

AERODİNAMİK NEDİR?

Atmosfer içerisinde

- yüksek hızla hareket eden cisimlerin ve
- yüksek hızdaki rüzgara maruz kalan hareketli ve hareketsiz cisimlerin
- etrafında meydana gelen akım olaylarını inceleyen; bu cisimler üzerine hava ile temas nedeniyle etkiyen yükleri (kuvvet ve momentler) araştıran,
- istenilen kuvvet ve momentleri sağlayabilecek geometrileri tasarlayan

bilim dalıdır.

AERODİNAMİĞİN İLGİLENDİĞİ PROBLEMLER

Analiz problemi

Cisim geometrisi ve akım şartları verildiğinde cisim etrafındaki akım alanının ayrıntılı incelenmesi ve/veya cisme etkiyen kuvvet ve momentlerin tespit edilmesi

Dizayn (veya tasarım) problemi

İstenilen performansı sağlayacak şekilde cismin geometrisinin tespit edilmesi

AERODİNAMİĞİN İLĞİ ALANLARI

- Hava-uzay ulaşım araçları (uçak, planör, helikopter, RPV, UAV, balon, zeplin, roket, füze, mermi, uzay mekiği, paraşüt, yelken-kanat, yamaç paraşütü)
- Kara ulaşım araçları (yüksek hızla hareket eden otomobil, otobüs, kamyon, TIR, trenlerin direnç, kararlılık, konfor sorunları, kayak, bisiklet, motosiklet ve binicileri)
- Deniz ulaşım araçları (Hidrofoil kullanan tekneler, katamaranlar, sürat tekneleri için hidro/aero problemleri)
- Yapılar (Çatı problemleri, Binalar üzerinde statik ve dinamik rüzgar yükleri, asma köprülerin dinamik yükleri, masif binaların, stadyumların rüzgar yükleri, harici asansörlerin rüzgar problemleri, masif binaların çevre etkileri)
- Enerji (Rüzgar enerjisi)
- Diğer (soğutma, havalandırma vb.)

