek kaynağın ayna görüntüsü konumunda bir **sanal kaynak** eklenerek temsil edilir. Yer seviyesinde (z = 0) iki terim özdeşleşir ve toplamları $2\cdot\exp(-H^2/2\sigma_z^2)$ olur; sadeleşmiş hâl buradan çıkar. Aynı mantık yukarıda da çalışır: kirletici karışım yüksekliğine ulaştığında yukarı yayılım durur ve inversiyon tabanına göre ikinci bir sanal kaynak eklenir. Çoklu yansıma serisinde pratikte **tek yansıma kabul edilebilir sonuç verir, beş yansıma çok doğru sonuç verir**.

σ'nın sezgisel karşılığı şudur: duman izi kesitinde **$(4\sigma_y, 4\sigma_z)$ elipsi kütlenin %95,4'ünü**, **$(2\sigma_y, 2\sigma_z)$ elipsi %68,2'sini** içerir. Yani σ, duman izinin yarı genişliği gibi okunabilir.

Dağılım katsayıları kararlılık sınıfına ve mesafeye bağlıdır. El hesabı ve klasik modeller için standart set, Briggs'in 1973 tarihli çalışmasından gelen ve $\sigma = a \cdot x \cdot (1 + b \cdot x)^c$ genel biçimini kullanan formüllerdir; burada **x rüzgâr altı mesafe, metre cinsindendir** ve sonuç metredir.

TABLO 1.7

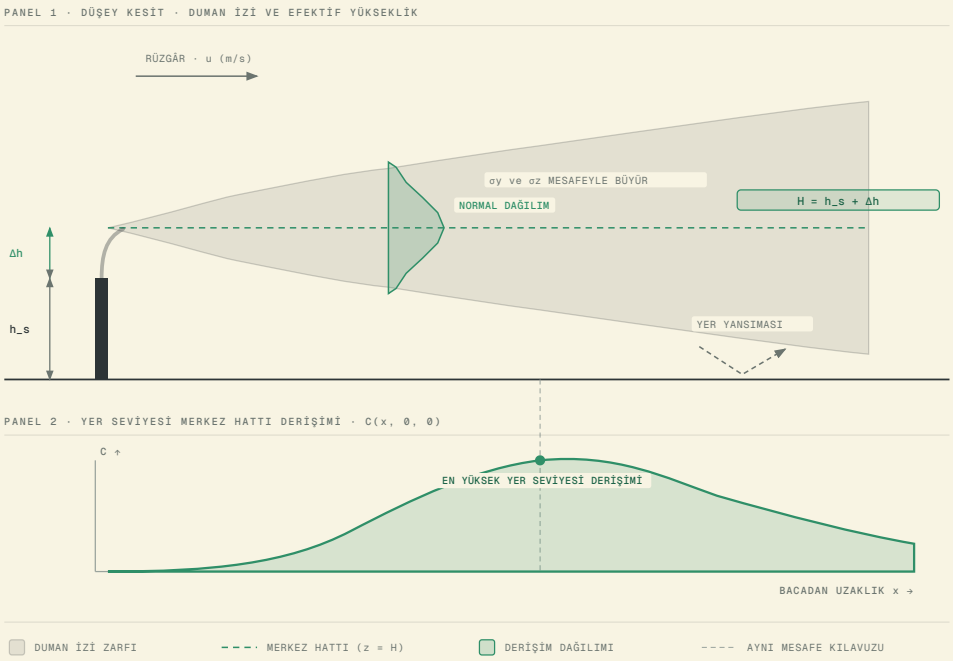
Pasquill sınıfı	σ_y (m)	σ_z (m)
Kırsal (açık arazi) koşulları		
A	$0{,}22\,x\,(1 + 0{,}0001\,x)^{-1/2}$	$0{,}20\,x$
B	$0{,}16\,x\,(1 + 0{,}0001\,x)^{-1/2}$	$0{,}12\,x$
C	$0{,}11\,x\,(1 + 0{,}0001\,x)^{-1/2}$	$0{,}08\,x\,(1 + 0{,}0002\,x)^{-1/2}$
D	$0{,}08\,x\,(1 + 0{,}0001\,x)^{-1/2}$	$0{,}06\,x\,(1 + 0{,}0015\,x)^{-1/2}$
E	$0{,}06\,x\,(1 + 0{,}0001\,x)^{-1/2}$	$0{,}03\,x\,(1 + 0{,}0003\,x)^{-1}$
F	$0{,}04\,x\,(1 + 0{,}0001\,x)^{-1/2}$	$0{,}016\,x\,(1 + 0{,}0003\,x)^{-1}$
Kentsel koşullar		
A ile B	$0{,}32\,x\,(1 + 0{,}0004\,x)^{-1/2}$	$0{,}24\,x\,(1 + 0{,}001\,x)^{+1/2}$
C	$0{,}22\,x\,(1 + 0{,}0004\,x)^{-1/2}$	$0{,}20\,x$
D	$0{,}16\,x\,(1 + 0{,}0004\,x)^{-1/2}$	$0{,}14\,x\,(1 + 0{,}0003\,x)^{-1/2}$
E ile F	$0{,}11\,x\,(1 + 0{,}0004\,x)^{-1/2}$	$0{,}08\,x\,(1 + 0{,}00015\,x)^{-1/2}$

Tablodan iki okuma çıkarılmalıdır. Birincisi, aynı kararlılık sınıfında **kentsel σ_y, kırsalın iki katıdır** (D sınıfında katsayı 0,08 yerine 0,16). Şehrin yüzey pürüzlülüğü ve ısı adası, yatay yayılmayı ikiye katlar. Bunun sezgiye aykırı sonucu şudur: **şehir havasının daha kirli olması dispersiyondan değil, emisyon yoğunluğundan gelir**; şehir aslında daha iyi seyreltir, ama çok daha fazla salar. İkincisi, kentsel A ile B satırında σ_z üssü **pozitiftir (+1/2)**, yani düşey yayılma mesafeyle doğrusaldan daha hızlı büyür; bu istisna, kentsel kararsız koşullardaki güçlü termik karışımı temsil eder. Bu katsayı setinin geçerlilik aralığı için literatürde yaygın olarak 100 metre ile 10 kilometre verilir, ancak elimizdeki kaynak aralığı açıkça yazmamaktadır; formüller güvenle kısa ve orta mesafeli dağılım için kullanılmalıdır.

ŞEKİL 1.5

Gauss Dağılımı ve Efektif Baca Yüksekliği

Duman izi rüzgâr yönünde genişler, seyrelir ve yerden yansır. Yer seviyesindeki en yüksek derişim bacanın dibinde değil, belirli bir mesafededir.



Şema ölçekli değildir, mekanizmayı gösterir. Model tepkimesiz kirletici içindir ve kararlı hâl, sabit tek yönlü rüzgâr, düz arazi ile yerden tam yansıma varsayar; ozon ve ikincil aerosol için uygun değildir. Yatay dağılım katsayısı σy aynı kararlılık sınıfında kentsel koşullarda kırsalın yaklaşık iki katıdır, yani şehir daha iyi seyreltir ama çok daha fazla salar.

Efektif Baca Yüksekliği ve Duman Yükselmesi (Briggs)

Gauss denkleminde yer seviyesi derişimini belirleyen tek en güçlü değişken **H**'dir, çünkü üstel terimde **H'nin karesi** bulunur. Ve H, bacanın fiziksel yüksekliği değildir: baca gazı sıcak ve hızlı çıktığı için bacadan sonra bir süre daha yükselir.

$H = h_s + \Delta h$, burada h_s fiziksel baca yüksekliği (m), Δh duman yükselmesidir (m).

Duman yükselmesinin iki sürücüsü vardır: **kaldırma kuvveti** (sıcaklık farkından) ve **momentum** (çıkış hızından). Kaldırma baskın olduğunda, ki tipik yanma bacalarında öyledir, hesap Briggs'in denklemleriyle yapılır.

DENKLEM 1.3 · BRİGGS DUMAN YÜKSELMESİ · EFEKTİF BACA YÜKSEKLİĞİ

$$F_b = \frac{g\, v_s\, d_s^{\,2}\, \Delta T}{4\, T_s} \quad [\mathrm{m^4/s^3}] \qquad F_m = \frac{v_s^{\,2}\, d_s^{\,2}\, T_a}{4\, T_s} \quad [\mathrm{m^4/s^2}] \tag{1.3}$$

NİHAİ YÜKSELME VE ERİŞİM MESAFESİ

Kararsız ve nötr (A ile D): $F_b < 55 \rightarrow \Delta h = 21{,}425\, F_b^{3/4} / u_s$ · $F_b \geq 55 \rightarrow \Delta h = 38{,}71\, F_b^{3/5} / u_s$

Nihai yükselme mesafesi: $F_b < 55 \rightarrow x_f = 49\, F_b^{5/8}$ · $F_b \geq 55 \rightarrow x_f = 119\, F_b^{2/5}$

Kararlı (E ve F): $s = g\,(\partial\theta/\partial z) / T_a$ ve $\Delta h = 2{,}6\,[\, F_b / (u_s s)\,]^{1/3}$

Kademeli yükselme ($x < x_f$): $\Delta h(x) = 1{,}60\, F_b^{1/3} x^{2/3} / u_s$

BURADA

- g 9,81 m/s²
- d_s baca iç çapı (m)
- ΔT $T_s - T_a$ (K)
- $\partial\theta/\partial z$ potansiyel sıcaklık gradyanı; varsayılan değerler E sınıfı için 0,020 K/m, F sınıfı için 0,035 K/m
- v_s baca çıkış hızı (m/s)
- T_s, T_a baca gazı ve ortam sıcaklığı (K)
- u_s baca yüksekliğinde rüzgâr hızı (m/s)

Kademeli yükselmedeki 1,6 katsayısı ampirik değildir: sürükleme parametresi $\beta_1 = 0{,}6$ konduğunda $3 / (2 \times 0{,}36) = 4{,}1667$ çıkar ve bunun küp kökü 1,609'dur. Briggs verisi çıkış hızı 6 ile 30 m/s, çıkış sıcaklığı 120 ile 260 °C aralığındaki büyük santral bacalarından toplanmıştır.

Hangi mekanizmanın kontrolde olduğu bir eşik sıcaklık farkıyla belirlenir. Kararsız ve nötr koşullarda $F_b \geq 55$ için $(\Delta T)_c = 0{,}00575 \cdot T_s \cdot v_s^{2/3} / d_s^{1/3}$; gerçek ΔT bu eşiğin üstündeyse yükselme kaldırma kontrollüdür, altındaysa momentum kontrollüdür ve $\Delta h = 3 \cdot d_s \cdot v_s / u_s$ ile hesaplanır.

Kademeli yükselme formülündeki **1,6 katsayısı**, ders kitaplarında çoğu zaman ampirik bir sabit gibi sunulur. Oysa türetilebilir bir sayıdır. Doğrudan kaynağın yükselme ifadesinde momentum ihmal edildiğinde $\Delta h = (3 / (2\beta_1^{\,2}))^{1/3} \cdot F_b^{1/3} \cdot x^{2/3} / u$ biçimi kalır; burada **$\beta_1 = 0{,}6$** sürükleme (entrainment) parametresidir. Yerine konduğunda $3 / (2 \times 0{,}36) = 4{,}1667$ ve bunun küp kökü **1,609** çıkar. Yani 1,6, yükselen duman izinin çevresindeki havayı ne hızla içine kattığının doğrudan sonucudur.

Briggs formüllerinin geçerlilik çerçevesi de bilinmelidir: veri seti tipik olarak fosil yakıtlı büyük santral bacalarından toplanmıştır ve **çıkış hızları 6 ile 30 m/s**, **çıkış sıcaklıkları 120 ile 260 °C** aralığındadır. Holland, Carson ve Moses ile CONCAWE gibi

alternatif formüller de kullanımdadır, ancak Gauss modellerinde standart olan Briggs setidir.

Çözümlü Örnek: Bir Bacanın Yer Seviyesi Katkısı

Aşağıdaki örnek temsilî bir bacaya aittir, gerçek bir tesisin verisi değildir. Önce sonucu, sonra onu veren dokuz adımlık hesabı gösteriyoruz.

