



ÇEV 806
Hava Kirliliđi ve İklim Deđiřimi

5 - Atmosferin Yapısı ve Hava Kirliliđi

Doç. Dr. Özgür ZEYDAN

<https://ozgurzeydan.com.tr/>

Atmosferin Yapısı

- Hava kirliliğinin oluşumu, etkileri ve kontrol yöntemlerini belirleyebilmek:
 - Atmosferi oluşturan gazlar
 - Atmosferin katmanları
 - Bu katmanlardaki fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar
- bilinmelidir.

Yer Seviyesi Konsantrasyonlara Etki Eden Faktörler



Introduction to Air Quality Forecasting

Pawan Gupta & Melanie Follette-Cook

September 23, 2021

<https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-introduction-and-access-global-air-quality-forecasting-data-and>

Temiz kuru havanın bileşimi

Not: 1 ppm hacim = 0.0001% hacim

Molekül	Sembol	ppm (hacim)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Azot	N ₂	780000	8.95×10^8
Oksijen	O ₂	209400	2.74×10^8
Argon	Ar	9300	1.52×10^7
Karbon Dioksit	CO ₂	315	5.67×10^5
Neon	Ne	18	1.49×10^4
Helyum	He	5.2	8.50×10^2
Metan	CH ₄	1.0 – 1.2	$6.56 – 7.87 \times 10^2$
Kripton	Kr	1.0	3.43×10^3
Nitröz Oksit	N ₂ O	0.5	9.00×10^2
Hidrojen	H ₂	0.5	4.13×10^1
Ksenon	Xe	0.08	4.29×10^2

Karışım Oranı (C_x)

$$\begin{aligned} 1 \text{ ppm (vol) pollutant} &= \frac{1 \text{ liter pollutant}}{10^6 \text{ liter air}} \\ &= \frac{(1 \text{ liter}/22.4) \times MW \times 10^6 \mu\text{g/gm}}{10^6 \text{ liters} \times 298^\circ\text{K}/273^\circ\text{K} \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{liter}} \\ &= 40.9 \times MW \mu\text{g/m}^3 \end{aligned}$$

(25 °C ve 760 mm Hg basınç altında)

ppm: milyonda bir (parts per million)

ppb: milyarda bir (parts per billion)

ppt: trilyonda bir (parts per trillion)

Problem

- <https://www.co2.earth/> web sitesi Ağustos 2024 tarihi için küresel CO₂ konsantrasyonunu **422.71 ppm** olarak belirtmiştir.
- Buna göre atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak hesaplayınız.
- $MW_{\text{CO}_2} = 44 \text{ gr/mol}$
- $1 \text{ ppmv} = 40.9 \times MW \mu\text{g}/\text{m}^3 = 40.9 \times 44 = 1799.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- $422.71 \text{ ppmv} \rightarrow 1799.6 \times 422.71 = 7.61 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuru Havanın Molekül Ağırlığı

$$\text{➤ } M_a = \sum_i C_i M_i$$

$$\text{➤ } M_a = C_{N_2} M_{N_2} + C_{O_2} M_{O_2} + C_{Ar} M_{Ar} + \dots$$

$$\text{➤ } M_a = (0.78) \cdot (28 \times 10^{-3}) + (0.21) \cdot (32 \times 10^{-3}) + (0.01) \cdot (40 \times 10^{-3})$$

$$\text{➤ } M_a = 28.96 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

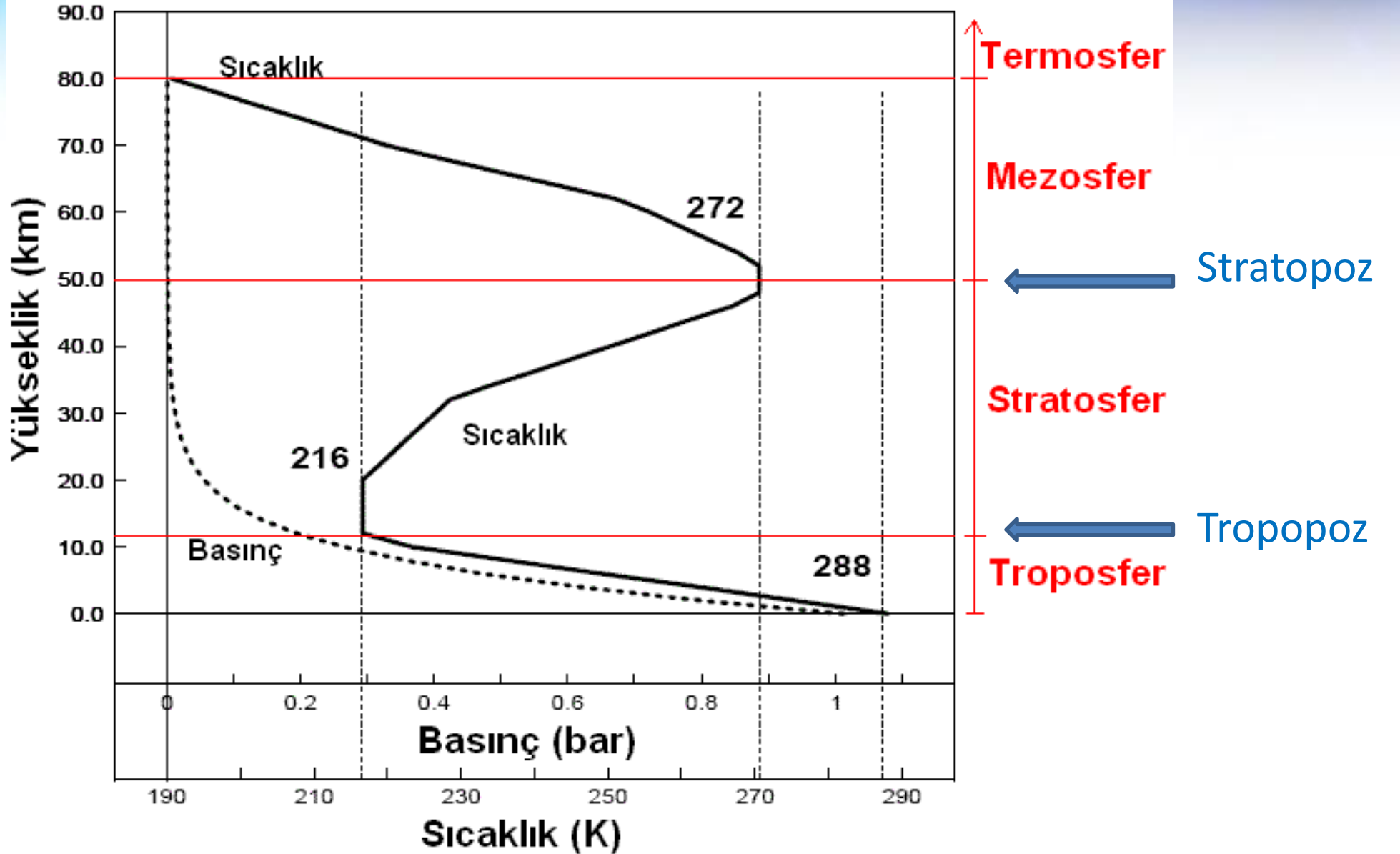
Bağıl Nem (Relative Humidity) (RH)

- Havadaki nemin, aynı sıcaklıkta havanın taşıyabileceği maksimum neme oranıdır.
- RH sıcaklığa bağlıdır.
- $$RH(\%) = 100 \cdot \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O,sat}(T)}$$
- $RH \geq 100\% \rightarrow$ Bulut oluşumu

Nemli Havanın Molekül Ağırlığı

- $M_{a,nemli} = (1 - C_{H_2O})M_{a,kuru} + C_{H_2O}M_{H_2O}$
- Örneğin, su buharının karışım oranı 0.03 ise nemli havanın molekül ağırlığı nedir?
- $M_{a,nemli} = (1 - 0.03) \times 28.96 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} + 0.03 \times 18 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- $M_{a,nemli} = 28.63 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- Nemli hava kuru havadan daha hafiftir.