AERODİNAMİĞİN İNCELEME TARZI

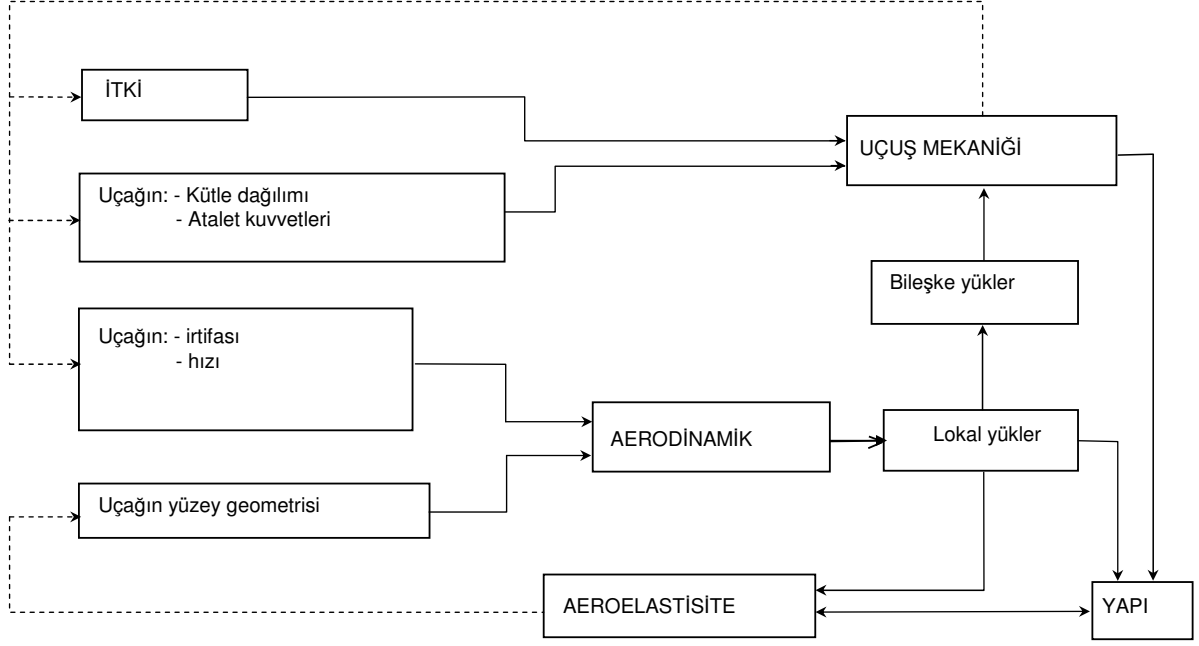
Deneysel çalışmalar

Rüzgar tüneli deneyleri
Uçuş tecrübeleri

Teorik çalışmalar

Analitik çözümler
Sayısal çözümler

AERODİNAMIĞIN İLGİLİ BİLİM DALLARI ARASINDAKİ YERİ



TEMEL BOYUTLAR, BİRİM SİSTEMLERİ

Temel Boyut	SI	MKS	İngiliz Sistemi
Kütle	Kg	--	Slug
Uzunluk	m	m	Foot
Zaman	sn	sn	Sn
Sıcaklık	°C	°C	°F
Kuvvet	--	kgk	--

BOYUT ANALİZİ, BOYUT UYUMU

Bir eşitlikteki bütün terimler aynı boyutta olmalıdır.

$$F = m \cdot a$$

F : Kuvvet [MLT⁻²]

m : Kütle [M]

a : İvme [LT⁻²]

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

L : Kuvvet [MLT⁻²]

ρ : Yoğunluk [ML⁻³]

V : Hız [LT⁻¹]

S : Alan [L²]

Sİ BİRİMLERİ

Büyüklik	Temel boyutları a ifadesi	Tanımı	Alışlagelmiş birimi	Temel birimlerle ifadesi	Kullanılan diğer bazı birimler
Kütle	M	Kütle	kg	kg	1 gr = 10 ⁻³ kg
Uzunluk	L	Uzunluk	m	m	mm, cm, km, ...
Zaman	T	Zaman	s	s	1 h = 3600 s
Sıcaklık	θ	Sıcaklık	°C,°K	°C,°K	
Hız	LT ⁻¹	Uzunluk / Zaman	m/s	m/s	1 km/h = 1/3.6 m/s
İvme	LT ⁻²	Hız / Zaman	m/s ²	m/s ²	
Kuvvet- Ağırlık	MLT ⁻²	Kütle × İvme	N (Newton)	kg m/s ²	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
Moment	ML ² T ⁻²	Kuvvet × Uzunluk	N.m	kg m ² /s ²	
Yoğunluk	ML ⁻³	Kütle / Hacım	kg/m ³	kg/m ³	1 gr/cm ³ = 10 ³ kg/m ³
Basınç	ML ⁻¹ T ⁻²	Kuvvet / Alan	Pa (Pascal)	N/m ² =kg/ms ²	1 bar = 10 ⁵ Pa 1 mmHgS = 133.42Pa 1 mm SS = 9.81 Pa
İş-Enerji	ML ² T ⁻²	Kuvvet × Uzunluk	J (joule)	N.m	1 erg = 10 ⁻³ J
Güç	ML ² T ⁻³	İş / Zaman	W (Watt)	J/s	1kW = 10 ³ W
Mutlak viskozite	ML ⁻¹ T ⁻¹	Teğetsel Gerilme / hız gradyanı	PI (Poiseuille)	Pa s = N.s/m ²	1 Poise = 10 ⁻¹ PI
Kinematik viskozite	L ² T ⁻¹	Mutlak viskozite / yoğunluk	m ² /s	m ² /s	