ŞEKİL 1.6

ÇÖZÜMLÜ ÖRNEK · HESABIN ÖZETİ

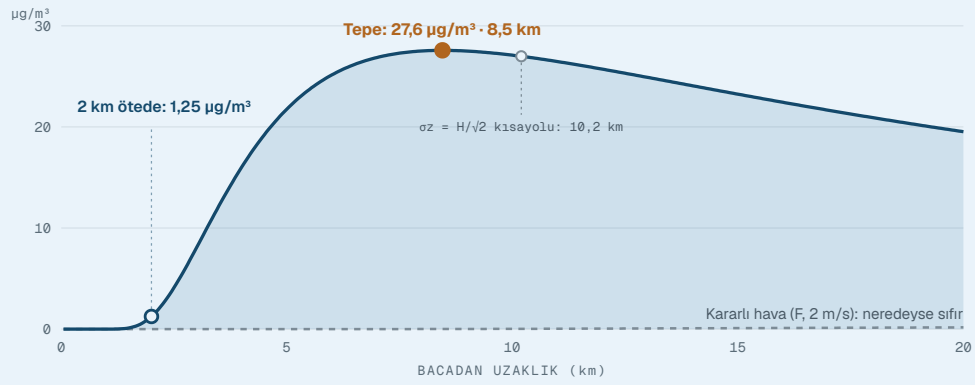
En Yüksek Katkı Bacanın Dibinde Değil, 8,5 Kilometre Ötede

Temsilî baca: 100 m yükseklik, 100 g/s SO_2, baca hizasında rüzgâr 5 m/s, nötr hava (D sınıfı), kırsal arazi. Eğri, rüzgâr yönündeki merkez hattında yer seviyesi derişimidir.

EFEKTİF YÜKSEKLİK
214 m
100 m baca + 114 m duman yükselmesi

2 KM ÖTEDE
1,25 µg/m³
yer seviyesi, merkez hattı

EN YÜKSEK KATKI
27,6 µg/m³
yaklaşık 8,5 km ötede



Değerler yaklaşık bir saatlik ortalamaya karşılık gelir ve WHO'nun 24 saatlik SO_2 kılavuz değeriyle doğrudan kıyaslanmaz. Eğitim amaçlı Gauss modelidir; düzenleyici değerlendirme AERMOD gibi modellerle yapılır. Hesap: Briggs duman yükselmesi ve Briggs kırsal dağılım katsayıları, US EPA ISC3 Cilt II (1995), https://gaftp.epa.gov/aqmg/SCRAM/models/other/isc3/isc3v2.pdf; D. B. Turner, Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates (1970).

Girdiler: fiziksel baca yüksekliği h_s = **100 m** · baca iç çapı d_s = **3,0 m** · çıkış hızı v_s = **15 m/s** · baca gazı sıcaklığı T_s = **400 K** (127 °C) · ortam sıcaklığı T_a = **293 K** (20 °C) · SO_2 kütle debisi Q = **100 g/s** · baca yüksekliğinde rüzgâr hızı u_s = **5 m/s** · kararlılık sınıfı **D (nötr)** · arazi **kırsal** · bakılan nokta x = **2.000 m**, merkez hattı (y = 0), yer seviyesi (z = 0).

TABLO 1.8

Adım	Soru	Hesap	Sonuç
1	Duman ne kadar güçlü itiliyor?	$F_b = g \cdot v_s \cdot d_s^2 \cdot \Delta T / (4T_s) = 9{,}81 \times 15 \times 3{,}0^2 \times 107 / (4 \times 400)$	**88,57 m^4/s^3**
2	Yükselmeyi ısı mı itiyor, çıkış hızı mı?	$(\Delta T)_c = 0{,}00575 \cdot T_s \cdot v_s^{2/3} / d_s^{1/3} = 9{,}70$ K; gerçek ΔT = 107 K	**Isı belirleyici**
3	Duman ne kadar yükseliyor?	$\Delta h = 38{,}71 \cdot F_b^{3/5} / u = 38{,}71 \times 14{,}74 / 5$	**Δh = 114,1 m; H = 214,1 m**
4	Yükselme nerede tamamlanıyor?	$x_f = 119 \cdot F_b^{2/5} = 119 \times 6{,}011$	**715 m, bakılan noktadan önce**
5	2 km'de duman ne kadar yayılmış?	$\sigma_y = 0{,}08x(1 + 0{,}0001x)^{-1/2}$; $\sigma_z = 0{,}06x(1 + 0{,}0015x)^{-1/2}$	**σ_y = 146,1 m; σ_z = 60,0 m**
6	2 km'de yere ne kadar SO_2 iniyor?	$C = Q / (\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z) \cdot \exp(-H^2 / 2\sigma_z^2)$	**1,25 µg/m^3**
7	En yüksek katkı nerede?	C(x) eğrisinin tepesi; $\sigma_z = H/\sqrt{2}$ kısayolu 10,2 km verir	**27,6 µg/m^3, yaklaşık 8,5 km**
8	WHO değeriyle kıyaslanır mı?	Bir saatten 24 saate (Turner): × $(1/24)^{0{,}17} \approx 0{,}58$	**≈ 16,0 µg/m^3, yalnız büyüklük mertebesi**
9	Hava kararlıysa (F, 2 m/s)?	Δh = 87,3 m; σ_z = 20,0 m; $\exp(-43{,}9) \approx 10^{-19}$	**2 km'de pratikte sıfır**

Yedinci adım bir not ister. Ders kitaplarındaki kısayol, yükseltilmiş bir kaynakta yer seviyesi tepesinin $\sigma_z = H / \sqrt{2}$ koşulunda oluştuğunu söyler ve bu örnekte tepeyi **10,2 km**'ye koyar. Kısayol, yatay ve düşey yayılmanın oranının mesafeyle değişmediğini varsayar. Kırsal nötr havada düşey yayılma uzak mesafede yavaşladığı için eğrinin gerçek tepesi daha yakında, yaklaşık **8,5 km**'de oluşur. Değer neredeyse aynıdır (27,0 ile 27,6 µg/m^3), ama bir uyum çalışmasında etkilenen yerleşimi belirleyen şey değerden çok konumdur.

Hesabın üç dersi

1. **En yüksek katkı bacanın dibinde değil, kilometrelerce ötededir.** Bacayı yükseltmek yakın çevreyi korur ama katkıyı yok etmez, uzağa taşır.

2. **Model çıktısı yaklaşık bir saatliktir.** WHO'nun 24 saatlik SO_2 kılavuz değeriyle (40 µg/m³) doğrudan kıyaslanmaz. Turner'ın ortalama süresi düzeltmesindeki üs ampiriktir ve tartışmalıdır (yaklaşık 0,17 ile 0,20 arası); dönüşüm tek başına bir uyum kararına dayanak yapılamaz, yalnız büyüklük mertebesi verir.
3. **Kararlılık her şeyi değiştirir.** Kararlı havada duman hem daha az yükselir (H = 187,3 m) hem çok daha az yayılır; yakın çevre temiz görünür, ama kirletici seyrelmeden çok uzağa taşınır.

Üçüncü dersin davranıştaki karşılığı, bir sonraki alt başlıkta göreceğimiz **fanning** duman izidir; sabah inversiyon çözüldüğünde aynı iz **fumigation** ile toptan yere inebilir.

Duman İzi Biçimleri ve Modelleme Araçlarına Giriş (AERMOD, CALPUFF)

Kararlılık sınıfları soyut değildir; bir bacanın dumanına bakarak hangi sınıfta olunduğu çoğu zaman anlaşılır. Duman izi biçimleri, teoriyi saha gözlemine bağlayan köprüdür.

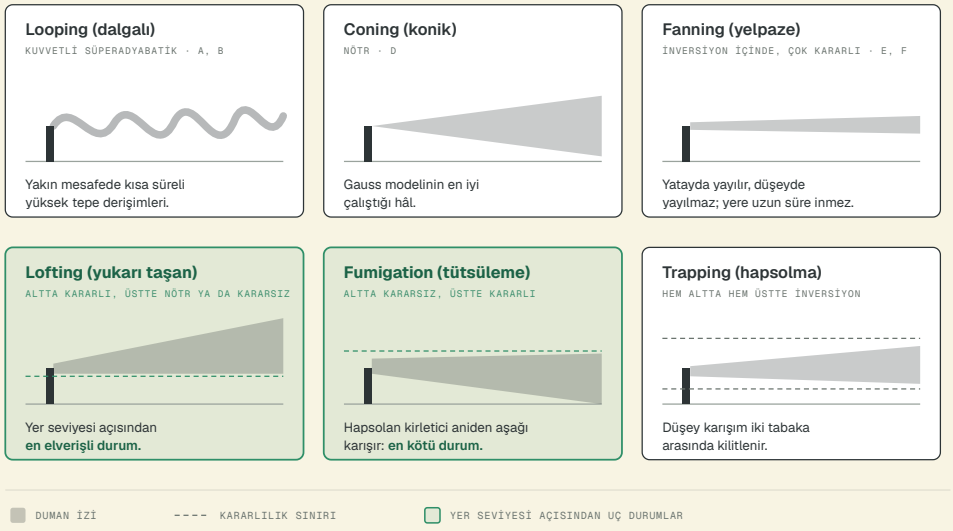
TABLO 1.9

Duman izi biçimi	Kararlılık koşulu	Yer seviyesi sonucu
Looping (dalgalı)	Kuvvetli süperadyabatik (A, B)	Yakın mesafede kısa süreli yüksek tepe derişimleri
Coning (konik)	Nötr (D)	Gauss modelinin en iyi çalıştığı hâl
Fanning (yelpaze)	İnversiyon içinde, çok kararlı (E, F)	Yatayda yayılır, düşeyde yayılmaz; yer seviyesine uzun süre inmez
Lofting (yukarı taşan)	Altta kararlı, üstte nötr ya da kararsız	Yer seviyesi açısından **en elverişli** durum
Fumigation (tütsüleme)	Altta kararsız, üstte kararlı (sabah inversiyon çözülmesi)	Yer seviyesi açısından **en kötü** durum: hapsolan kirletici aniden aşağı karışır
Trapping (hapsolma)	Hem altta hem üstte inversiyon	Düşey karışım iki tabaka arasında kilitlenir

ŞEKİL 1.7

Duman İzi Biçimleri ve Atmosferik Kararlılık

Bir bacanın dumanına bakarak hangi kararlılık sınıfında olunduğu çoğu zaman anlaşılır. Teoriyi saha gözlemine bağlayan köprü budur.



Şemalar düşey kesittir ve ölçekli değildir. Fanning'de duman izi yatayda genişlemeyi sürdürür, düşey kesitte ince görünmesinin nedeni budur. Fumigation tipik olarak sabah inversiyonu çözülürken oluşur: gece boyunca yükseklikte biriken kirletici, yüzeyden gelen ısınmayla aniden yer seviyesine karışır.

Gauss modelinin ne yapabildiği kadar **ne yapamadığı** da bilinmelidir. Model şunları varsayar: kararlı hâl (steady state), sabit ve tek yönlü rüzgâr, düz arazi, kimyasal olarak tepkimesiz kirletici, yatay ve düşey derişim profillerinin normal dağılımlı olması, yerden tam yansıma. Bu varsayımların doğrudan sonucu şudur: model **ikincil kirleticiler için uygun değildir**. Bir ozon ya da ikincil aerosol hesabı Gauss modeliyle yapılmaz; kimyasal kayıp ancak birinci mertebe bir sönüm terimiyle (exp(−k′t) çarpanı) kabaca temsil edilebilir. Ayrıca model karmaşık arazide, çok düşük rüzgârda ve uzun mesafede belirgin hata verir.

Bu sınırlar, düzenleyici modellerin neden geliştiğini açıklar. **AERMOD**, ABD Çevre Koruma Ajansı'nın tercih edilen düzenleyici modelidir[15]; temelde kararlı hâl Gauss duman izi modelidir, ama sınır tabakası ölçeklendirmesi (Monin-Obukhov uzunluğu, sürtünme hızı, konvektif hız ölçeği) kullanır ve kararsız koşullarda düşey dağılım için Gauss olmayan, **iki tepeli bir yoğunluk fonksiyonu** uygular. Uygulama ölçeği **50 kilometreye kadardır**.

15. Kaynak: epa.gov

CALPUFF ise kararlı olmayan (non-steady-state) bir **Lagrangian puff modelidir**: zaman ve konumla değişen meteorolojide kirletici paketlerini izler, bu yüzden saatlik değişen meteoroloji, sakin rüzgâr, karmaşık arazi ve uzun menzilli taşınım için kullanılır. Yaygın bir yanlış bilgiyi düzeltmek gerekir: CALPUFF bugün "EPA'nın uzun menzil modeli" değildir. **2017 tarihli Appendix W revizyonuyla tercih edilen model listesinden çıkarılmış**, 50 kilometrenin ötesindeki uzun menzilli taşınım değerlendirmeleri için bir **tarama (screening) tekniği** olarak korunmuştur; 50 kilometreyi aşan kümülatif etki analizlerinde model seçimi yetkili idarenin onayına bağlıdır.