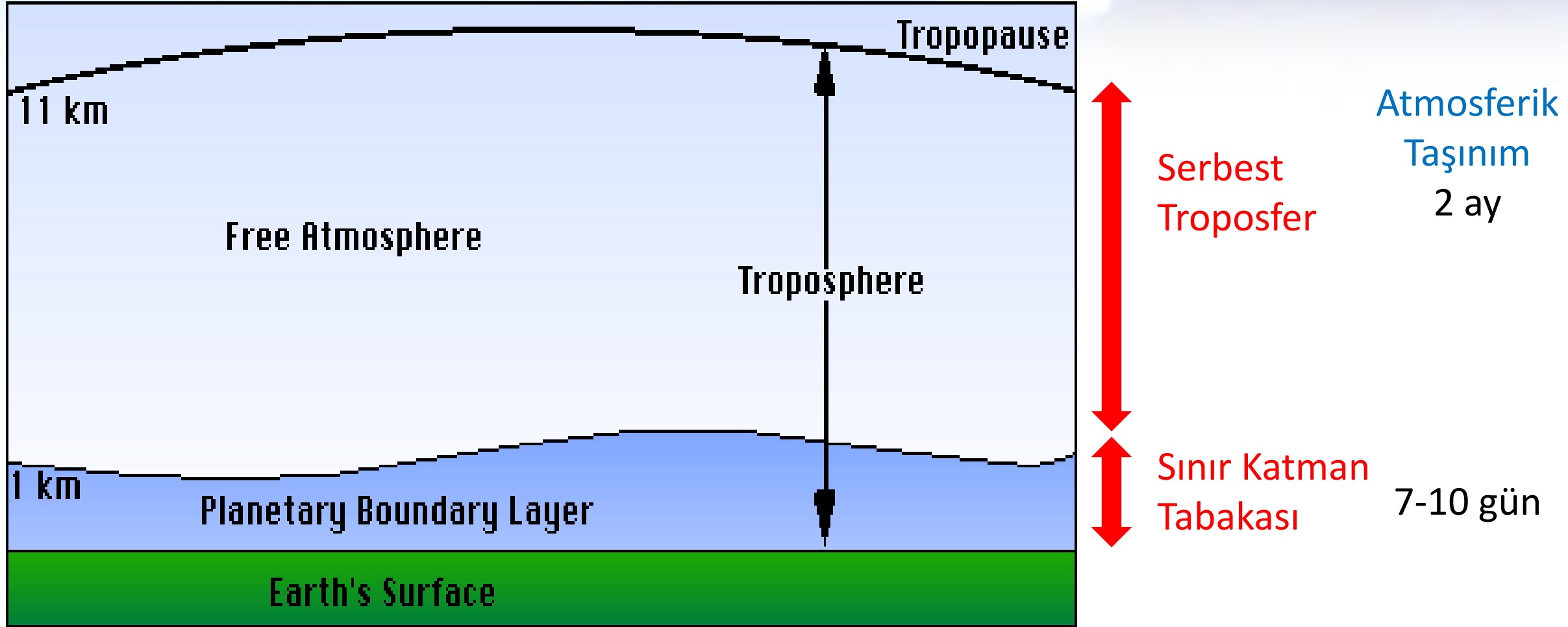
Atmosfer Katmanları



Troposfer

- Yer yüzeyinden başlayan ilk 11-12 km'lik atmosfer katmanı.
- Meteorolojik olaylar bu bölgede gerçekleşir.
- Yükselge çıkıldıkça sıcaklık yaklaşık 15 °C'den (288 K) -57°C'ye (216 K) düşer.
- Basınç 1013 mb'dan 20-140 mb'a kadar düşer.

Serbest Troposfer – Sınır Katman Tabakası



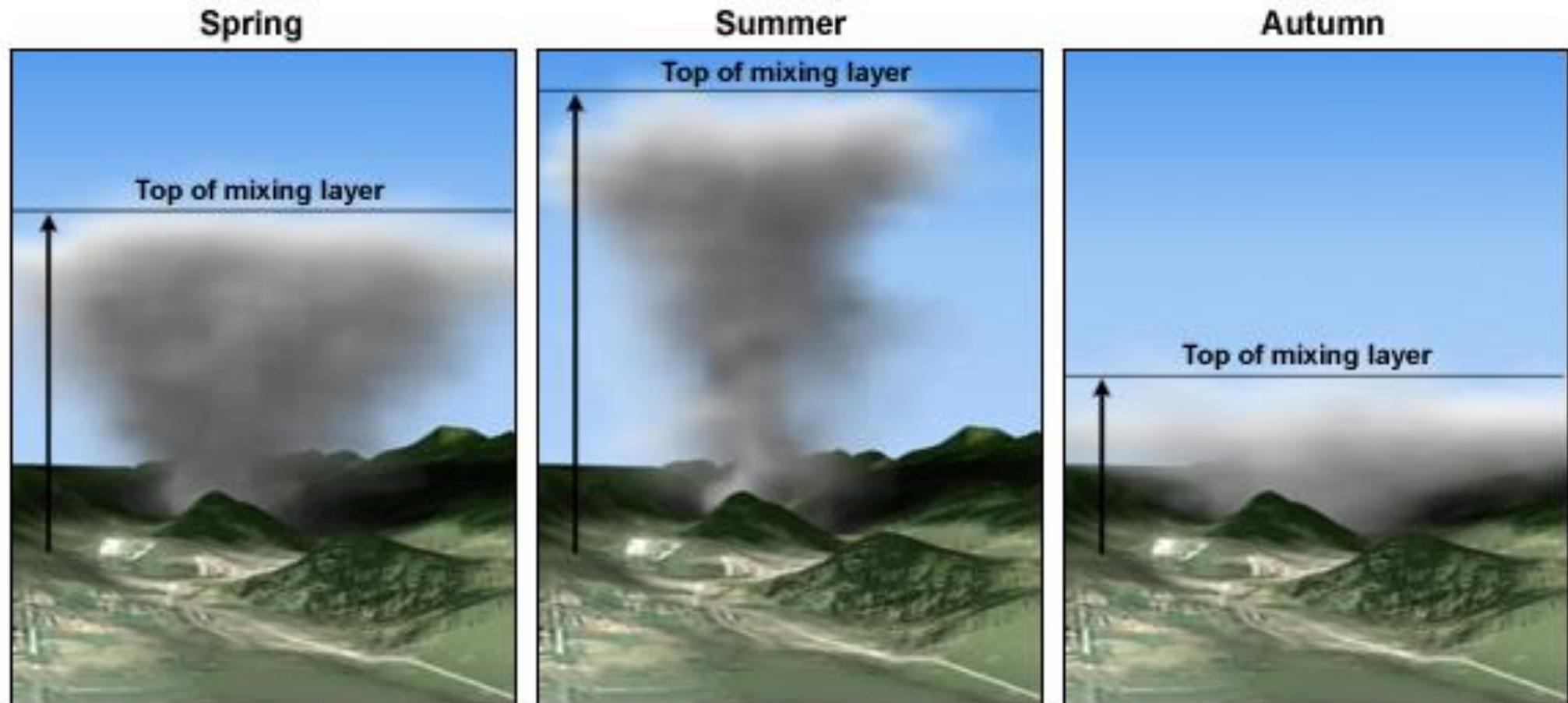
PBL yüksekliği (HPBL) genellikle 1-2 km arasında değişir (zamana ve konuma bağlı).

<http://www.shodor.org/os411/courses/411c/module06/unit01/page01.html>

Sınır Katman Tabaka Yüksekliği (HPBL)

- **Karışım Yüksekliği** olarak da bilinir.
- Hava kirleticilerinin hava içerisinde tam karışımlı oldukları yüksekliktir.
- Karışım yüksekliğinin belirlenmesi hava kirliliği problemlerinde oldukça önemlidir.