İNGİLİZ BİRİMLERİ

Büyükük	İngiliz birimi	SI birimi	UK-SI Geçişi
Uzunluk	in, ft, st mile n mile	m, cm	1 in = 2.54 cm 1 ft = 0.3048 m 1 st mile = 1609.3 m 1 n mile = 1853.2 m
Sıcaklık	$^{\circ}\text{F}$, $T (^{\circ}\text{R}) = T (^{\circ}\text{F}) + 459.4$	$^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{T} (^{\circ}\text{F}) = 1.8 \times T (^{\circ}\text{C}) + 32$
Kütle	Slug, Libre	kg	1 slug = 14.5939 kg 1 lb = 0.4536 kg
Kuvvet	Pound	N	1 lbf = 4.4482 N
Yoğunluk	Slug / ft ³	kg / m ³	1 slug/ft ³ = 515.38 kg/m ³
Hız	ft / s, stmile/h, knot	m/s, km/saat	1 ft/sec = 0.3048 m/s 1 mph = 0.44704 m/s 1 knot = 0.5144 m/s = 1.853 km/h
İvme	ft / s ²	m / s ²	1 ft/sec ² = 0.3048 m/s ²
Basınç	PSI (lbf/in ²)	Pa (N / m ²)	lbf/in ² = 6894.8 Pa lbf/ft ² = 47.880 Pa
İş-Enerji	lbf.ft	J	lbf.ft = 1.3558 J
Güç	HP	W	1 hp = 745.7 W
Mutlak viskozite	Lbf.sec / ft ²	N s/m ² , kg/ms, Pa.s	1 lbf.sec/ft ² = 47.88 N.s/m ²
Kinematik viskozite	Ft ² / sec	m ² /s	1 ft ² /sec = 0.0929 m ² /s

AKIŞKAN ÖZELLİKLERİ

Maddenin halleri

Katı, sıvı, gaz, plazma

Moleküller arası bağ, ortalama serbest yörünge

Sürekli ortam kabulü

AKIŞKAN ÖZELLİKLERİ

Basınc:

Akışkan moleküllerinin ortalama konumları etrafında yaptıkları sürekli-rastgele titreşim hareketi nedeniyle, bu akışkanla temas halinde bulunan herhangi bir katı cidar üzerinde yarattıkları çarpma etkisi

$$[\text{Kuvvet} / \text{Alan}] : [M L^{-1} T^{-2}] \quad \text{Pa (N/m}^2\text{)}, \quad 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Sıcaklık

Aynı titreşim hareketinin kinetik enerjisi sıcaklık olarak hissedilir

$$T [\text{°K}] = 273.16 + t [\text{°C}]$$

Yoğunluk,

$$[\text{Kütle} / \text{Hacim}] : [M L^{-3}]$$

Viskozite

Akışkan tabakalarının birbiri üzerinde kaymaya karşı gösterdikleri direncin bir ölçüsü

$$\text{Mutlak viskozite katsayısı (Kayma gerilmesi / hız gradyanı)} \quad \mu = \frac{\tau}{\partial u / \partial y}$$

$$[M L^{-1} T^{-1}], \quad (P = \text{Pas} = \text{kg/ms} = \text{Ns/m}^2)$$

Kinematik viskozite katsayısı

$$\nu = \mu / \rho$$

$$[L^2 / T], \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

Elastisite

Akışkanın sıkıştırılabilme özelliği

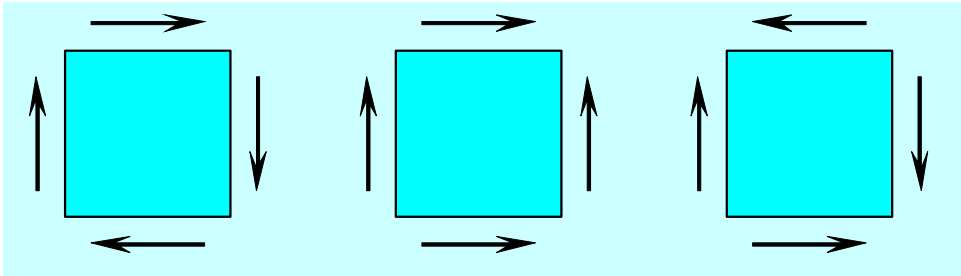
$$K = \frac{\partial p}{-\delta V / V}$$

Isıl özellikler

$$c_p, c_v, \gamma = c_p / c_v, R = c_p - c_v$$

AEROSTATİK

Hareketsiz akışkan ortamında kuvvetler



Teğetsel kuvvet oluşmaz, sadece normal kuvvetler vardır

AEROSTATİK

Pascal kanunu

Akışkanın göz önüne alınan herhangi bir noktasındaki basınç her yönde aynıdır.