KİLİT MESAJ

Yer seviyesindeki derişim, bacadan çıkan kütlenin değil, o kütlenin bölüneceği hava hacminin sonucudur. Kararlılık sınıfı ile karışım yüksekliği o hacmi belirler; efektif baca yüksekliği ise kütlenin nereye bırakılacağını. Bu üç değişken bilinmeden hiçbir emisyon değeri sağlık etkisine çevrilemez.

1.4 Hava Kirliliği Sağlığı ve Ekosistemi Nasıl Etkiler?

Buraya kadar hava kirliliğini oluşturan maddelerin ne olduğunu, atmosferde neye dönüştüklerini ve nasıl dağıldıklarını kurduk. Geriye zincirin son halkası kalıyor: solunan derişim, hangi mekanizmayla ve ne ölçüde zarara dönüşüyor. Bu bölüm serinin **sağlık ve ekosistem etkilerinin tek kanonik yeridir**; sonraki kaynak bölümleri bu tanımları tekrarlamayacak, yalnızca kendi kaynaklarına özgü kirletici profilini verecektir.

Maruziyet, Doz ve Doz-Yanıt İlişkisi

Hava kirliliğinin sağlık etkisi anlatılırken üç kavram sık sık birbirinin yerine kullanılır, oysa üçü farklı şeydir ve karıştırıldığında sağlık tahminleri yanlış okunur.

Derişim (C), havadaki kirletici miktarıdır (µg/m^3). **Maruziyet (E)**, kişinin o derişimle temas ettiği süre boyunca derişimin zaman integralidir (µg·saat/m^3): aynı derişimde iki kat uzun süre kalmak, iki kat maruziyet demektir. **Doz** ise vücuda gerçekten giren ve hedef organa ulaşan miktardır; solunum hacmi, çökelme fraksiyonu ve temizlenme hızıyla belirlenir. Aynı derişimde koşan bir kişinin dozu, oturan bir kişininkinden belirgin biçimde yüksektir.

Bu ayrımın pratik sonucu şudur: epidemiyolojik çalışmalar pratikte **maruziyeti** ölçer, toksikolojik çalışmalar **dozu** ölçer. Hava kalitesi kılavuz değerleri epidemiyolojiye, yani maruziyet tarafına dayanır. Dolayısıyla bir kılavuz değer, "bu derişimde şu doz alınır" demez; "bu derişime uzun süre maruz kalan bir nüfusta şu kadar fazladan risk gözlenir" der.

Riskin derişimle nasıl değiştiği, epidemiyolojide standart olarak **log-lineer** bir fonksiyonla ifade edilir.

DENKLEM 1.4 · DOZ-YANIT · LOG-LİNEER GÖRELİ RİSK İFADESİ

$$RR(C) = \exp[\,\beta \cdot (C - C_0)\,] \tag{1.4}$$

YAYIMLANAN GÖRELİ RİSKTEN KATSAYIYA GEÇİŞ

$$\beta = \frac{\ln(RR_{10})}{10}$$

BURADA

- RR göreli risk (birimsiz)
- C maruz kalınan derişim (µg/m³)
- RR_{10} 10 µg/m³ artış başına yayımlanan göreli risk (PM2.5 için WHO 2021 derlemesinde 1,08; 2024 güncellemesinde 1,095)
- β derişim-yanıt katsayısı ((µg/m³)$^{-1}$)
- C_0 karşıolgusal referans derişim (µg/m³)

Manşetlerdeki "her 10 µg/m³ artışta risk şu kadar artıyor" cümlesinin matematiksel karşılığı budur. Atfedilebilir fraksiyon AF = (RR − 1) / RR ile, atfedilen vaka sayısı ise AF × temel ölüm sayısı ile bulunur.

Bu dönüşüm, "her 10 µg/m³ artışta risk şu kadar artıyor" cümlesinin matematiksel karşılığıdır ve manşetlerdeki sayıların üretim yoludur. WHO 2021 kılavuzunun PM2.5 tavsiyesinin dayandığı meta-analizde, uzun dönem maruziyette her 10 µg/m³ artış için doğal nedenli ölüm göreli riski **RR = 1,08 (%95 güven aralığı 1,06 ile 1,09)** bulunmuştur; sistematik derleme 2018 sonuna kadar yayımlanmış **107 çalışmayı** kapsar. Aynı derlemenin 2024 tarihli güncellemesi[16], 60'ı yeni olmak üzere **106 çalışmayla** bu değeri **1,095 (1,064 ile 1,127)** olarak vermiştir. İki sayı da doğrudur, farklı derleme turlarına aittir ve bu seride hangisi kullanılıyorsa **yılıyla birlikte** yazılır: WHO 2021 kılavuzunun resmî dayanağı **1,08**'dir, **1,095** ise 2024 güncellemesinin değeridir.

2024 güncellemesi ayrıca nedene özgü göreli riskleri de verir ve tablo, hava kirliliğinin neden bir "akciğer hastalığı" meselesinden ibaret olmadığını gösterir. Her değer PM2.5'te **10 µg/m³ artış başınadır**:

16. Kaynak: pmc.ncbi.nlm.nih.gov

TABLO 1.10

Sonlanım noktası	Çalışma sayısı	Göreli risk (%95 GA)
Tüm nedenler	53	**1,095** (1,064 ile 1,127)
Dolaşım sistemi	42	1,127 (1,102 ile 1,152)
İskemik kalp hastalığı	34	1,143 (1,102 ile 1,186)
Serebrovasküler (inme)	28	1,146 (1,101 ile 1,192)
Solunum sistemi	28	1,136 (1,079 ile 1,197)
KOAH	19	1,138 (1,080 ile 1,198)
Akciğer kanseri	26	1,093 (1,053 ile 1,135)
Akut alt solunum yolu enfeksiyonu	12	1,204 (1,095 ile 1,325)

Dikkat edilmesi gereken nokta, **dolaşım sistemi risklerinin solunum sistemi risklerıyle aynı büyüklükte, hatta bazılarında daha yüksek olmasıdır**. PM10 için aynı derleme tüm nedenler göreli riskini **1,081 (1,052 ile 1,110)** verir ve incelenen tüm maruziyet ile sonlanım çiftleri arasında istatistiksel olarak anlamlı olmayan **tek istisna** PM10 ile serebrovasküler ölümlülüktür (1,049; 0,973 ile 1,131).

Son bir yöntem notu: log-lineer biçim öğretici çekirdektir, ancak güncel kurumsal tahminler (özellikle Küresel Hastalık Yükü çalışmasının son turları) nedene özgü riskleri log-lineer bir fonksiyonla değil, **spline tabanlı meta-regresyon eğrileriyle** türetir. İki yaklaşım aynı sayıyı vermez ve bu, farklı kurumların farklı ölüm tahminleri yayımlamasının nedenlerinden biridir.

Eşiksiz Etki Tartışması: "Güvenli Seviye" Var mı?

Hava kirliliği politikasının en tartışmalı sorusu budur ve mevcut kanıt net bir yönde durmaktadır: **bir eşik bulunamamıştır.**

WHO 2021 kılavuzunun dayandığı 2020 tarihli sistematik derleme, düşük derişim aralıklarında (ortalama PM2.5 derişimi 25, 20, 15, 12 ve 10 µg/m³'ün altında olan çalışma alt kümelerinde) yapılan meta-analizlerin, genel göreli riske **benzer ya da ondan daha yüksek** riskler verdiğini bulmuştur. Bu sonuç, bireysel kohort çalışmalarında gözlenen **doğrusal ya da süperdoğrusal** derişim-yanıt eğrileriyle tutarlıdır. Süperdoğrusal olmak şu demektir: birim derişim artışının etkisi, düşük derişimlerde daha büyüktür. Yani temiz havayı biraz daha temiz yapmak, kirli havayı aynı miktarda temizlemekten daha çok can kurtarabilir.

Bu bulgunun politika karşılığı doğrudandır: **"sınır değerin altındayız" savunması, sağlık açısından bir güvence değildir.** Azaltım her düzeyde fayda üretir ve yasal

uygunluk ile sağlık koruması iki ayrı ölçüdür. Avrupa verisi bu ayrımı çıplak biçimde gösterir: Avrupa Çevre Ajansı'nın 2025 hava kalitesi durum raporuna[17] göre 2023'te izleme istasyonlarının **%99'u** AB'nin yasal yıllık PM2.5 sınır değerini sağlamış, aynı istasyonların **%92'si** Dünya Sağlık Örgütü'nün 5 µg/m³'lük kılavuz değerini aşmıştır. Aynı yıl AB kentsel nüfusunun **%94'ü**, PM2.5 derişiminin WHO kılavuz düzeyinin üzerinde olduğu havayı solumuştur. İki sayı arasında bir çelişki yoktur; ikisi farklı eşikleri ölçer ve aradaki boşluk, tam olarak bu serinin ikinci bölümünün konusudur.

Kanıtın ağırlığına ilişkin resmî değerlendirme de nettir: Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı, dış ortam hava kirliliğini ve ondaki partikül maddeyi **Grup 1, insan için kanserojen** olarak sınıflandırmıştır. Kanıt tabanı ayrıca genişlemektedir: **demans**, 2024-2025 döneminde hava kirliliğinin sonlanım noktaları listesine giren yeni bir başlıktır ve Lancet Komisyonu'nun 2024 tarihli raporu hava kirliliğini **14 değiştirilebilir demans risk faktöründen biri** olarak listelemiştir. Siyah karbon için kısa dönem maruziyet ile solunum ve kardiyovasküler sağlık arasındaki ilişkide kanıt gücü **yüksek**, ultra ince partikül için ise literatürün sınırlılığı nedeniyle esas olarak kısa dönem maruziyet ve kardiyovasküler sağlıkla sınırlı ve **orta** düzeydedir.

Erken Ölüm ve Hastalık Yükü (DALY) Tahminleri Nasıl Kurulur?

"Hava kirliliği yılda şu kadar kişiyi öldürüyor" biçimindeki cümlelerdeki sayı bir ölüm sayımı değil, bir **hesaptır**. Hesabın iskeletini görmek, hem sayıya güvenmek hem de sınırlarını bilmek için gereklidir.

Zincirin merkezinde **atfedilebilir fraksiyon (AF, nüfus ölçeğinde PAF)** vardır: nüfusun maruziyeti karşıolgusal düzeye indirilseydi, hastalık yükünün ne kadarının ortadan kalkacağını gösteren orandır.

Tek maruziyet düzeyi için: $AF = (RR - 1) / RR$

Nüfus dağılımlı hâli: $PAF = [\Sigma p_i \cdot (RR_i - 1)] / [1 + \Sigma p_i \cdot (RR_i - 1)]$

Atfedilen ölüm = PAF × temel (baseline) ölüm sayısı

Hastalık yükünün tek ortak para birimi ise **DALY**'dir (disability-adjusted life year, engelliliğe ayarlanmış yaşam yılı) ve iki bileşenin toplamıdır:

DALY = YLL + YLD
YLL (kaybedilen yaşam yılları) = erken ölüm sayısı × ölüm yaşındaki standart beklenen kalan yaşam süresi
YLD (engellilikle yaşanan yıllar) = vaka sayısı × hastalık süresi × engellilik ağırlığı (0 ile 1 arası)

17. Kaynak: eea.europa.eu

1 DALY, kaybedilen bir sağlıklı yaşam yılıdır. Engellilik ağırlığı 0 (tam sağlık) ile 1 (ölüme eşdeğer) arasında bir sayıdır ve hastalık başına türetilir.

Zinciri temsilî bir kentte uçtan uca çalıştıralım. **Girdiler:** nüfus **1.000.000** · yıllık ortalama PM2.5 **25 µg/m³** · karşıolgusal düzey C_0 = **5 µg/m³** (WHO 2021 kılavuz değeri) · doğal nedenli ölümler için RR_{10} = **1,08** · temel kaba ölüm hızı binde **6**, yani **6.000 ölüm/yıl**. Temel ölüm hızı burada yer tutucudur; gerçek bir uygulamada TÜİK ölüm istatistiğinden alınmalıdır.