Seasonal Variation in the Height of the Mixing Layer

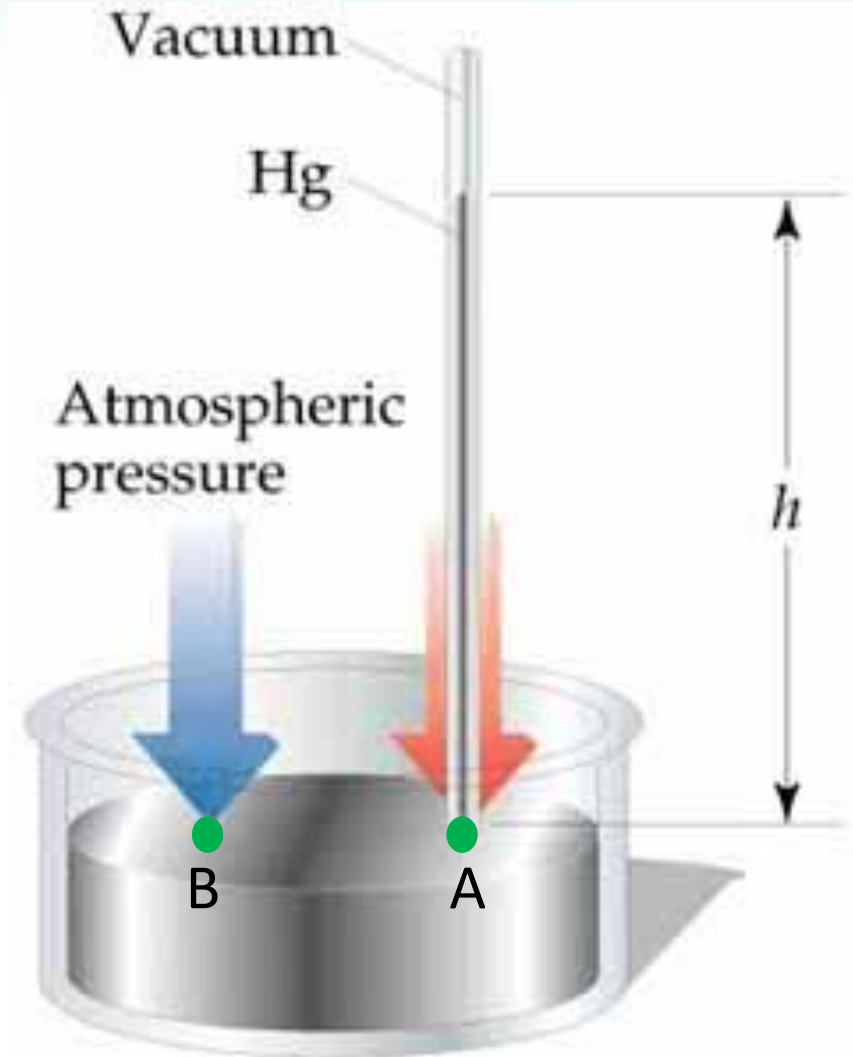


©The COMET Program

Stratosfer

- 11-50. km'ler arasında troposferin üzerinde yer alır.
- 20-30. km'ler arasında Ozon tabakası bulunur.
- Bu tabaka güneşten gelen UV-B ışınlarını tutar.

Atmosferik Basınç



$$\text{➤ } P_A = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h$$

➤ ρ_{Hg} : cıvanın özgül ağırlığı (13.6 gr/cm³)

➤ g : yerçekimi ivmesi (9.8 m/s²)

➤ h : yükseklik (deniz seviyesinde 76 cm)

$$P_a = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa} = 1013 \text{ mb} \\ = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 760 \text{ torr}$$

Atmosferin Kütlesi

➤ Dünya yer yüzeyindeki ortalama basınç 984 hPa ise toplam atmosfer kütlesini (m_{atm}) ve mol sayısını (N_{atm}) hesaplayınız.

$$➤ P = \rho \cdot g \cdot h = \frac{m_{atm}}{V} \cdot g \cdot h = \frac{m_{atm}}{A \cdot h} \cdot g \cdot h = \frac{m_{atm} \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

$$➤ m_{atm} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot P}{g} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (6400 \text{ km})^2 \cdot 984 \text{ hPa}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 5.2 \times 10^{18} \text{ kg}$$

$$➤ N_{atm} = \frac{m_{atm}}{M_a} = \frac{5.2 \times 10^{18} \text{ kg}}{28.96 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}} = 1.8 \times 10^{20} \text{ mol}$$

Atmosferdeki Gazların Kütlesi

➤ Atmosferin kütlesi ve karışım oranı bilinirse, atmosferdeki gazların kütlesi hesaplanabilir. Örneğin sanayi devriminden bu yana atmosfere atılan CO₂ miktarını hesaplayalım.

$$➤ C_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_a} = \frac{N_c}{N_a} = \frac{M_a}{M_c} \cdot \frac{m_c}{m_a}$$

➤ N_c: toplam karbon (karbondioksit) mol sayısı

➤ N_a: atmosferdeki toplam mol sayısı

➤ m_c: toplam karbon (karbondioksit) kütlesi

➤ m_a: atmosferin toplam kütlesi

Sanayi Devriminden Bu Yana Atmosfere Atılan CO₂

$$\text{➤ } C_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_a} = \frac{N_C}{N_a} = \frac{M_a}{M_C} \cdot \frac{m_C}{m_a}$$

➤ CO₂ : **422.71 ppm** (Ağustos 2024 - <https://www.co2.earth/>)

$$\text{➤ } \Delta m_C = m_a \frac{M_C}{M_a} \cdot \Delta C_{CO_2} = 5.2 \times 10^{18} \cdot \frac{12 \times 10^{-3}}{29 \times 10^{-3}} \cdot (422.71 \times 10^{-6} - 280 \times 10^{-6})$$

$$\text{➤ } \Delta m_C = 3.07 \times 10^{14} \text{ kg} = 307 \text{ milyar ton}$$

Daniel J. Jacob'un "Introduction to Atmospheric Chemistry" kitabından uyarlanmıştır.

Problem

- Toplam atmosferdeki kütlenin ne kadarı troposferdedir?

- $$\frac{P_{tropopoz}}{P_{yüzey}} = \frac{100 \text{ hPa}}{1000 \text{ hPa}}$$

- $F_{troposfer}$: troposfer fonksiyonu

- $$F_{troposfer} = 1 - \frac{P_{tropopoz}}{P_{yüzey}} = 0.90$$

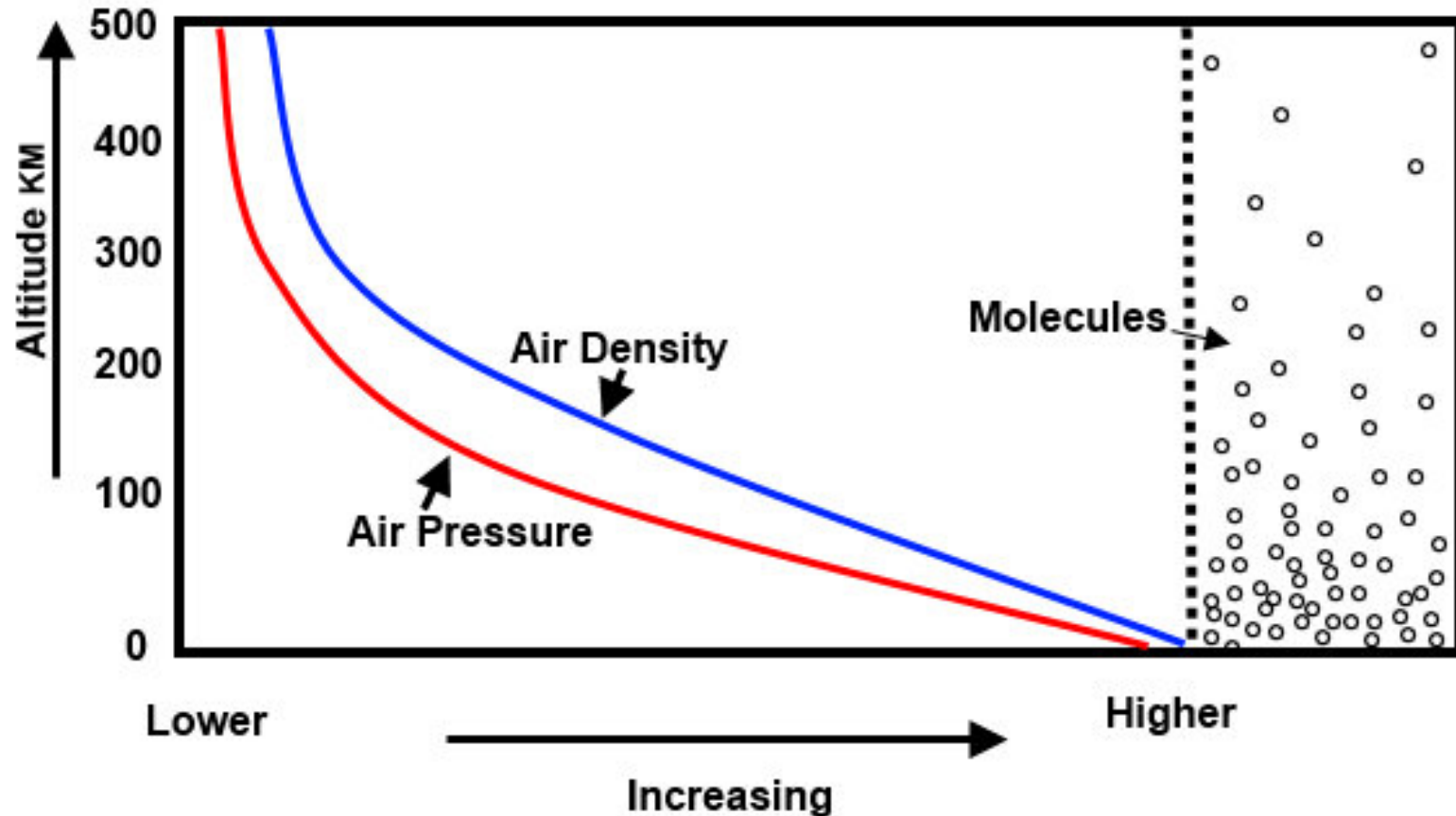
- Toplam atmosferdeki kütlenin ne kadarı stratosferdedir?