AEROSTATİK

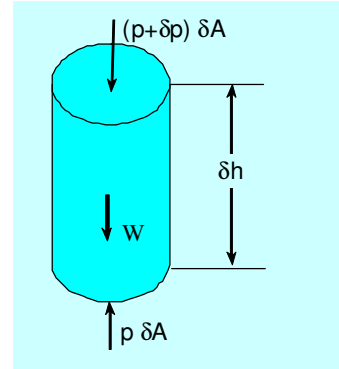
Hidro/Aero-statik taşıma (buoyancy)

$$(p + \delta p) \cdot \delta A + W - p \cdot \delta A = 0$$

$$W = \rho \cdot g \cdot \delta A \cdot \delta h$$

$$\frac{\delta p}{\delta h} = -\rho \cdot g$$

$$\boxed{\frac{dp}{dh} = -\rho \cdot g}$$



AEROSTATİK

Hidro/Aero-statik taşıma denklemi

$$\frac{dp}{dh} = -\rho \cdot g$$

- Basınçların ölçülmesi
- Standart atmosfer özellikleri
- Aerostatik taşıma

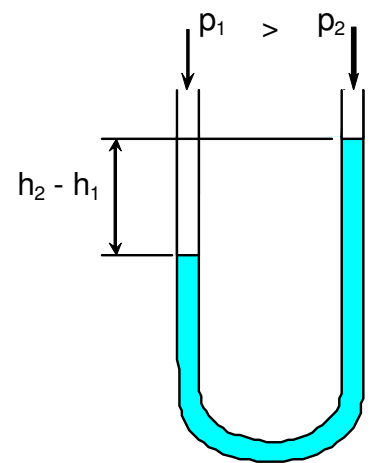
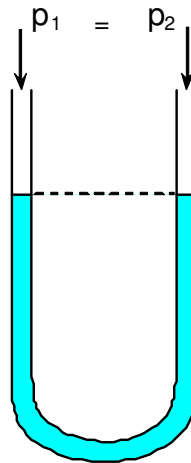
Basınçların ölçülmesi

$$\frac{dp}{dh} = -\rho \cdot g$$

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\int_{h_1}^{h_2} \rho g dh$$

$$p_1 - p_2 = \rho g \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\Delta p = \rho g \cdot \Delta h$$



Basınçların ölçülmesi

ÖRNEK

Bir deney sırasında, iki farklı noktadaki basınçların tatbik edildiği bir U tüpünün kolları arasındaki seviye farkı 25 mm olarak ölçülmüştür. U tüpünde sıvı olarak, yoğunluğu $\rho=0.82 \text{ gr/cm}^3$ olan alkol kullanıldığına göre basınç farkını hesaplayınız.

Çözüm:

$$\Delta h = 25 \text{ mm} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 0.82 \text{ gr/cm}^3 = 0.82 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = 0.82 \cdot 10^3 \times 9.81 \times 25 \cdot 10^{-3} = 201.1 \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)}$$

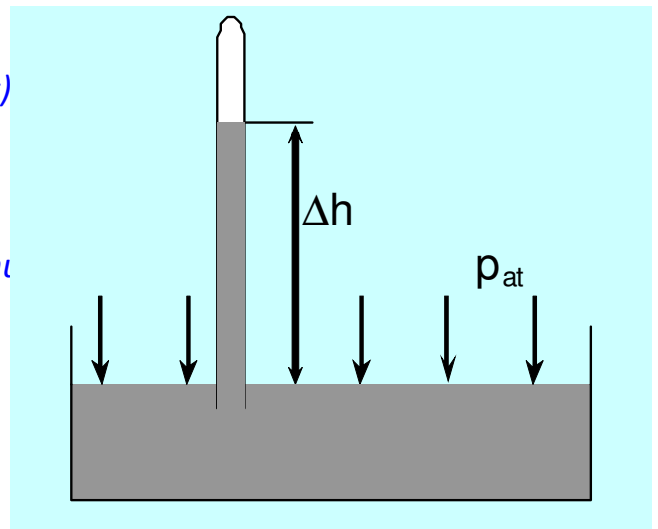
Basınçların ölçülmesi

ÖRNEK

Toriçelli deneyinde şekilde görüldüğü gibi civalı bir kap-boru vasıtasıyla atmosfer basıncı ile boşluk (sıfır basınç) arasındaki fark mm civa sütunu olarak ölçülür.