Adım 1. $\beta = \ln(1{,}08) / 10 =$ **0,0076961 (µg/m³)⁻¹ Adım 2.** $\Delta C = 25 - 5 = 20$ µg/m³, $RR = \exp(0{,}0076961 \times 20) = \exp(0{,}15392) =$ **1,1664 Adım 3.** $AF = (1{,}1664 - 1) / 1{,}1664 = 0{,}1427$, yani **%14,3 Adım 4.** Atfedilen ölüm = 0,1427 × 6.000 = **yaklaşık 856 ölüm/yıl**

Asıl öğretici kısım duyarlılık sınamasıdır. Aynı kentte yalnız **göreli risk seçimi** değiştirilip 2024 güncellemesinin değeri (RR_{10} = 1,095) kullanılsaydı, atfedilebilir fraksiyon **%16,6**'ya, atfedilen ölüm **yaklaşık 996**'ya çıkardı: tek bir meta-analiz turu farkı sonucu **%16 artırıyor**. Yalnız **karşıolgusal düzey** değiştirilip C_0 = 2,4 µg/m³ alınsaydı (GBD'nin teorik minimum risk maruziyet düzeyi dağılımının alt ucu), sonuç **%16,0** ve **yaklaşık 958 ölüm** olurdu: yalnız referans noktasını değiştirmek sonucu **%12 artırıyor**.

Karşıolgusal düzeyin neden sıfır olmadığı da açıklanmalıdır. Küresel Hastalık Yükü çalışması PM2.5 için bu düzeyi tek bir sayı değil, **bir dağılım** olarak alır: Kuzey Amerika kohort çalışmalarındaki ortam PM2.5 derişimlerinin ortalaması (**5,9 µg/m³**) ile beşinci persentili (**2,4 µg/m³**) arasında düzgün dağılım. Gerekçe basittir: epidemiyolojik kanıt, gözlemlenen derişim aralığının altına ekstrapolasyonu desteklemez. Yani bu düzey **kanıtın bittiği yerdir, zararsız düzey değildir.**

Bu üç seçim (hangi göreli risk, hangi karşıolgusal düzey, hangi temel ölüm verisi) birlikte, farklı kurumların aynı olgu için neden farklı sayılar verdiğini açıklar.

Küresel ölçekte Dünya Sağlık Örgütü, dış ortam hava kirliliğinin 2019'da dünya genelinde yılda yaklaşık **4,2 milyon erken ölüme** yol açtığını tahmin etmektedir. Sağlık Etkileri Enstitüsü ile IHME'nin State of Global Air 2024[18] raporu ise 2021 için, hem ortam havası hem hane içi kirliliği kapsayacak biçimde **8,1 milyon ölüm** bildirir ve hava kirliliğini yüksek tansiyondan sonra **ikinci sıradaki ölüm risk faktörü** olarak konumlandırır. Aynı raporda bu ölümlerin yaklaşık **%90'ı** bulaşıcı olmayan hastalıklardır (kalp hastalığı, inme, diyabet, akciğer kanseri, KOAH) ve 5 yaş altı çocuklarda **700 binin üzerinde** ölüm hava kirliliğiyle ilişkilendirilmiştir, bu da o yaş grubundaki tüm küresel ölümlerin **%15'idir**. İki sayının karıştırılmaması gerekir: 4,2 milyon yalnız dış ortam havasına, 8,1 milyon dış ortam ile hane içi kirliliğin toplamına aittir.

18. Kaynak: stateofglobalair.org

Avrupa ölçeğinde Avrupa Çevre Ajansı'nın 2025 tarihli hastalık yükü raporu 2023 referans yılıyla şu tabloyu verir: PM2.5'e atfedilen erken ölüm AB-27'de **182.000** (40 ülke ölçeğinde 206.000), ozona atfedilen **63.000** (41 ülke ölçeğinde 71.000), NO_2'ye atfedilen **34.000** (56.000). Rapor karşıolgusal değer olarak WHO 2021 kılavuz değerlerini alır. Olumlu bir gelişme de aynı raporda kayıtlıdır: PM2.5'e atfedilen erken ölümler AB'de **2005 ile 2023 arasında %57 azalmıştır**, yani Sıfır Kirlilik Eylem Planı'nın 2030 için koyduğu %55'lik azaltım hedefi yedi yıl önce tutturulmuştur. Bu tablonun ayrıntısını ve kaynak kırılımını daha önce Avrupa'da hava kirliliğine bağlı erken ölümler[19] başlıklı yazımızda ele almıştık.

> **UZMAN NOTU**
>
> Erken ölüm sayısı tek başına okunduğunda etkinin ağırlığını eksik gösterir. Avrupa Çevre Ajansı aynı yıl için AB-27'de PM2.5'e atfedilen **182.000 ölümün** yanında **1.914.000 kaybedilen yaşam yılı (YLL)** bildirir; ikisinin oranı, ölüm başına ortalama **10 yılı aşan** bir yaşam kaybına işaret eder. Ozonda tablo farklıdır (63.000 ölüme karşı 655.000 YLL, yani ölüm başına yaklaşık 10 yıl), NO_2'de ise 34.000 ölüme karşı 351.000 YLL. Hastalık yükü tartışmasında **DALY ve YLL, ölüm sayısından daha bilgilendiricidir**, çünkü etkinin hangi yaş grubunda yoğunlaştığını da taşır.

Türkiye ölçeğinde en güncel hakemli tahmin, WHO AirQ+ aracıyla ve RR_{10} = 1,08 ile yapılan bir çalışmadan gelir: 2022 yılı için PM2.5'e atfedilen erken ölüm (30 yaş üstü) **68.440**, bu da tüm doğal sebepli ölümlerin **%14,2'sine** karşılık gelir; çalışmanın hesapladığı nüfus ağırlıklı ulusal ortalama PM2.5 derişimi **27,0 µg/m³**, yani WHO 2021 kılavuz değerinin **5,4 katıdır**. Temiz Hava Hakkı Platformu'nun aynı yöntemi izleyen derlemeleri 2023 için **63.851**, 2024 için **62.644** ölüm bildirir. İki uyarı zorunludur. Birincisi, bu çalışmalarda PM2.5 ölçümü bulunmayan yerlerde PM10'dan **0,67 dönüşüm katsayısıyla** türetme yapılmıştır; katsayı sabit değildir ve ısınma ağırlıklı bir ilde (ince fraksiyon baskın) ile toz ağırlıklı bir ilde (kaba fraksiyon baskın) farklıdır, yani sonuç ölçülen değil **tahmin edilen** yüktür. İkincisi, bir başka hakemli çalışma 2019-2023 dönemi için yıllık ortalama **85.344** erken ölüm bildirmektedir; iki tahmin arasındaki **%25'lik** fark, farklı derişim veri kaynağından, yaş eşiğinden ve karşıolgusal senaryodan gelmektedir. Tek bir rakam verilecekse yılı ve yöntemi birlikte yazılmalı, aralık verilecekse yaklaşık **63 bin ile 85 bin** bandı kullanılmalıdır.

WHO 2021 Kılavuz Değerleri ve Ara Hedefler

Hava kirliliğine ilişkin tüm bu kanıt tabanının politika karşılığı, Dünya Sağlık Örgütü'nün 2021'de yayımladığı Küresel Hava Kalitesi Kılavuzu'dur. Kılavuz altı kirletici için hem bir **kılavuz değer (AQG)** hem de ona giden yolda **ara hedefler (interim targets)** tanımlar.

19. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/avrupada-hava-kirliligine-bagli-erken-olumler-hala-cok-yuksek

TABLO 1.11

Kirletici	Ortalama süresi	Ara hedef 1	Ara hedef 2	Ara hedef 3	Ara hedef 4	Kılavuz değer
PM2.5, µg/m³	Yıllık	35	25	15	10	**5**
PM2.5, µg/m³	24 saatlik	75	50	37,5	25	**15**
PM10, µg/m³	Yıllık	70	50	30	20	**15**
PM10, µg/m³	24 saatlik	150	100	75	50	**45**
O_3, µg/m³	Zirve sezon	100	70	yok	yok	**60**
O_3, µg/m³	8 saatlik	160	120	yok	yok	**100**
NO_2, µg/m³	Yıllık	40	30	20	yok	**10**
NO_2, µg/m³	24 saatlik	120	50	yok	yok	**25**
SO_2, µg/m³	24 saatlik	125	50	yok	yok	**40**
CO, mg/m³	24 saatlik	7	yok	yok	yok	**4**

Tablonun iki dipnotu atlanmamalıdır. Kısa süreli değerler **99. persentil** olarak tanımlıdır, yani yılda 3 ile 4 aşıma izin verir. **Zirve sezon** ozon göstergesi ise günlük maksimum 8 saatlik ortalamaların, en yüksek ardışık altı aylık dönemdeki ortalamasıdır. 2021'de ilk kez tanımlanan göstergeler şunlardır: zirve sezon ozon, 24 saatlik NO_2 ve 24 saatlik CO. Ayrıca 2021'de yeniden değerlendirilmemiş ama geçerliliğini koruyan kısa süreli değerler de vardır: NO_2 için 1 saatlik **200 µg/m³**, SO_2 için 10 dakikalık **500 µg/m³**, CO için 8 saatlik **10 mg/m³**, 1 saatlik **35 mg/m³** ve 15 dakikalık **100 mg/m³**.

Ara hedef, bir izin değil bir geçiş basamağıdır. Mevcut derişimleri kılavuz düzeyinin çok üstünde olan ülkeler için basamaklı bir politika merdiveni işlevi görür ve her basamak ölçülebilir bir sağlık kazancına karşılık gelir. WHO'nun kendi hesabına göre yalnızca PM2.5 için **ara hedef 1'e (yıllık 35 µg/m³)** ulaşılması bile dünya genelinde yılda yaklaşık **300.000 ölümü** önleyecektir.

2021 güncellemesinin ne kadar sert olduğunu, 2005 değerleriyle karşılaştırma gösterir.

TABLO 1.12

Kirletici	Ortalama süresi	2005 kılavuz değeri	2021 kılavuz değeri	Değişim
PM2.5, µg/m³	Yıllık	10	5	%50 düşüş
PM2.5, µg/m³	24 saatlik	25	15	%40 düşüş
PM10, µg/m³	Yıllık	20	15	%25 düşüş
PM10, µg/m³	24 saatlik	50	45	%10 düşüş
O_3, µg/m³	Zirve sezon	yok	60	yeni gösterge
O_3, µg/m³	8 saatlik	100	100	değişmedi
NO_2, µg/m³	Yıllık	40	10	%75 düşüş
NO_2, µg/m³	24 saatlik	yok	25	yeni gösterge
SO_2, µg/m³	24 saatlik	20	40	iki katına çıktı
CO, mg/m³	24 saatlik	yok	4	yeni gösterge

Üç gerekçe tabloyu okunur kılar. Birincisi, PM2.5 yıllık değerinin 10'dan 5'e inmesi, esas olarak **10 µg/m³'ün altındaki derişimlerde de ölümlülük etkisi gösteren** yeni kanıtlardan gelmektedir. İkincisi, PM2.5 24 saatlik değerinin 25'ten 15'e inmesinin teknik sebebi bir oran güncellemesidir: 2005'te 99. persentil ile yıllık ortalama arasında **2,5** oranı varsayılmışken, 2021'de bu oran ampirik veriyle **3'e** çekilmiştir. Üçüncüsü, WHO kendi metninde ortaya çıkan PM10 yıllık kılavuz değerinin pratikteki çoğu durumda PM2.5 yıllık değerinden **daha az koruyucu** olduğunu açıkça kabul etmektedir.

Bir tek satır özel açıklama gerektirir: **SO_2'nin 24 saatlik kılavuz değeri 20'den 40 µg/m³'e yükselmiştir.** Bu bir gevşetme değil, bir yöntem değişikliğidir: 2021 değeri 99. persentil olarak tanımlanmıştır ve sağlık kanıtının belirsizlik derecesi yeniden değerlendirilmiştir. Bu açıklama yapılmadan tablo basıldığında okur, örgütün kükürt dioksitte geri adım attığı sonucuna varır.

Son ve en kritik sınır: **bu tablo bir kılavuz değerdir, yasal sınır değer değildir.** Hiçbir ülkeyi hukuken bağlamaz; ulusal sınır değerler ayrı mevzuatla belirlenir ve çoğu ülkede kılavuz değerin belirgin üstündedir. Türkiye'nin Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'ndeki sınır değerler, AB'nin 2024'te yenilenen Hava Kalitesi Direktifi'yle karşılaştırması ve geçiş takvimi serinin **ikinci bölümünde** tam tabloyla verilecektir.