- $P_{stratopoz} = 0.9 \text{ hPa}$

- $$F_{stratosfer} = \frac{P_{tropopoz} - P_{stratopoz}}{P_{yüzey}} = 0.099$$

Atmosferin Kütle Dağılımı

The Decrease of Air Pressure and Air Density with Altitude



- Troposfer = % 90
- Stratosfer = % 9.9
- Mezosfer = % 0.1

Atmosferik Taşınım

- Atmosfer içinde ısının ya da diğer özelliklerin dikey hareketine **Konveksiyon** (convection) denilir.
- Atmosfer içinde ısının ya da diğer özelliklerin yatay hareketine **Adveksiyon** (advection) denilir.

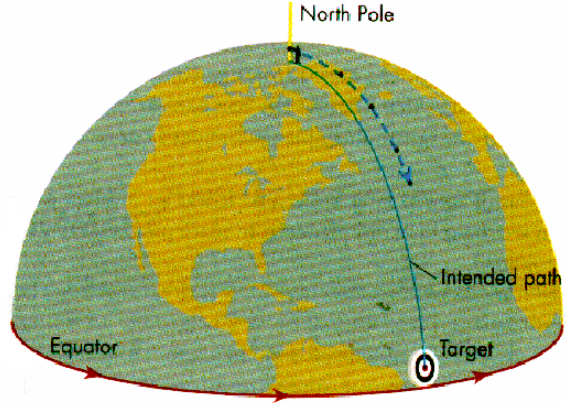
Atmosferik Taşınım

Atmosferik taşınımında etkin olan kuvvetler:

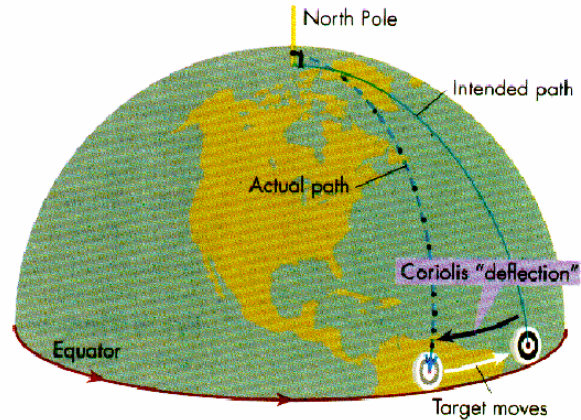
- Yerçekimi
- Basınç gradyanı
- Coriolis kuvveti

- **Yataydaki taşınım** basınç gradyanı ile coriolis kuvveti arasındaki dengeye bağlıdır.
- **Dikeydeki taşınım** yerçekimi ile basınç gradyanı arasındaki dengeye bağlıdır.

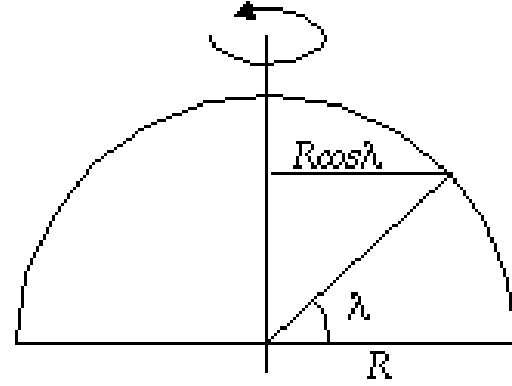
Coriolis Kuvveti



Rotating Earth



Rotating Earth



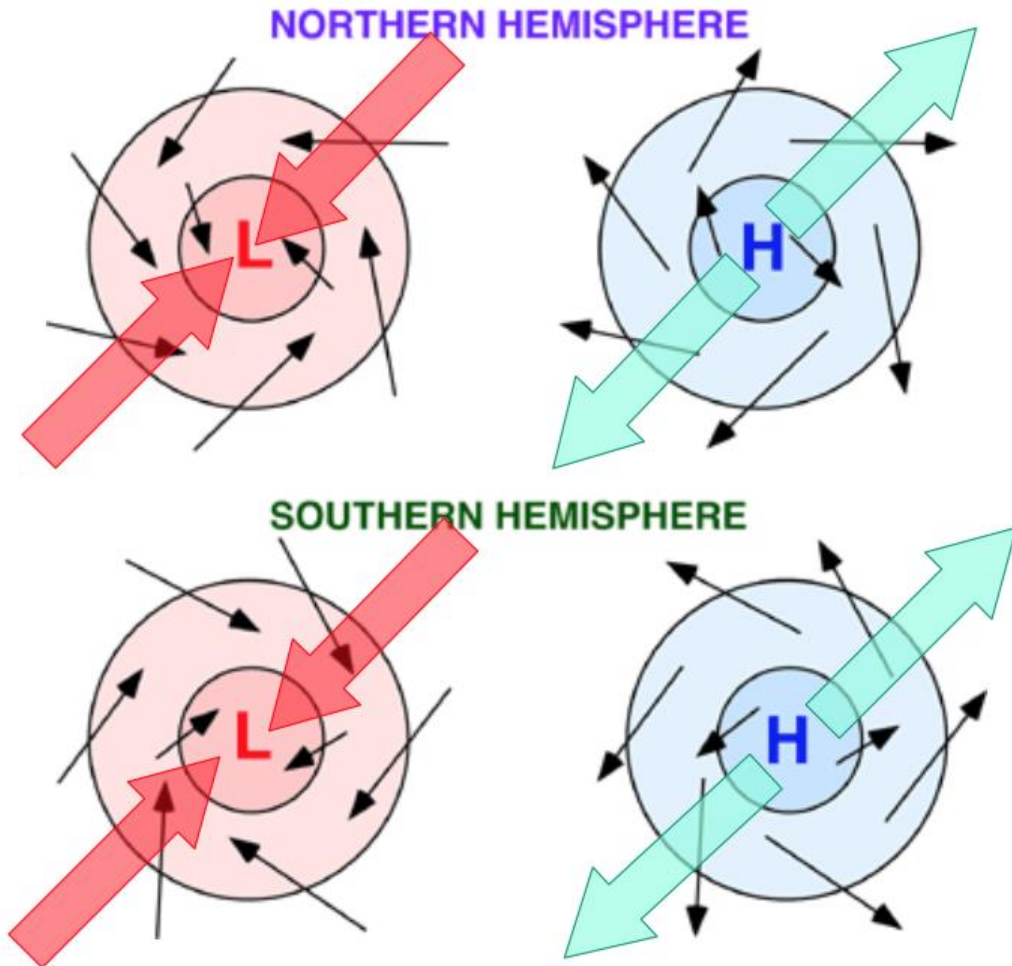
- Kuzey yarım kürede bütün sapmalar sağ tarafa doğru olur.
- Güney yarım kürede bütün sapmalar sol tarafa doğru olur.
- Ekvatorda coriolis kuvveti sıfırdır.