Toriçelli deneyinde 760 mm Civa Sütunu okunan bir günde atmosfer basıncının kaç bar olduğunu hesaplayınız. (Not: Civanın yoğunluğu 13.6 gr/cm^3 alınacaktır.)

Şayet sıvı olarak su kullanılsaydı ne olurdu, inceleyiniz.



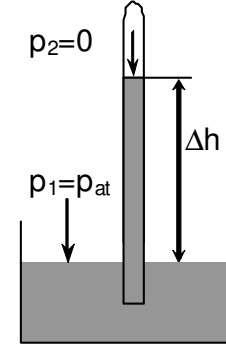
Çözüm:

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = p_{at} \\ p_2 = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta h = 760 \text{ mmHgS} = 760 \cdot 10^{-3} \text{ mHgS}$$

$$\rho_{hg} = 13.6 \text{ gr/cm}^3 = 13.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\begin{aligned} p_{at} &= \rho_{hg} g \Delta h = 13.6 \cdot 10^3 \times 9.81 \times 760 \cdot 10^{-3} \\ &= 101396.2 \text{ Pa} = 1.014 \text{ bar} \end{aligned}$$



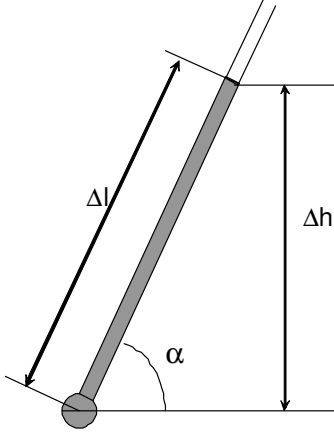
Aynı basıncı ölçmek için sıvı olarak su kullanılsaydı

$$\begin{aligned} \rho_{su} = 1 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \Delta h &= \frac{p_{at}}{\rho_{su} \cdot g} = \frac{101396.2}{1 \times 9.81} = 10336 \text{ mmSS} \\ &\cong 10 \text{ mSS} \end{aligned}$$

Manometre sıvısının önemi

		$\Delta p = 1500 \text{ Pa}$	$\Delta p = 150 \text{ Pa}$
Civa	$\Delta h = \frac{\Delta p}{13.6 \times g}$	$\Delta h = 11.2 \text{ mmHgS}$	$\Delta h = 1.12 \text{ mmHgS}$
Su	$\Delta h = \frac{\Delta p}{1 \times g}$	$\Delta h = 153 \text{ mmSS}$	$\Delta h = 15.3 \text{ mmSS}$
Alkol	$\Delta h = \frac{\Delta p}{0.82 \times g}$	$\Delta h = 186.5 \text{ mmAS}$	$\Delta h = 18.7 \text{ mmAS}$

Manometrenin eğilmesinin önemi

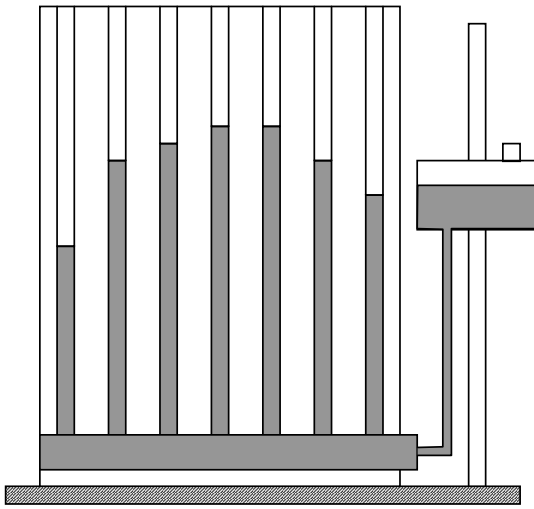


$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

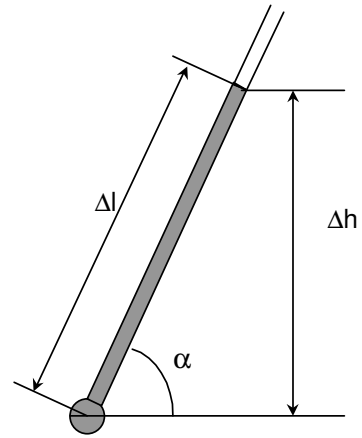
$$\Delta l = \frac{\Delta h}{\sin \alpha}$$