Asit Çökelmesi, Ötrofikasyon ve Kritik Yük

Hava kirliliğinin etkisi solunan havayla sınırlı değildir; aynı kirleticiler yüzeye inerek ekosistemleri de değiştirir. Atmosferde oluşan asitler ve azot bileşikleri, yüzeye inerek toprağı, suyu ve bitki örtüsünü değiştirir.

Asit çökelmesinin kimyası bu bölümde kurduğumuz dönüşümlerin doğrudan devamıdır: SO_2 sülfürik aside (H_2SO_4), NO_x nitrik aside (HNO_3) oksitlenir. Çökelme iki biçimde olur: **ıslak çökelme** yağmur, kar ve sisle; **kuru çökelme** ise gaz (SO_2, HNO_3, NH_3) ve partikül hâlinde doğrudan yüzeye tutunmayla.

Yaygın bir yanlış burada düzeltilmelidir: **temiz yağmurun pH'ı 7 değildir.** Atmosferik karbondioksitle dengede olan saf suyun pH'ı, karbonik asit dengesi nedeniyle **yaklaşık 5,6**'dır. Bu yüzden "asit yağmuru" eşiği nötr pH değil, **pH 5,6'nın altıdır**; kirlenmiş bölgelerde ölçülen yağış pH'ı 4,0 ile 4,5'e kadar inebilir. 5,6 değeri atmosferik karbondioksit derişimine bağlıdır ve artan karbondioksitle hafifçe düşer, bu yüzden "yaklaşık" kaydıyla kullanılmalıdır.

Amonyak bu tabloda **çift rollüdür** ve bu, tarımın çevresel etkisinin neden karmaşık olduğunu açıklar: havada asidi nötralize eder (amonyum tuzları oluşturur), ama toprakta nitrifikasyonla **asitleştirici** etki gösterir. Bu yüzden amonyum çökelmesi hem ötrofikasyon hem asitleşme hesabına girer.

Ekosistem tarafında kilit kavram **kritik yüktür**: bugünkü bilgiye göre duyarlı ekosistem bileşenlerinde belirgin zararlı etki oluşturmayan en yüksek çökelme miktarı (UNECE Uzun Menzilli Sınırötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi'nin tanımı). Birimi **eq/(ha·yıl)**, yani hektar başına yıllık **yük eşdeğeridir**. Kütle (kg/ha·yıl) yerine yük eşdeğeri kullanılmasının nedeni teknik ve zariftir: kükürt ile azotun atom ağırlıkları farklıdır ve asitleştirici etkileri ancak eşdeğer bazda toplanabilir. Gerçek çökelmenin kritik yükü aştığı miktara **aşım (exceedance)** denir ve kritik yükler **kararlı hâl kütle dengesi** modeliyle belirlenir: model, ekosistemde doğal olarak bulunan katyon akısının, çökelmeyle eklenen anyonları ne kadar dengeleyebildiğini hesaplar.

Ötrofikasyon tarafında yaklaşım ampiriktir. Azot çökelmesi doğal ve yarı doğal ekosistemlerde besin dengesini bozar: azot seven türler baskın hâle gelir, tür çeşitliliği düşer. **Ampirik kritik yükler** habitat başına bir aralık olarak, **kg N/(ha·yıl)** biriminde verilir; örnek bir habitat aralığı **5 ile 10 kg N/(ha·yıl)**'dır. Aralıklar 2011'de belirlenmiş, 2022'de UNECE himayesinde yeniden gözden geçirilmiştir[20] ve gözden geçirme, etkilerin genellikle verilen aralıkların **alt ucunda** ortaya çıktığını göstermiştir.

20. Kaynak: umweltbundesamt.de

Asit çökelmesi ve azot birikimi, atmosferden gelen kirliliğin toprak kimyasını nasıl değiştirdiğinin en açık örneğidir; konunun toprak tarafını toprak kirliliği[21] başlıklı yazımızda ayrıca ele almıştık.

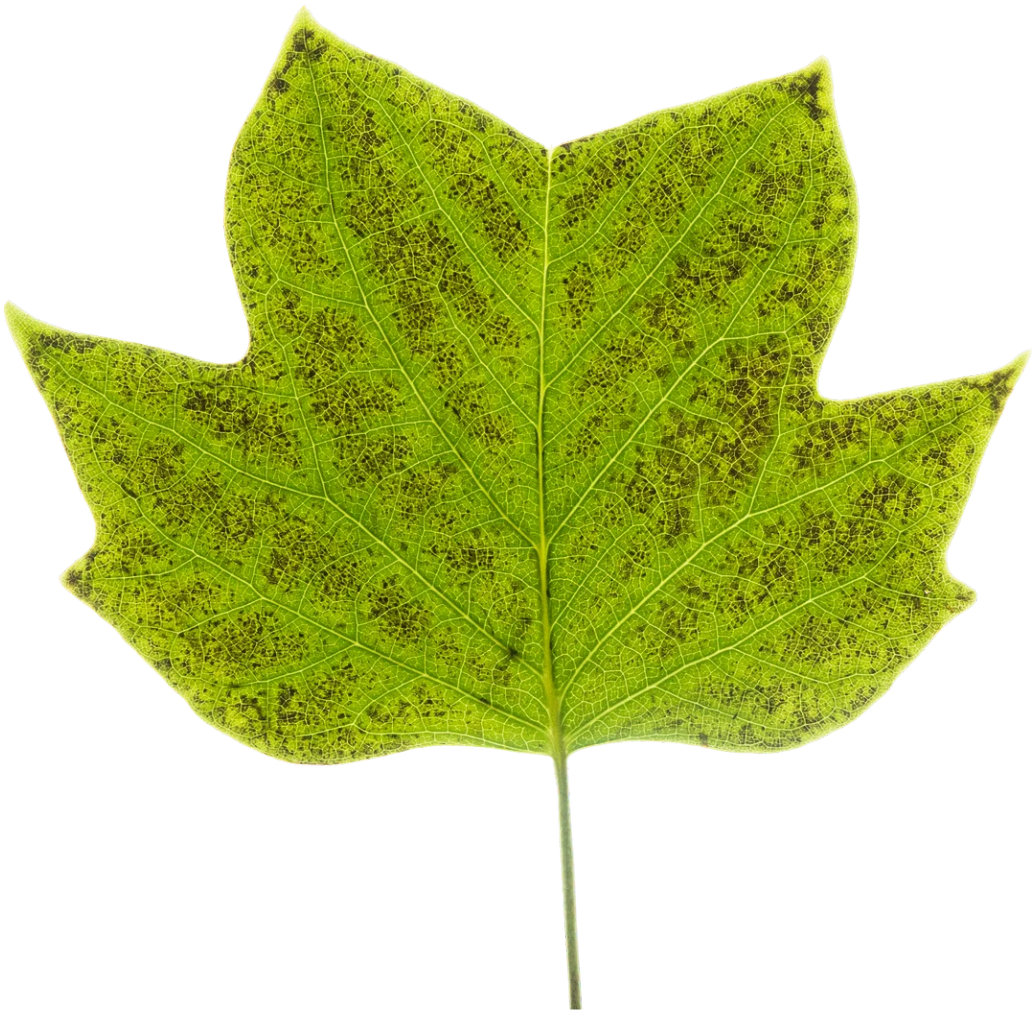
Bitki Hasarı, Verim Kaybı ve Görüş Mesafesi

Ozon, ekosistem üzerindeki etkisi en iyi nicelenen kirleticidir ve bunun iki kuşak göstergesi vardır.

Birinci kuşak gösterge **AOT40**'tır (Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb): saatlik ozon derişimlerinin **80 µg/m³ (yani 40 ppb)** eşiğini aşan kısımlarının toplamıdır ve yalnız her gün **08:00 ile 20:00 arasındaki** saatlik değerler kullanılır. Birimi (µg/m³)·saattir. AB'nin bitki örtüsünü koruma hedef değeri **18.000 (µg/m³)·saat**tir ve 1 Mayıs ile 31 Temmuz dönemi için, **beş yıllık ortalama** üzerinden değerlendirilir. UNECE Hava Sözleşmesi'nin ormanlar için kritik düzeyi ise **10.000 (µg/m³)·saat**tir ve Nisan ile Eylül dönemini kapsar. İki sayı birbirinin yerine kullanılamaz: farklı dönem, farklı amaç, farklı eşik.

AOT40'ın bilinen bir sınırı vardır ve bu sınır ikinci kuşak göstergeyi doğurmuştur: AOT40 yalnız **maruziyeti** ölçer, bitkinin ozonu gerçekte ne kadar **aldığını** ölçmez. Kurak koşullarda bitki stomalarını kapatır, havadaki ozon yüksek olsa bile alım düşük kalır ve hasar beklenenin altında olur. Bu yüzden akı tabanlı **POD** göstergesi (Phytotoxic Ozone Dose, fitotoksik ozon dozu) geliştirilmiştir: birim yaprak alanı başına **stoma yoluyla alınan** ozon akısının, belirli bir eşiği aşan kısmının büyüme sezonu boyunca birikimidir ve mmol O_3/m^2 ile ifade edilir.

21. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/toprak-kirliligi-nedir-nedenleri-etkileri-cozum-yollari



AB ve UNECE çevrelerinde akı tabanlı yöntemlerin ekinler ve orman ağaçları için **en uygun yaklaşım olduğu konusunda uzlaşı vardır**; kritik düzeyler buğday (tane verimi, tane kütlesi, protein verimi), patates (yumru verimi) ve domates (meyve verimi) üzerinden türetilmiştir. POD için tek bir kanonik sayısal eşik birincil kaynaktan doğrulanamamıştır; literatürde tür ve gösterge başına farklı değerler bulunmaktadır, bu yüzden burada sayı verilmemiş, kavram anlatılmıştır.

Hava kirliliğinin son etki başlığı, aynı zamanda en görünür olanıdır: **görüş mesafesi**. Kirli havada ufkun kaybolmasının fiziği, Koschmieder bağıntısıyla verilir:

$L_v = 3{,}912 / b_{ext}$

Burada L_v meteorolojik görüş mesafesi, b_{ext} atmosferik sönüm katsayısıdır. Paydaki **3,912 sayısı uydurma değildir: −ln(0,02)**, yani insan gözünün **%2'lik kontrast eşiği** kabulünden gelir. Sönüm dört bileşenin toplamıdır (gaz saçılımı, gaz soğurması, partikül saçılımı, partikül soğurması) ve kirli havada baskın terim **partikül saçılımıdır**. Bu terime en çok katkıyı **0,1 ile 1 µm çaplı** tanecikler verir, çünkü bu boyut görünür ışığın dalga boyuna (0,4 ile 0,7 µm) yakındır ve saçılım verimi en yüksektir.

Yazının başında gördüğümüz U biçimli çökelme eğrisinin en dibindeki boyut aralığı, tam da burada karşımıza çıkar: akciğerde en az tutulan partikül, görüşü en çok bozan partiküldür.

Bağıl nem bu tabloyu ağırlaştırır: sülfat ve nitrat gibi higroskopik partiküller nem çektikçe büyür ve saçılım kesitleri hızla artar; bu yüzden aynı PM2.5 kütlesinde nemli bir günde görüş çok daha kötüdür. Koschmieder bağıntısının geçerlilik koşulları sıkıdır (atmosferin homojen aydınlatılması, sönüm katsayısının konumla değişmemesi, hedefin ideal siyah olması, gözlemcinin kontrast eşiğinin sabit olması); bağıntı bir yaklaşımdır, kesin bir ölçüm aracı değil.

KİLİT MESAJ

Hava kirliliğinin sağlık etkisi bir eşiğin aşılmasıyla başlamaz, derişimle birlikte sürekli artar; ekosistem etkisi ise bir eşiğe, yani kritik yüke bağlıdır. Bu asimetri, hava kalitesi politikasının neden iki ayrı ölçütle (nüfus maruziyeti ve kritik yük aşımı) çalıştığını açıklar.

1.5 Türkiye'de Hava Kirliliği: Çerçeve ve Kaynakların Manşeti

Buraya kadar kurulan çerçeve evrenseldir: kirletici sınıfları, atmosfer kimyası, dispersiyon ve doz-yanıt ilişkisi her ülkede aynı fizikle çalışır. Bir ülkeden diğerine değişen şey fizik değil, hava kirliliğini üreten emisyonun bileşimi, topografya, yakıt tercihi ve mevzuatın sıkılığıdır. Bu kısa bölüm, serinin geri kalanının Türkiye çıpasını kurar; standartların tam tablosu, izleme ağının teknik anlatımı ve mevzuat çerçevesi ikinci bölümün konusudur.