Coriolis Etkisi Video

https://www.youtube.com/watch?v=mcPs_OdQOYU

Alçak ve Yüksek Basınç

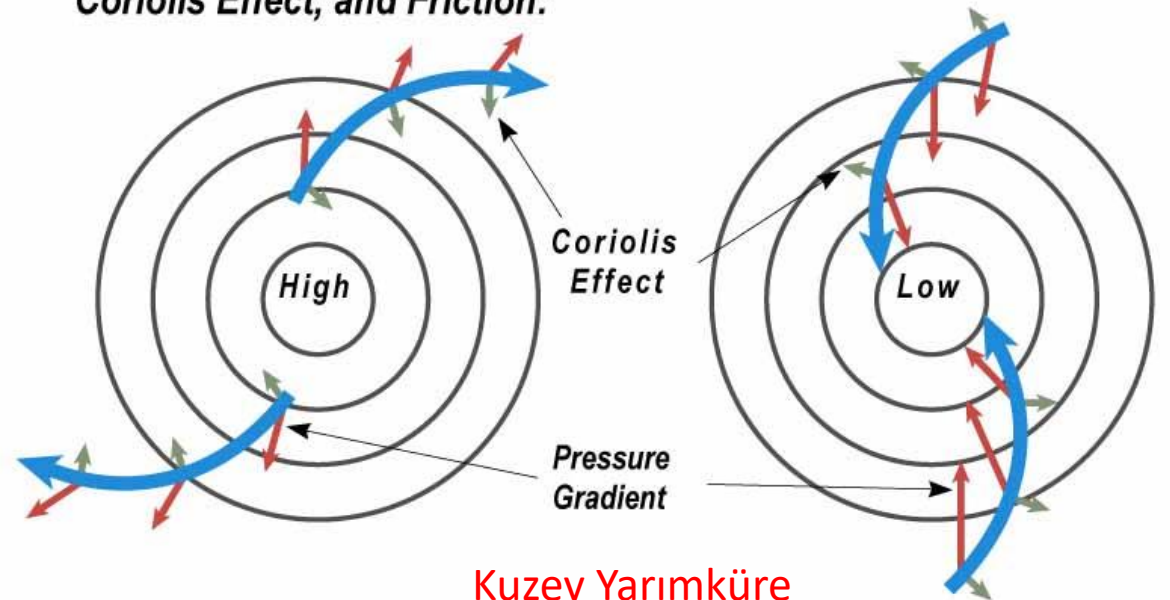
Air motion in cyclones & anticyclones



Anticyclones

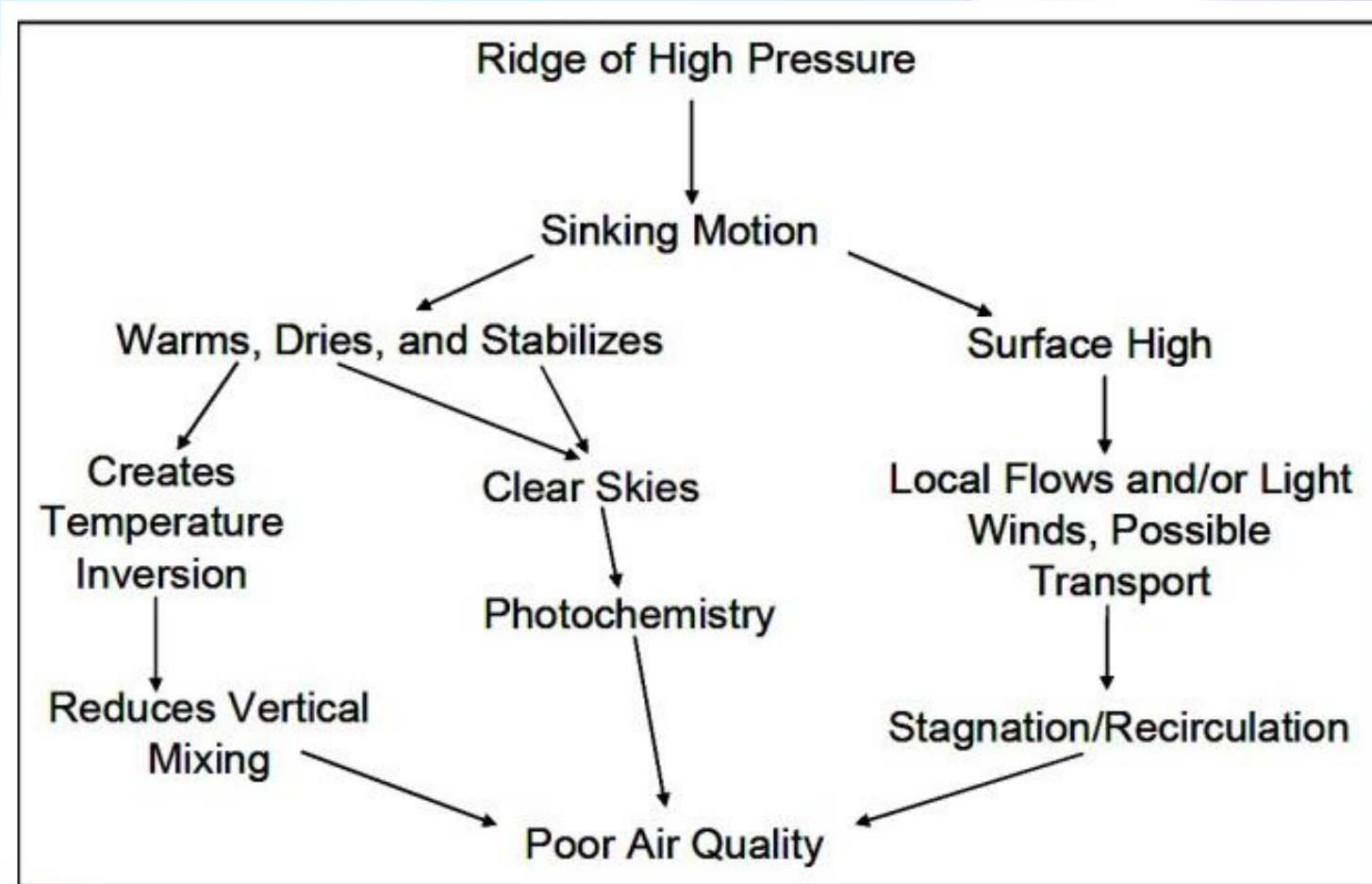
Cyclones

Lower Atmosphere---Pressure Gradient Force,
Coriolis Effect, and Friction:



Kuzey Yarımküre

Yüksek Basınç - Hava Kalitesi İlişkisi



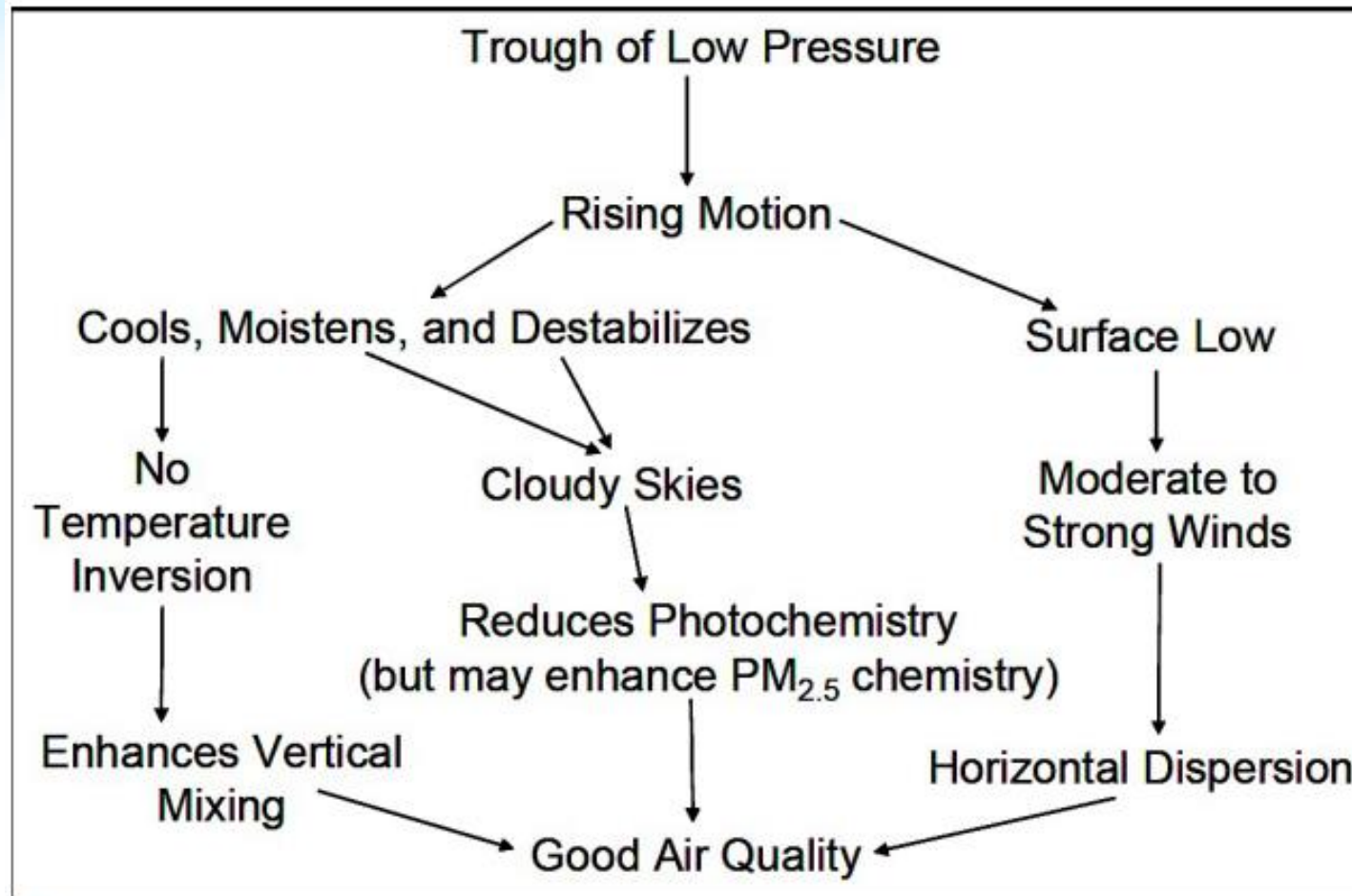
Introduction to Air Quality Forecasting

Pawan Gupta & Melanie Follette-Cook

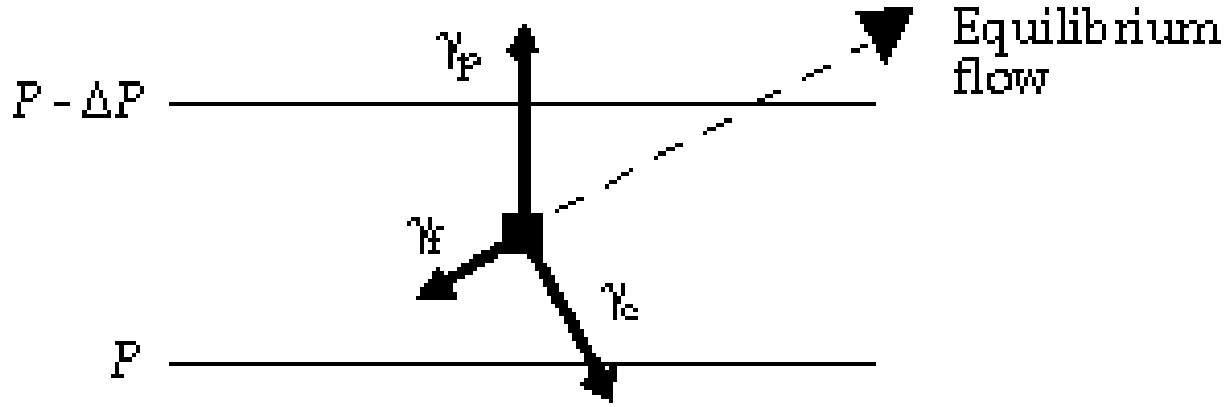
September 23, 2021

<https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-introduction-and-access-global-air-quality-forecasting-data-and>

Alçak Basınç - Hava Kalitesi İlişkisi

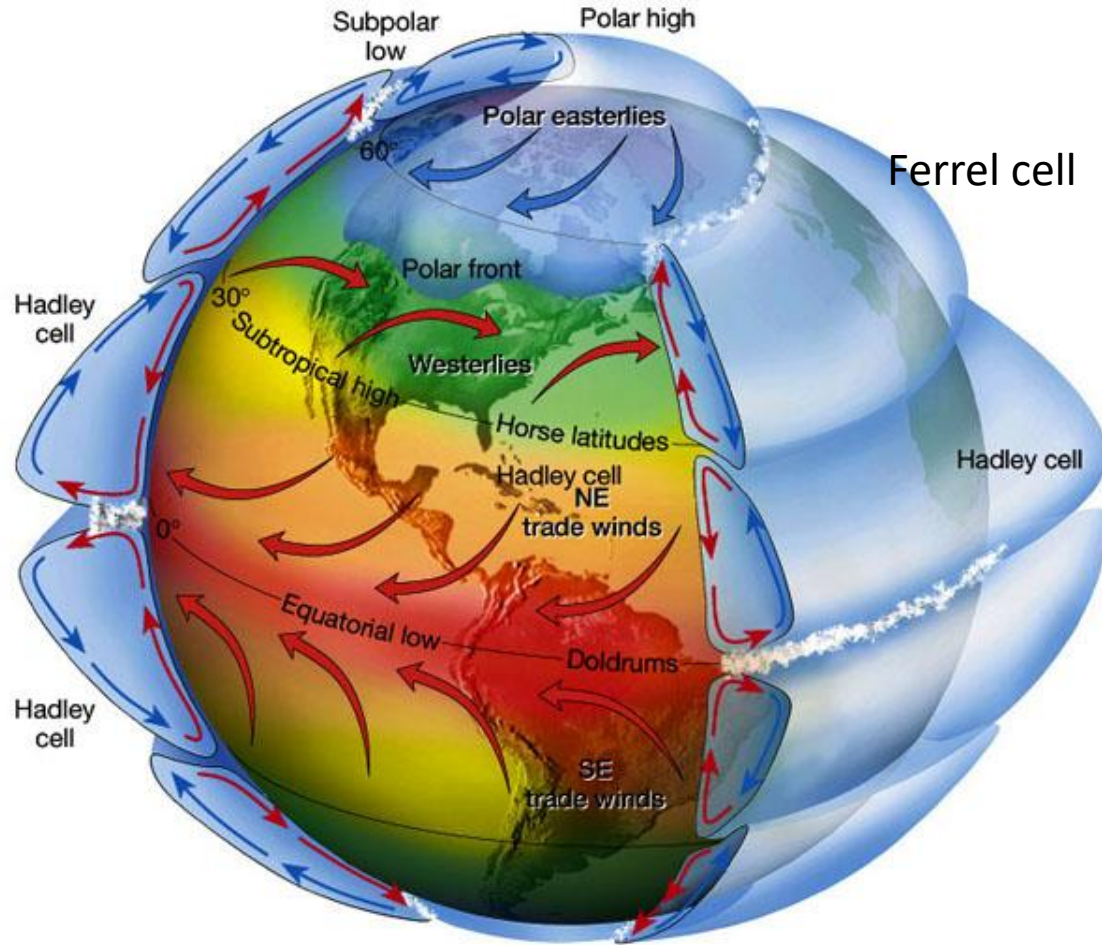


Hava Parseline Yatayda Etki Eden Kuvvetler



- $\gamma_c = 2 \cdot w \cdot V \cdot \sin \lambda$
- γ_c : coriolis ivmesi
- w : dünyanın açısal hızı
- V : nesnenin dünyadaki hızı
- λ : Enlem
- $\gamma_p = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla \cdot P$
- γ_p : basınç ivmesi
- $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$
- ∇ : gradyan vektörü
- γ_f : sürtünme ivmesi

Rüzgar Hareketleri

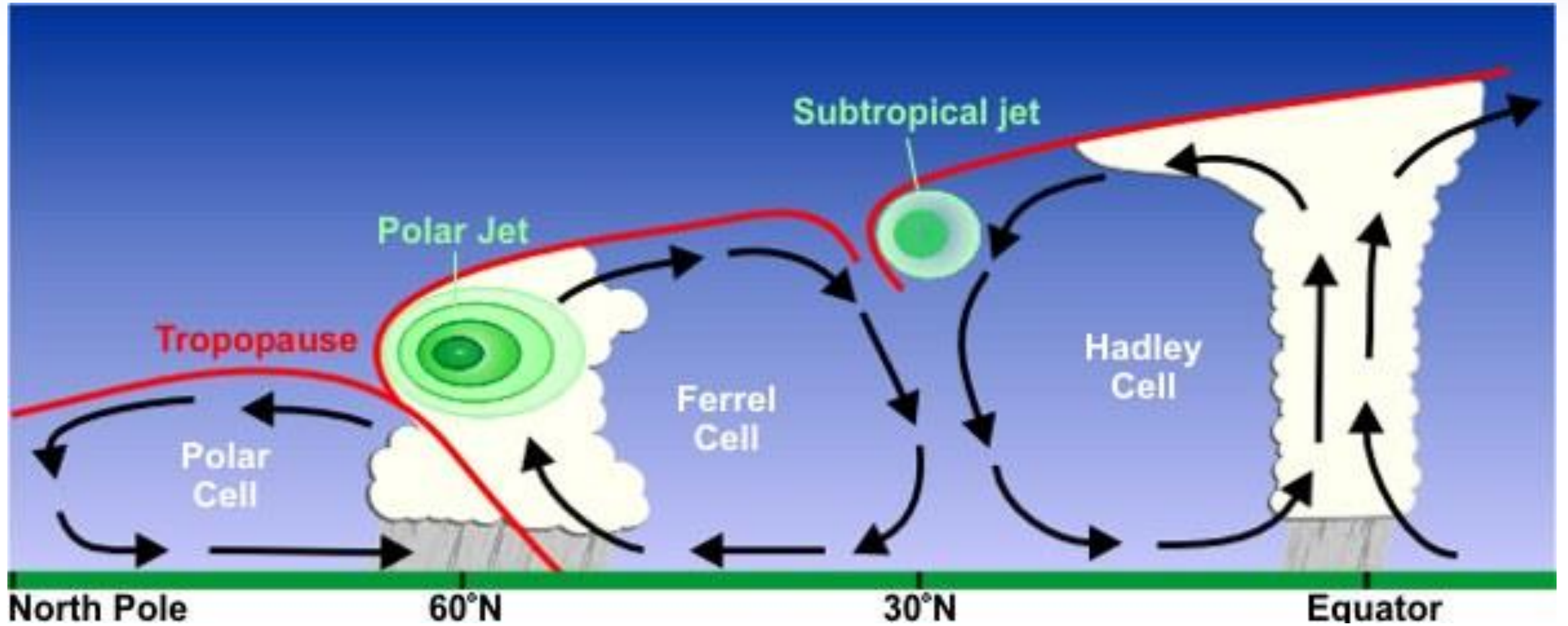


- Ekvator bölgesi: Intertropical Convergence Zone (ITCZ)
- 20° – 30° enlemler: doğu rüzgarları
- 30°: yüksek basınç bölgesi
- 30°'den yukarı enlemler: batı rüzgarları