Türkiye'de Kirliliğin Mevsimsel ve Coğrafi Dokusu

Girişte verilen küresel tablonun Türkiye'deki karşılığı keskindir. Temiz Hava Hakkı Platformu'nun Kara Rapor 2024[22] derlemesine göre, ham verisi Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın kendi izleme ağından gelmek üzere, 2022'de yıl boyunca yeterli veri üreten **225 ölçüm istasyonunun 224'ünde** yıllık PM10 ortalaması Dünya Sağlık Örgütü'nün 2021 kılavuz değeri olan **15 µg/m³**'ün üzerinde ölçülmüştür. İl ölçeğinde sonuç daha da nettir: değerlendirme yapılabilen **53 ilin 53'ünde** aynı eşik aşılmıştır. Tablo bir tahmin değil, ölçümdür.

Türkiye'de hava kirliliğinin haritası, bu bölümde anlattığımız meteorolojik mekanizmaların coğrafyaya uygulanmış hâlidir. En yüksek derişimler, sanayinin en yoğun olduğu illerde değil, **çanak ve vadi topografyasına sahip, kışı sert, ısınma sezonu**

22. Kaynak: temizhavahakki.org

uzun illerde ölçülür. 2022 verisiyle ülkenin en yüksek yıllık PM10 ortalamaları **Hakkâri 110,71 µg/m³**, **Iğdır 109,76 µg/m³** ve **Denizli-Sümer 91,57 µg/m³** istasyonlarındadır. 2023'te il ölçeğinde başı **Iğdır 86,96 µg/m³** ve **Malatya 85,76 µg/m³** çekmiştir ve Iğdır hem 2022 hem 2023'te en yüksek yıllık PM2.5 ortalamasına sahip ildir.

Aşım gün sayısı tablosu, mekanizmanın kalıcılığını gösterir. Ulusal mevzuat 24 saatlik PM10 sınır değerinin (50 µg/m³) yılda en fazla **35 gün** aşılmasına izin verirken, 2022'de **Adana-Meteoroloji** istasyonunda aşım **338 gün**, **Denizli-Bayramyeri**'nde **318 gün**, **Hakkâri**'de **308 gün** olmuştur. Aynı yıl yeterli veri alınan **225 istasyonun 198'inde (%88)** 35 gün sınırı aşılmıştır. Yani aşım bir episod değil, yılın büyük bölümüne yayılan bir durumdur.

Kıyı ile iç bölge arasındaki fark da nettir ama yanıltıcı olmamalıdır. 2022'de ulusal yıllık PM10 sınır değerinin altında kalan **13 il** (Adıyaman, Bitlis, Karaman, Isparta, Antalya, Bilecik, Kırşehir, Trabzon, Giresun, Rize, Sinop, Afyonkarahisar, Samsun) vardır, ancak **bu illerin hiçbiri WHO kılavuz değerinin altında değildir.** 2024 verisiyle tablo daha da keskindir: hava kalitesi "iyi" olan **tek bir il bile yoktur**; 81 ilin **41'i "orta"**, **40'ı "hassas"** düzeydedir ve yıl boyu en kirli üç il **Iğdır, Erzincan ve Kütahya**'dır.

Mevsimsellik ise tek bir hikâye anlatmaz. İstanbul'da 2004-2010 döneminde günlük PM10 aşım gün sayısının **ilkbaharda (49 gün)** kıştan (45 gün) yüksek çıkması, ısınma dışı bir katkıya işaret eder. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün toz taşınımı modeline[23] göre Türkiye'yi Sahra ve Orta Doğu kaynaklı toz etkiler, taşınım **ilkbahar, yaz ve sonbahar** aylarında yoğunlaşır ve en çok etkilenen bölge **Güneydoğu Anadolu**'dur. Yani Türkiye'de hava kirliliğinin yüksek olduğu bir günün nedeni kışın ısınma, ilkbaharda toz taşınımı, yazın fotokimyasal ozon olabilir; üçü farklı mekanizmadır ve üçü farklı önlem gerektirir.

Ölçüm ve Yönetimin Kurumsal Çerçevesi

Türkiye'de hava kalitesi, **Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği** (Resmî Gazete, 6 Haziran 2008, sayı 26898) ile yönetilir ve yetkili kurum **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**'dır. Ülkede ilk hava kalitesi ölçümü **1961'de Ankara'da** yapılmış, 81 ilde istasyon kurulumu **2005-2007** döneminde tamamlanmıştır. Bakanlığın kendi sayfasına göre **Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı** bugün **81 ilde 360 istasyon** işletmektedir ve ağda PM10, CO, SO_2, NO_2 ve O_3 olmak üzere beş ana kirletici ölçülür; PM2.5, BTEX ve ağır metal ölçümleri ek olarak yapılır. İstasyon sayısı kaynağa ve yıla göre 340 ile 380 arasında değiştiği için bu sayı her zaman **yıl ve kaynak birlikte** yazılmalıdır.

23. Kaynak: mgm.gov.tr

Üç ayrımın bu noktada net olması gerekir. Birincisi, **WHO kılavuz değeri hukuken bağlayıcı değildir**; bağlayıcı olan ulusal sınır değerlerdir ve ikisi arasında ciddi bir makas vardır (yıllık PM10'da 15 µg/m³ karşısında 40 µg/m³, yani **2,7 kat**). İkincisi, ulusal mevzuatta **PM2.5 için bir sınır değer bulunmamaktadır**: ölçülür ve raporlanır, ama aşıldığında doğrudan bir temiz hava planı yükümlülüğü doğurmaz. Üçüncüsü, Türkiye Uzun Menzilli Sınırötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi'ne **taraftır** ve 2011'den beri ulusal emisyon envanterini düzenli olarak raporlar, ancak bu sözleşmenin ulusal emisyon tavanları belirleyen Gothenburg Protokolü'ne **taraf değildir**, yani bağlayıcı bir azaltım taahhüdü altında değildir.

Bu çerçevenin ölçüm tarafındaki en çarpıcı sonucu, uluslararası bir raporda görünür oldu: Avrupa Çevre Ajansı'nın 41 ülkeyi kapsayan 2025 hastalık yükü değerlendirmesinde Türkiye, **PM2.5 tahmini üretilemeyen tek ülkedir** ve ajansın gerekçesi havanın temizliği değil, **veri alınabilen arka plan izleme istasyonu sayısının derişim haritası üretmeye yetmemesidir**. Sınır değer tabloları, geçiş takvimi, AB kıyası, istasyon tipleri, veri geçerlilik oranı, hava kalitesi indeksi hesabı ve Temiz Hava Eylem Planları, tam çerçevesiyle serinin **ikinci bölümünde** ele alınacaktır; idari yaptırım çerçevesi için ise Çevre Kanunu Rehberi[24] başlıklı çalışmamıza bakılabilir.

Kaynakların Manşeti: Kirliliği Kim Üretiyor?

Serinin geri kalan dört bölümü, hava kirliliğinin kaynakları ekseninde kurulmuştur ve bu kurgunun gerekçesi tek bir tabloda durur: ulusal emisyon envanteri. Burada yalnız manşeti veriyoruz.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın CLRTAP kapsamında sunduğu ulusal envantere göre, **envanter yılı 2022** itibarıyla Türkiye'nin ince partikül madde (PM2.5) emisyonunun **%54,03'ü tek bir kaynaktan** gelmektedir ve bu kaynak sanayi değil, **evlerin ısınmasıdır**. PM10'da da birinci sıra yine ısınmadadır (**%42,70**), karbon monoksitte de öyle (**%44,31**). Buna karşılık **kükürt dioksitin yaklaşık yedide beşi (%69,71) tek bir sektörden**, kamu elektrik ve ısı üretiminden, yani termik santrallerden çıkar; azot oksitlerde de baskın kaynak yine elektrik üretimidir (**%37,36**), ikinci sırada ağır ticari araçlar gelir. **Amonyağın neredeyse tamamı (%89,69) tarımdandır** ve bu bölümde kurduğumuz ikincil inorganik aerosol mekanizması gereği tarım, aynı zamanda bir ince partikül meselesidir.

Ölçek için ulusal toplamlar: 2022'de Türkiye atmosfere **2.738,20 kiloton SO_2**, **986,91 kiloton NO_x**, **1.143,01 kiloton NMVOC**, **898,88 kiloton NH_3**, **1.618,07 kiloton CO**, **289,02 kiloton PM10** ve **223,35 kiloton PM2.5** salmıştır.

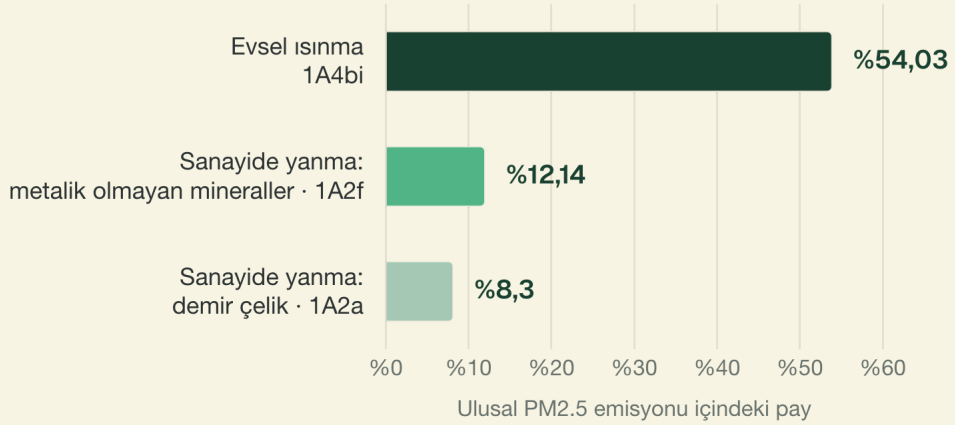
24. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/cevre-kanunu-rehberi-2026-kapsamli-klavuz

ŞEKİL 1.8

ÖNİZLEME · TAM KAYNAK HARİTASI BÖLÜM 2'DE

Türkiye'de PM2.5 Emisyonunun İlk Üç Kaynağı

Ulusal emisyon envanteri, envanter yılı 2022. İnce partikülün baskın kaynağı fabrika bacası ya da egzoz değil, hanelerin bacasıdır.



Kaynak: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın CLRTAP kapsamında EMEP/CEIP'e sunduğu ulusal emisyon envanteri, NFR kategorileri 1A4bi, 1A2f ve 1A2a. Üç kaynak toplamın **%74,47**'sini oluşturur; kalan **%25,53** diğer kategorilere dağılır. Sektör çarpı kirletici matrisi, il kırılımı ve tarım ile doğal kaynakların payı serinin ikinci bölümündedir.

Bu manşetin okura söylediği şey, sezgiyi kıran bir cümledir: Türkiye'de ince partikülün baskın kaynağı fabrika bacası ya da egzoz değil, **hanelerin bacasıdır**.

UZMAN NOTU

Eğilim tarafında Türkiye ile Avrupa Birliği farklı yönlere gitmektedir. Ulusal envanterden hesaplanan 2005-2022 değişimi SO_2'de **+%337**, PM2.5'te **+%31**, NMVOC'de **+%18** ve NH_3'te **+%42** iken, azot oksitlerde **-%9**'luk sınırlı bir gerileme vardır; aynı kirleticilerde AB-27'nin 2005-2023 değişimi sırasıyla **-%84**, **-%38**, **-%35**, **-%17** ve **-%53**'tür. Kıyas bilinçli olarak 2005 bazından yapılmıştır: ulusal envanterin 1990 bazlı yüzdeleri (SO_2 +%379, NO_x +%646, PM2.5 +%490) 1994 ve 2007'de metodoloji ile kapsam revizyonlarından kaynaklanan sıçramalar içerir ve gerçek emisyon değişimi olarak okunamaz. Envanterin kendi belirsizliği ve kademe yaklaşımı serinin ikinci bölümünün konusudur.

Sektör çarpı kirletici tam matrisi, illerin baskın kaynakları ile tarım ve doğal kaynakların payı, serinin **ikinci bölümünde**, Türkiye kaynak haritası başlığı altında ele alınacaktır.