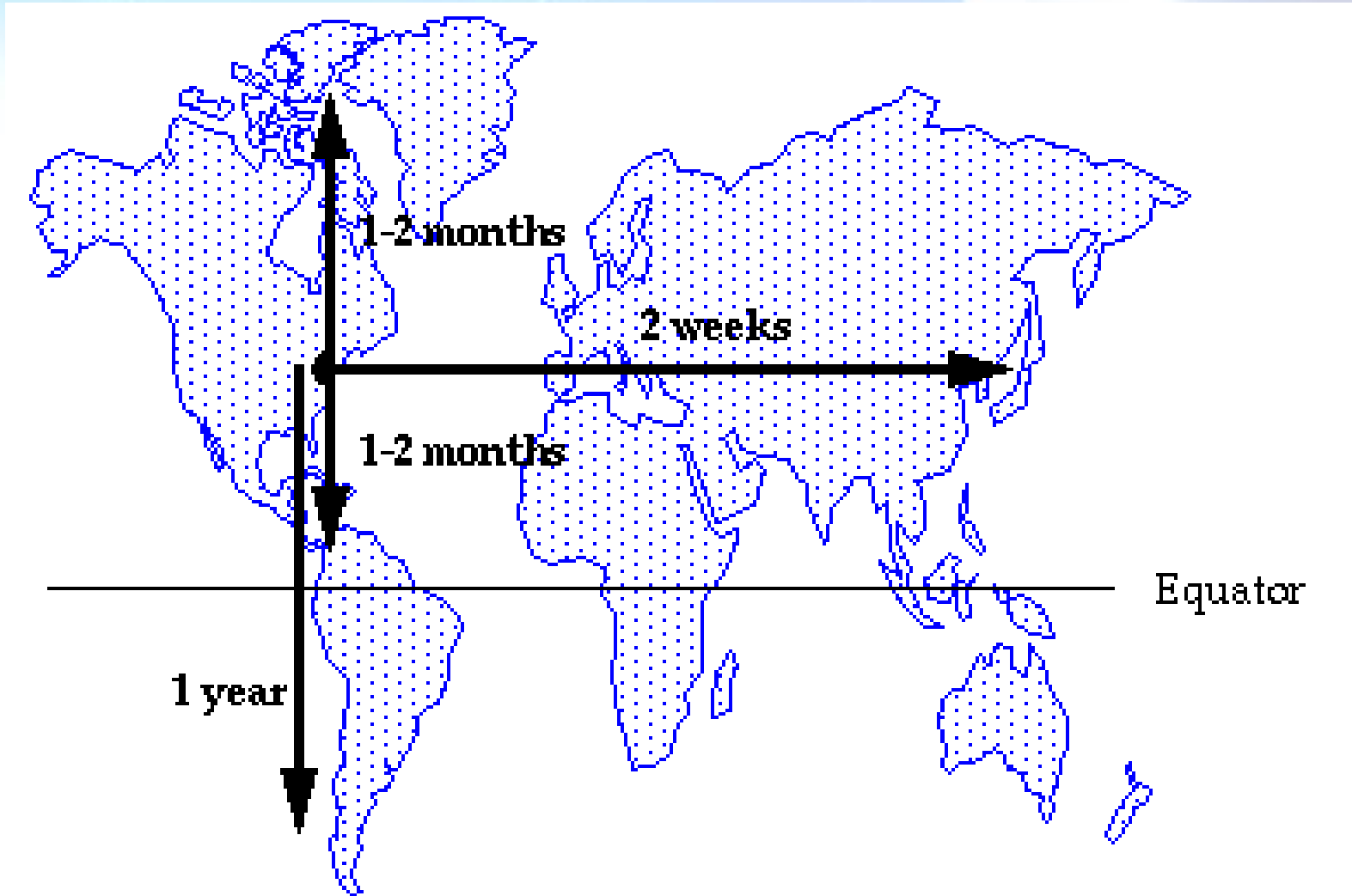
Rüzgar hareketleri video

<https://www.youtube.com/watch?v=Ye45DGkqUkE>

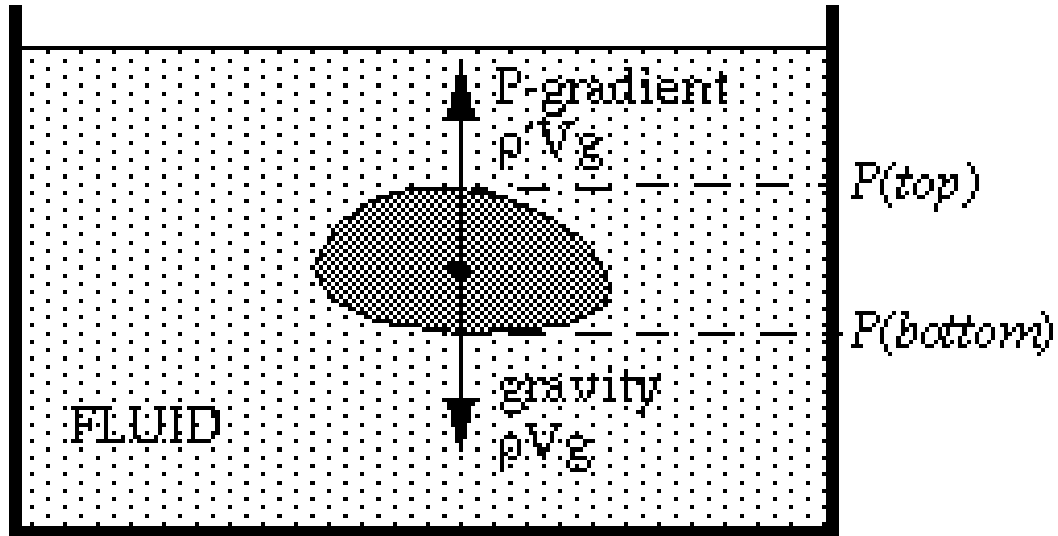
Tropopoz yüksekliği



Atmosferde Yatay Taşınım



Havanın Kaldırma Kuvveti (Bouyancy)



➤ $F_{net} = (\rho' - \rho) \cdot Vg$

➤ $\gamma_b = \frac{\rho' - \rho}{\rho} \cdot g$

➤ γ_b : bouyancy ivmelenmesi

➤ ρ' : cismin özkütlesi

➤ ρ : akışkanın özkütlesi

➤ g : yerçekimi ivmesi

➤ İdeal gaz kanunundan $\rho \sim 1/T$

➤ $\gamma_b = \frac{1/T' - 1/T}{1/T} \cdot g = \frac{T - T'}{T} \cdot g$

Atmosferik Stabilite

- Kuru havanın adiyabatik yükselmesi (Dry adiyabatik lapse rate)

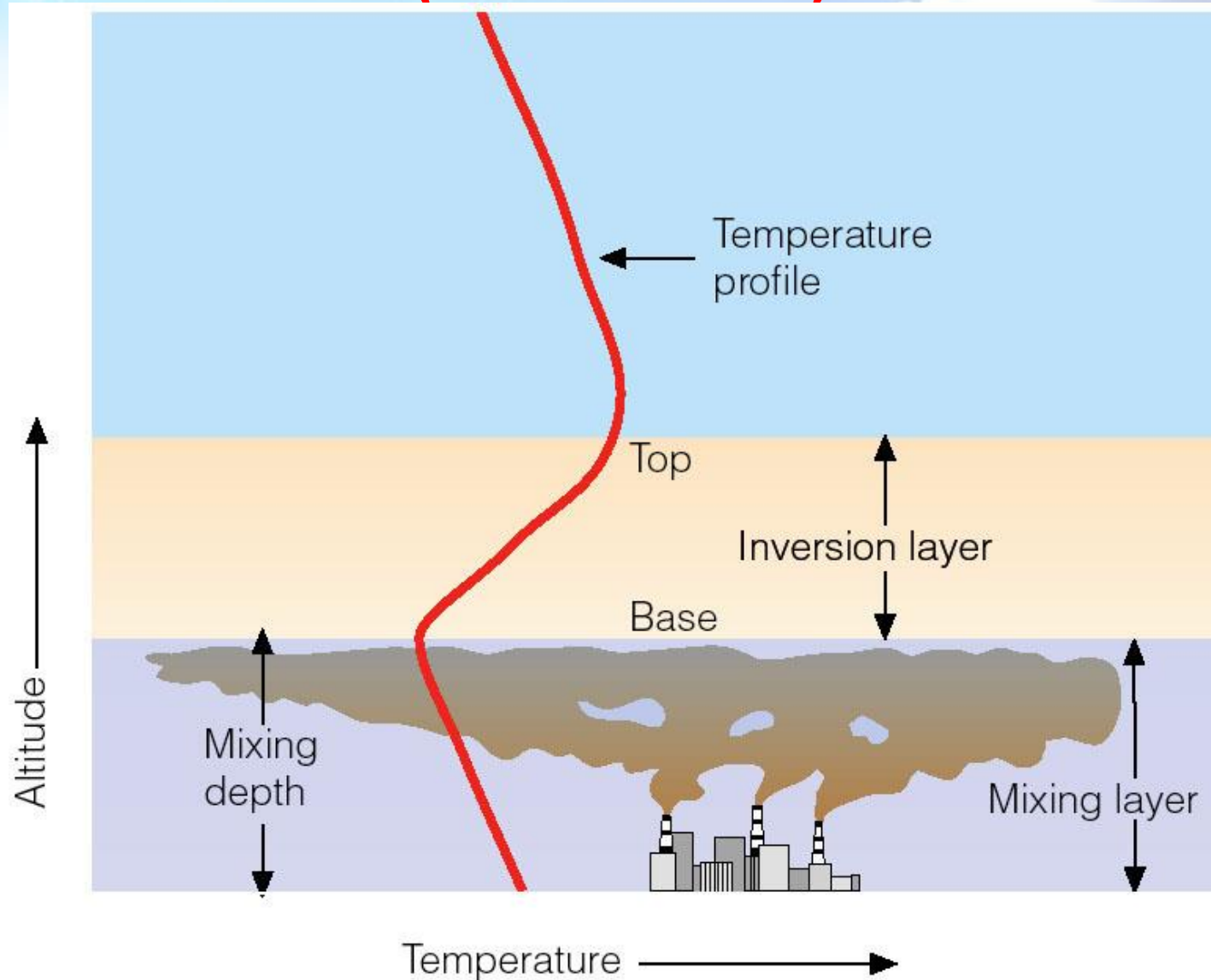
$$\Gamma = -dT / dz = \frac{g}{C_p} = 9.8 \text{ K km}^{-1}$$

- Adiyabatik: ısı alışverişi yok ($dQ=0$)
- $-dT/dz$: lapse rate
- $C_p: 1.0 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (havanın ısı kapasitesi)
- Sıcaklık her 100 metrede yaklaşık 1°C azalır.

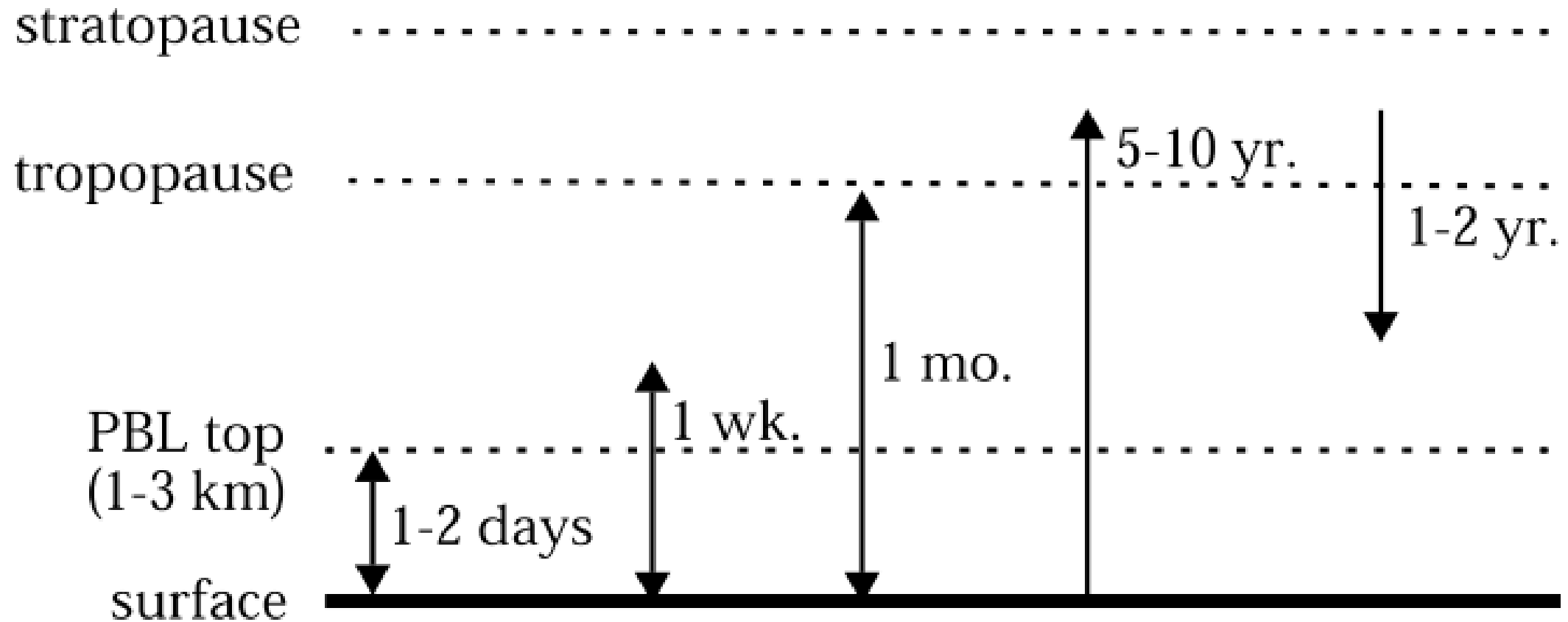
Bazı Tanımlar

- Yatayda hava hareketlerinin kesilmesi: rüzgarsız hava (**calm**)
- Dikeyde artan hava sıcaklığı nedeniyle hava hareketinin engellenmesi: inversiyon veya sıcaklık terslemesi (**inversion**)
- Yatay ve dikeyde hava hareketinin 24 saatten fazla gerçekleşmesi: durağanlık (**stagnation**)
- Durağanlık ile birlikte kirletici konsantrasyonlarının artması: epizod (**episode**)

Sıcaklık Terslemesi (Inversion)



Atmosferde Dikey Taşınım



Meteorolojinin Hava Kalitesine Etkileri

- Kirleticilerin kaynaktan alıcıya kadar olan taşınım meteorolojik olayların etkisi ile gerçekleşir:
- Yatay taşınım rüzgar hızı ve yönüne bağlıdır.
- Dikey taşınım basınca bağlıdır.
- Sıcaklık profili de taşınımında etkilidir (inversiyon).
- Fotokimyasal reaksiyonlar güneş radyasyonuna bağlı gerçekleşir.
- Sulu fazda gerçekleşen reaksiyonlar su konsantrasyonuna bağlıdır.
- Yağış ile kirletici giderimi gerçekleşir (yaş çökeltme).

Hava Kirliliğinin Meteorolojiye Etkileri

- Ozon ve PAN gibi kirleticiler fotokimyasal sisi oluşturur.
- Sis, güneş radyasyonunu engelleyerek yerel meteorolojik şartları değiştirir.
- Aerosoller güneş radyasyonunu engelleyerek yerel meteorolojik şartları değiştirir.
- Toz taşınimleri çamurlu yağmur yağmasına sebep olur.
- Sera gazı konsantrasyonlarının artması iklim değişikliğine ve dolayısıyla rüzgar, sıcaklık ve yağış gibi meteorolojik faktörlerin değişmesine sebep olur.