KİLİT MESAJ

Her kirleticinin kendi baskın kaynağı vardır ve tek bir "hava kirliliği önlemi" hepsine birden çare olmaz. Isınmaya dokunmadan PM2.5, elektrik üretimine dokunmadan SO_2, tarıma dokunmadan amonyak azaltılamaz; bu seri de bu yüzden kirletici değil kaynak ekseninde kurulmuştur.

1.6 Sonuç

Hava kirliliğinin teknik temeli, birbirine bağlı üç halkadan oluşur: ne salındığı, atmosferde ne olduğu ve ne kadar seyreldiği. Hava kirliliği bu üç halkanın bileşkesidir ve halkalar birlikte okunmadığında her biri tek başına yanıltır. Yalnız emisyona bakan biri, kirliliğin neden bazı günler beş katına çıktığını açıklayamaz. Yalnız meteorolojiye bakan biri, aynı meteorolojinin başka bir şehirde neden sorun üretmediğini göremez. Yalnız ölçüme bakan biri, ölçtüğü kütlenin önemli bir bölümünün hiçbir bacadan çıkmadığını fark edemez.

Bu bölümün kurduğu çerçeve, iyimserlik ya da kötümserlik değil, yönetilebilirlik önerir. Hava kirliliği çözülmüş bir sorun değildir, ama çözülebileceği kanıtlanmış bir sorundur: Avrupa Birliği'nde PM2.5'e atfedilen erken ölümler **2005 ile 2023 arasında %57 azalmış**, kurşun hava kalitesi gündeminden fiilen çıkmış, kükürt dioksit emisyonları AB genelinde **%84** gerilemiştir. Türkiye'nin tablosu farklıdır ve bu fark, teknolojinin yokluğundan çok, kaynak bileşiminin ve ölçüm altyapısının sonucudur.

Yeşil Ajanda olarak bu bölümün ortaya koyduğu üç temel noktaya dikkat çekiyoruz:

1. **İkincil kirletici, politikayı doğrusal olmaktan çıkarır.** Ozon ve ikincil inorganik aerosol, hiçbir bacadan çıkmadan oluşur; öncüllerinden birini azaltmak diğerinin etkisini büyütebilir, hatta kısa vadede ikincil kirleticiyi artırabilir. Bu yüzden hava kalitesi planlaması, emisyon listesiyle değil rejim analiziyle başlamalı ve kaynak ayrıştırma ile envanter birlikte okunmalıdır.
2. **Meteoroloji kirliliği yaratmaz, görünür kılar.** Karışım yüksekliğinin bir kış gecesinde onda birine inmesi, emisyon hiç değişmese bile derişimi kat kat artırır. Episod yönetimi gerçek bir araçtır ama emisyon azaltımının yerine geçemez: aynı emisyonla bir sonraki durgun gecede tablo aynen tekrarlanır.
3. **Sağlık etkisinin eşiksiz kabul edilmesi, "sınır değerin altındayız" savunmasını zayıflatır.** Kanıt, düşük derişimlerde bile risk gösteriyor ve bazı analizlerde etki düşük derişimlerde daha da belirginleşiyor. Yasal uygunluk ile sağlık koruması iki ayrı ölçüttür; Avrupa'da istasyonların %99'unun yasayı sağlarken %92'sinin kılavuz değeri aşması bu farkın en açık kanıtıdır.

Serinin bir sonraki bölümünde hava kalitesi standartları, hava kalitesi indeksinin nasıl hesaplandığı, ulusal izleme ağı ile uydu ve sensör tamamlayıcıları, emisyon envanteri metodolojisi ve Türkiye'nin tam kaynak haritası ele alınacak. Bu bölümde kurduğumuz tanımlar ve semboller orada kullanılacak; kaynak paylarının manşetiyle bıraktığımız tablo ise tam matrisiyle orada açılacak.

Sıkça Sorulan Sorular

PM10 ile PM2.5 arasındaki fark nedir?

Hava kirliliğinin bu iki göstergesi arasındaki fark, taneciklerin **aerodinamik çapındadır**: PM10, 10 µm aerodinamik çapta %50 verimle kesme yapan bir girişten geçen partikül maddedir; PM2.5 ise aynı mantıkla 2,5 µm'de kesen fraksiyondur. Pratik sonucu solunum sistemindeki derinliktir: PM10 bronş ve bronşiyollere ulaşırken, PM2.5 gaz değişiminin yapıldığı alveollere iner. Sağlık kanıtı da bu farkı yansıtır: WHO 2021 kılavuzunda PM2.5'in yıllık kılavuz değeri **5 µg/m³**, PM10'unki **15 µg/m³**'tür.

Birincil ve ikincil kirletici ne demek?

Birincil kirletici kaynaktan doğrudan salınır (SO_2, NO, karbon monoksit, birincil partikül, uçucu organik bileşikler, amonyak). **İkincil kirletici** ise atmosferde kimyasal dönüşümle oluşur (yer seviyesi ozonu, sülfat, nitrat ve amonyum aerosolleri, ikincil organik aerosol). Ayrım pratiktir: ikincil kirletici emisyon envanterlerinde görünmez ve öncül emisyonuyla doğrusal ilişkisi yoktur, bu yüzden azaltım planlaması farklı kurulur.

Azot oksit emisyonlarını azaltmak ozonu neden bazen artırır?

Çünkü yoğun kirli kent merkezleri genellikle **UOB sınırlı (azot oksitçe doymuş)** rejimdedir. Bu rejimde NO, ozonu aktif olarak tüketir ($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$); trafik kaynaklı azot oksitler azalınca bu tüketim zayıflar ve ölçülen ozon yükselir. İkinci mekanizma, yüksek azot oksit derişiminin radikal zincirini kesmesidir; azot oksit düşünce radikal havuzu büyür ve ozon üretim verimi artar. Bu, kısa vadeli ve yerel bir davranıştır: bölgesel ölçekte ve uzun vadede azot oksit azaltımı ozonu düşürür. 2020 baharındaki kapanmalar bu davranışın gerçek dünyadaki en net örneğiydi: Avrupa'da NO_2 %25 ile %40 bandında düşerken yüzey ozonu arttı.

Kış aylarında hava neden daha kirli oluyor?

Kışın hava kirliliğini artıran üç neden üst üste biner. Birincisi, ısınma amaçlı yakıt tüketimi artar. İkincisi ve çoğu zaman daha belirleyici olanı, meteorolojidir: açık ve durgun kış gecelerinde yer yüzeyi hızla soğur, **radyasyon inversiyonu** kurulur ve karışım yüksekliği birkaç on metreye kadar iner. Basit kutu modeline göre derişim karışım yüksekliğiyle ters orantılıdır, yani karışım yüksekliği 1.000 metreden 200 metreye inerse emisyon sabit kalsa bile derişim **beş katına** çıkar. Üçüncüsü topografyadır: çanak ve vadi tabanındaki yerleşimlerde soğuk hava birikir, inversiyon daha erken kurulur ve daha geç çözülür.

Hava kirliliğinde güvenli bir eşik var mı?

Hava kirliliği için mevcut epidemiyolojik kanıt bir eşik göstermemektedir. WHO kılavuzlarının dayandığı 2020 tarihli meta-analiz, ortalama PM2.5 derişimi 10 µg/m³'ün altında olan çalışma alt kümelerinde bile genel göreli riske **benzer ya da ondan daha yüksek** riskler bulmuştur; bu, doğrusal ya da süperdoğrusal derişim-yanıt eğrileriyle tutarlıdır. Sağlık tahminlerinde kullanılan karşıolgusal düzey (PM2.5 için 2,4 ile 5,9 µg/m³ bandı) bir "zararsız düzey" değil, epidemiyolojik kanıtın bittiği noktadır. Pratik sonucu şudur: yasal sınır değerin altında olmak, sağlık açısından risksiz olmak anlamına gelmez.

BÖLÜM SONU

Bölüm özeti

Bölümdeki Kilit Mesaj kutularının birebir derlemesi.

§1.1 Bir hava kirleticisini tanımak, adını bilmek değil, dört şeyi birlikte bilmektir: hangi süreçten çıktığı, hangi birimle ve hangi ortalama süresiyle ölçüldüğü, atmosferde ne kadar yaşadığı ve hangi mekanizmayla zarar verdiği. Bu dörtlü, serinin geri kalanının ortak sözlüğüdür.

§1.2 Bir kirleticinin nereden çıktığını bilmek, onu nasıl azaltacağınızı bilmek anlamına gelmez. İkincil kirleticide azaltım aritmetiği doğrusal değildir, öncüller arasında rekabet vardır ve yanlış öncülü azaltmak sonucu ters çevirebilir. Bu yüzden hava kalitesi yönetimi, emisyon listesiyle değil, atmosfer kimyasıyla başlar.

§1.3 Yer seviyesindeki derişim, bacadan çıkan kütlenin değil, o kütlenin bölüneceği hava hacminin sonucudur. Kararlılık sınıfı ile karışım yüksekliği o hacmi belirler; efektif baca yüksekliği ise kütlenin nereye bırakılacağını. Bu üç değişken bilinmeden hiçbir emisyon değeri sağlık etkisine çevrilemez.

§1.4 Hava kirliliğinin sağlık etkisi bir eşiğin aşılmasıyla başlamaz, derişimle birlikte sürekli artar; ekosistem etkisi ise bir eşiğe, yani kritik yüke bağlıdır. Bu asimetri, hava kalitesi politikasının neden iki ayrı ölçütle (nüfus maruziyeti ve kritik yük aşımı) çalıştığını açıklar.

§1.5 Her kirleticinin kendi baskın kaynağı vardır ve tek bir “hava kirliliği önlemi” hepsine birden çare olmaz. Isınmaya dokunmadan PM2.5, elektrik üretimine dokunmadan SO_2, tarıma dokunmadan amonyak azaltılamaz; bu seri de bu yüzden kirletici değil kaynak ekseninde kurulmuştur.

BAŞVURU

Semboller ve birimler

Bölümün denklemlerindeki değişkenler; tanımlar denklem kartlarından birebir.

SEMBOL	TANIM VE BİRİM	İLK GEÇTİĞİ
β	derişim-yanıt katsayısı ($(\mu g/m^3)^{-1}$)	(1.4)
C	derişim (g/m^3; $\mu g/m^3$ için 10^6 ile çarpılır)	(1.2)
C_0	karşıolgusal referans derişim ($\mu g/m^3$)	(1.4)
d_s	baca iç çapı (m)	(1.3)
g	9,81 m/s^2	(1.3)
$H = h_s + \Delta h$	efektif baca yüksekliği (m)	(1.2)
Q	kaynak kütle debisi (g/s)	(1.2)
RR	göreli risk (birimsiz)	(1.4)
RR_{10}	10 $\mu g/m^3$ artış başına yayımlanan göreli risk (PM2.5 için WHO 2021 derlemesinde 1,08; 2024 güncellemesinde 1,095)	(1.4)
σ_y, σ_z	yatay ve düşey dağılım katsayıları (m)	(1.2)
T_s, T_a	baca gazı ve ortam sıcaklığı (K)	(1.3)
u	baca yüksekliğinde rüzgâr hızı (m/s)	(1.2)
u_s	baca yüksekliğinde rüzgâr hızı (m/s)	(1.3)
v_s	baca çıkış hızı (m/s)	(1.3)
x, y, z	rüzgâr yönünde, rüzgâra dik ve yerden yükseklik (m)	(1.2)
ΔT	$T_s - T_a$ (K)	(1.3)
$\partial\theta/\partial z$	potansiyel sıcaklık gradyanı; varsayılan değerler E sınıfı için 0,020 K/m, F sınıfı için 0,035 K/m	(1.3)

BAŞVURU

Denklem dizini

Bölümün tüm denklemleri tek yerde. Sayfa numarası denklemin açıklandığı yeri gösterir.

(1.1) **Kararlılık ölçütü · kuru adyabatik sıcaklık gradyanı** s. 23

$$\Gamma_d = \frac{g}{c_p} = 9{,}8\ °\mathrm{C/km} \approx 1\ °\mathrm{C}\ /\ 100\ \mathrm{m}$$

(1.2) **Gauss dağılım denklemi · yer yansımalı** s. 29

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\, u\, \sigma_y\, \sigma_z} \cdot \exp(-y^2 / 2\sigma_y^{\,2}) \cdot \{\, \exp(-(z-H)^2 / 2\sigma_z^{\,2}) + \exp(-(z+H)^2 / 2\sigma_z^{\,2}) \,\}$$

(1.3) **Briggs duman yükselmesi · efektif baca yüksekliği** s. 32

$$F_b = \frac{g\, v_s\, d_s^{\,2}\, \Delta T}{4\, T_s} \quad [\mathrm{m^4/s^3}] \qquad F_m = \frac{v_s^{\,2}\, d_s^{\,2}\, T_a}{4\, T_s} \quad [\mathrm{m^4/s^2}]$$

(1.4) **Doz-yanıt · log-lineer göreli risk ifadesi** s. 38

$$RR(C) = \exp[\, \beta \cdot (C - C_0) \,]$$

Kaynaklar

1. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) – WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide, 2021. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228
2. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) – Ambient (Outdoor) Air Quality and Health, bilgi notu. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health
3. Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü (IIASA) – WHO Global Air Quality Guidelines 2021: Setting Ambitious Goals for Air Quality to Protect Public Health, sunum. https://iiasa.ac.at/sites/default/files/2025-02/WHO%20global%20air%20quality%20guidelines%202021_%20Setting%20ambitious%20goals%20for%20air%20quality%20to%20protect%20public%20health.pdf
4. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) – Outdoor Air Pollution, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 109, 2013. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK368024/
5. Avrupa Birliği – Directive 2008/50/EC on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe (PM10 ve PM2.5 tanımları, AOT40), 2008. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj
6. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) – Harm to Human Health from Air Pollution in Europe: Burden of Disease Status, 2025. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution-burden-of-disease-status-2025
7. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) – Air Quality Status Report 2025, Particulate Matter (PM2.5) bölümü. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025/particulate-matter-pm2.5
8. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) – Emissions of the Main Air Pollutants, gösterge, 2005-2023 serisi. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-of-the-main-air/
9. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) – Exposure of Europe's Ecosystems to Ozone, gösterge (AOT40). https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/exposure-of-europes-ecosystems-to-ozone
10. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) – Updated Data: Uppsala Has Cleanest City Air in Europe, European City Air Quality Viewer 2022-2023, 2024. https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/updated-data-uppsala-has-cleanest-city-air-in-europe
11. Avrupa Çevre Ajansı ve Eionet (ETC-HE) – Report 2024/5, Status Report of Air Quality in Europe for Year 2023, 2024. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2024-5-status-report-of-air-quality-in-europe-for-year-2023-using-validated-and-up-to-date-data
12. Avrupa Çevre Ajansı ve Eionet (ETC-HE) – Report 2024/3, Status Report of Air Quality in Europe for Year 2022, 2024. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2024-3-status-report-of-air-quality-in-europe-for-year-2022-using-validated-data
13. Sağlık Etkileri Enstitüsü ve IHME (HEI, IHME) – State of Global Air 2024, 2024. https://www.stateofglobalair.org/resources/archived/state-global-air-report-2024
14. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (US EPA) – User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II: Description of Model Algorithms, EPA-454/B-95-003b, 1995. https://gaftp.epa.gov/aqmg/SCRAM/models/other/isc3/isc3v2.pdf
15. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (US EPA) – AERMOD: Description of Model Formulation, EPA-454/R-03-004. https://gaftp.epa.gov/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_mfd_454-R-03-004.pdf
16. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (US EPA) – Air Quality Dispersion Modeling, Preferred and Recommended Models (40 CFR Part 51 Appendix W, 2017 revizyonu). https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models
17. C. Seigneur – Atmospheric Dispersion, ders notu Chapter 6 (Gauss denklemi, Pasquill sınıfları, Briggs-McElroy-Pooler dağılım katsayıları). https://www.apsi.tech/material/seigneur/Chapter6-AtmosphericDispersion.pdf
18. California Council on Science and Technology (CCST) – Chapter 1 Appendix 1.B, Dispersion Modeling (Pasquill kararlılık tablosu, Briggs katsayıları). https://ccst.us/wp-content/uploads/Chapter-1-v2-Appendix-1-B.pdf
19. G. C. Holzworth, US EPA – Mixing Heights, Wind Speeds, and Potential for Urban Air Pollution Throughout the Contiguous United States, AP-101, 1972. https://www.nrc.gov/docs/ML1408/ML14084A177.pdf
20. D. B. Turner, US EPA – Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, AP-26, 1970 (duman izi biçimleri, ortalama süresi düzeltmesi).
21. Ulusal Araştırma Konseyi (NRC) – Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution, National Academies Press, 1991, Bölüm 6. https://nap.nationalacademies.org/read/1889/chapter/8
22. W. H. Brune, Penn State Üniversitesi – METEO 532 ders notu, Chapter 4: The Troposphere (fotostasyoner denge, hız sabitleri, atmosferik ömürler). https://personal.ems.psu.edu/~brune/m532/m532_ch4_troposphere.htm
23. S. Sillman – The Relation Between Ozone, NOx and Hydrocarbons in Urban and Polluted Rural Environments, Atmospheric Environment 33, 1999.
24. Lippmann ve ark. – The Rate Constant of $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$ in the Temperature Range of 283-443 K, International Journal of Chemical Kinetics 12(8), 1980. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/kin.550120805
25. J. Chen ve ark. – Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis, International Journal of Public Health, 2024. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11466858/
26. J. Chen ve G. Hoek – Long-Term Exposure to PM and All-Cause and Cause-Specific Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis, Environment International, 2020. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020319292

27. A. J. Cohen ve ark. – Estimates and 25-Year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution, The Lancet 389, 2017. https://www.thelancet.com/article/S0140-6736(17)30505-6/fulltext
28. Sağlık Etkileri Enstitüsü (HEI) – GBD MAPS: Global Burden of Disease from Major Air Pollution Sources, 2022. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9501767/
29. R. Sturm – Modelling the Deposition of Fine Particulate Matter (PM2.5) in the Human Respiratory Tract, AME Medical Journal, 2020 (ICRP çökelme modeli ve U biçimli eğri). https://amj.amegroups.org/article/view/5437/html
30. Environmental Epidemiology – Health Effects of Ambient Black Carbon and Ultrafine Particles: Review and Integration of the Epidemiological Evidence, 2019. https://doi.org/10.1097/01.EE9.0000609832.55044.74
31. The Lancet Planetary Health – Long-Term Air Pollution Exposure and Incident Dementia: Systematic Review and Meta-Analysis, 2025. https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(25)00118-4/fulltext
32. Environmental Pollution – Formation Pathway of Secondary Inorganic Aerosol and Its Influencing Factors in Northern China, 2022. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35662601/
33. Nature Geoscience – Regime Shift in Secondary Inorganic Aerosol Formation and Nitrogen Deposition in the Rural United States, 2024. https://www.nature.com/articles/s41561-024-01455-9
34. Science of the Total Environment – Multi-City Comparative PM2.5 Source Apportionment for Fifteen Sites in Europe: The ICARUS Project, 2020. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720353845
35. Aerosol and Air Quality Research – Highly Time-Resolved Elemental Source Apportionment at a Prague Urban Traffic Site, 2024. https://aaqr.org/articles/aaqr-24-02-oa-0058
36. Science of the Total Environment – Variability of Ambient Air Ammonia in Urban Europe (Finland, France, Italy, Spain, and the UK), 2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412024001053
37. M. L. Bell ve D. L. Davis – Reassessment of the Lethal London Fog of 1952, Environmental Health Perspectives 109 (suppl 3), 2001.
38. Atmospheric Chemistry and Physics (Copernicus) – Ozone Pollution During the COVID-19 Lockdown in the Spring of 2020 over Europe, 2022. https://acp.copernicus.org/articles/22/4471/2022/
39. Science of the Total Environment – Impact of Lockdown Measures to Combat Covid-19 on Air Quality over Western Europe, 2020. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7309726/
40. Atmospheric Pollution Research – Background Atmospheric Conditions of High PM10 Concentrations in Istanbul, Turkey, 2020. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104220301793
41. Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE), CLRTAP – ICP Modelling and Mapping, Mapping Manual (kritik yük tanımı, ozon kritik düzeyleri).
42. R. Bobbink ve ark., Umweltbundesamt – Review and Revision of Empirical Critical Loads of Nitrogen for Europe, UBA Texte 110/2022. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/1410/publikationen/2022-10-12_texte_110-2022_review_revision_empirical_critical_loads.pdf
43. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) – Türkiye's Informative Inventory Report (IIR) 2024, 1990-2022 serisi, Ağustos 2024. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/menu/iir_turkiye_2024_20240802105351.pdf
44. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) – Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, Resmî Gazete 6 Haziran 2008, sayı 26898. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/06/20080606-6.htm
45. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) – Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) tanıtım sayfası. https://sim.csb.gov.tr/Intro/Uhkia
46. T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) – Toz Taşınımı Modeli Bilgi Notu. https://www.mgm.gov.tr/files/arastirma/toz_modeli_bilgi_notu.pdf
47. Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP) – Kara Rapor 2024: Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri, Aralık 2024 (ham veri ÇŞİDB UHKİA). https://temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2024/12/Kara-Rapor-2024_final.pdf
48. Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP) – Kara Rapor 2025, Ekim 2025. https://temizhavahakki.org/kara-rapor-2025/
49. N. Özmen ve ark. – Long-Term Ambient PM2.5 Exposure and Premature Mortality Across of Türkiye, Toxics 14(8): 728, 2026. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC13517430/
50. J. H. Seinfeld ve S. N. Pandis – Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3. baskı, Wiley, 2016 (troposfer kimyası, sulu faz kimyası, termodinamik denge, görüş mesafesi, yerel ölçek meteorolojisi).
51. N. de Nevers – Air Pollution Control Engineering, 3. baskı, Waveland Press, 2017 (kirletici sınıfları, kutu modeli, NO_x ve SO_2).
52. C. D. Cooper ve F. C. Alley – Air Pollution Control: A Design Approach, 4. baskı, Waveland Press, 2010 (partikül özellikleri, NO_x).
53. K. Wark, C. F. Warner ve W. T. Davis – Air Pollution: Its Origin and Control, 3. baskı, Addison-Wesley, 1998 (sis olayları, meteoroloji, inversiyon, duman izi biçimleri).
54. W. C. Hinds – Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2. baskı, Wiley, 1999 (aerodinamik çap).
55. E. Mertoglu ve ark. – Chemical Characterization of Water-Soluble Ions in Highly Time-Resolved Atmospheric Fine Particles in Istanbul Megacity, Environmental Science and Pollution Research International 29(50): 76456-76471, Ekim 2022 (İstanbul Beşiktaş PM2.5 kaynak ayrıştırması). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35672636/
56. IQAir – 2024 World Air Quality Report, Mart 2025. https://www.iqair.com/newsroom/waqr-2024-pr

57. Michał Długosz / Wikimedia Commons – Lale ağacı yaprağında ozon hasarı (Tuliptree leaf with ozone damage), fotoğraf, 2015; lisans CC BY-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/). Yazıdaki görselin arka planı kaldırılarak uyarlanmıştır, uyarlama da CC BY-SA 4.0 ile lisanslıdır. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tuliptree_leaf_with_ozone_damage.jpg

AKADEMİ SERİSİ

Hava Kirliliğinin Esasları: serideki ciltler

Her cilt bir önceki cildin terminolojisi ve sembolleri üzerine kurulur.

1 Temeller

2 Hava Kalitesi Yönetimi ve Envanter

3 Sanayi Kaynakları I

4 Sanayi Kaynakları II

5 Isınma Kaynakları

6 Hareketli Kaynaklar

ÖNERİLEN ATIF

Yeşil Ajanda (2026). *Hava Kirliliğinin Esasları, Bölüm 1: Temeller* (Yeşil Ajanda Akademi Serisi, Sürüm 1.0). yesilajanda.com/hava-kirliliginin-esaslari-temeller

YEŞİL AJANDA

Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ

Hava Kirliliğinin Esasları · Bölüm 1 / 6

> Bu doküman bilgilendirme amaçlıdır ve hukuki görüş niteliği taşımaz. İçerik, yayımlandığı tarihteki mevzuat ve kaynaklara dayanır; zamanla güncelliğini yitirebilir. Kesin değerlendirme için ilgili mevzuata ve konunun uzmanına başvurunuz.

Kaynak yazı: https://yesilajanda.com/hava-kirliliginin-esaslari-temeller/

Yayın tarihi: 23 Eylül 2026

Sürüm: 1.0

İletişim: yesilajanda.com

BİZİ TAKİP EDİN

LinkedIn · linkedin.com/company/yesilajandacom

Instagram · @yesilajandacom

X · @yesilajandacom

Facebook · @yesilajandacom

Bu yayın yesilajanda.com'da yayımlanan içerikten üretilmiştir. Tüm hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek alıntılanabilir.