$\alpha=60^\circ$	için	$\Delta l = 1.155 \Delta h$
$\alpha=45^\circ$	için	$\Delta l = 1.414 \Delta h$
$\alpha=30^\circ$	için	$\Delta l = 2.000 \Delta h$
$\alpha=15^\circ$	için	$\Delta l = 3.864 \Delta h$

Çok Sütunlu Manometreler



(a)



(b)

Eğilebilir multi-manometre

Atmosfer

Atmosferin bileşimi

% 21.017 : Oksijen

% 78.050 : Azot

Kalan kısım : Hidrojen, Helyum, Argon, Kripton, Neon, Ksenon, Su buharı

Atmosferin katmanları

Troposfer

Stratosfer

İyonosfer

Egzosfer

Standart Atmosfer

ISA – International Standart Atmosphere

ICAO – International Civil Aviation Organisation

a) Deniz seviyesinde sıcaklık : 15°C
basınç : 760 mm HgS

b) Hava kuru ve mükemmel bir gazdır: $p = \rho RT$

c) Yer çekimi irtifa ile değişmez

d) Sıcaklık çeşitli tabakalarda lineer değişim gösterir.

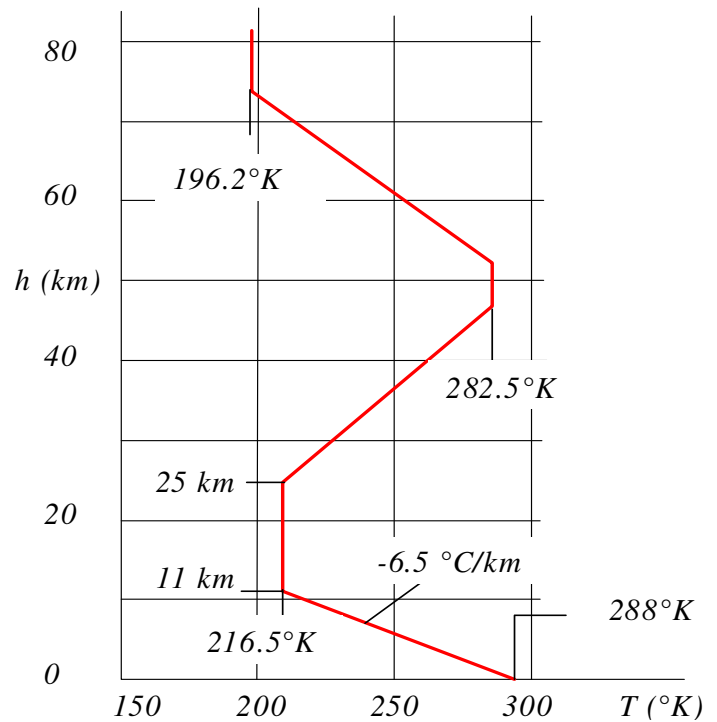
Deniz Seviyesinde Standart Atmosfer Koşullarında Havanın Özellikleri

Basınç	P	760 mm HgS 101396 Pa	29.91 in HgS 14.71 psi
Sıcaklık	T	15 °C 288 °K	59 °F 518.4 °R
Yoğunluk	$\rho = p/RT$	1.2267 kg/m ³	0.002377 slug / ft ³
Mutlak viskozite	μ	1.784.10 ⁻⁵ Pas	3.726.10 ⁻⁷ slug/ft sec
Kinematik viskozite	ν	1.46 10 ⁻⁵ m ² /sn	1.5671 .10 ⁻⁴ ft ² / sec
Sb basınçta özgül ısı	c_p	1005 J/kg°K	6008 ft.pound/slug°R
Sb hacimde özgül ısı	c_v	718 J/kg°K	4293 ft.pound/slug°R
Gaz sabiti	R	287 J/kg°K	1718 ft.pound /slug°R
Özgül ısılar oranı	γ	1.4	1.4

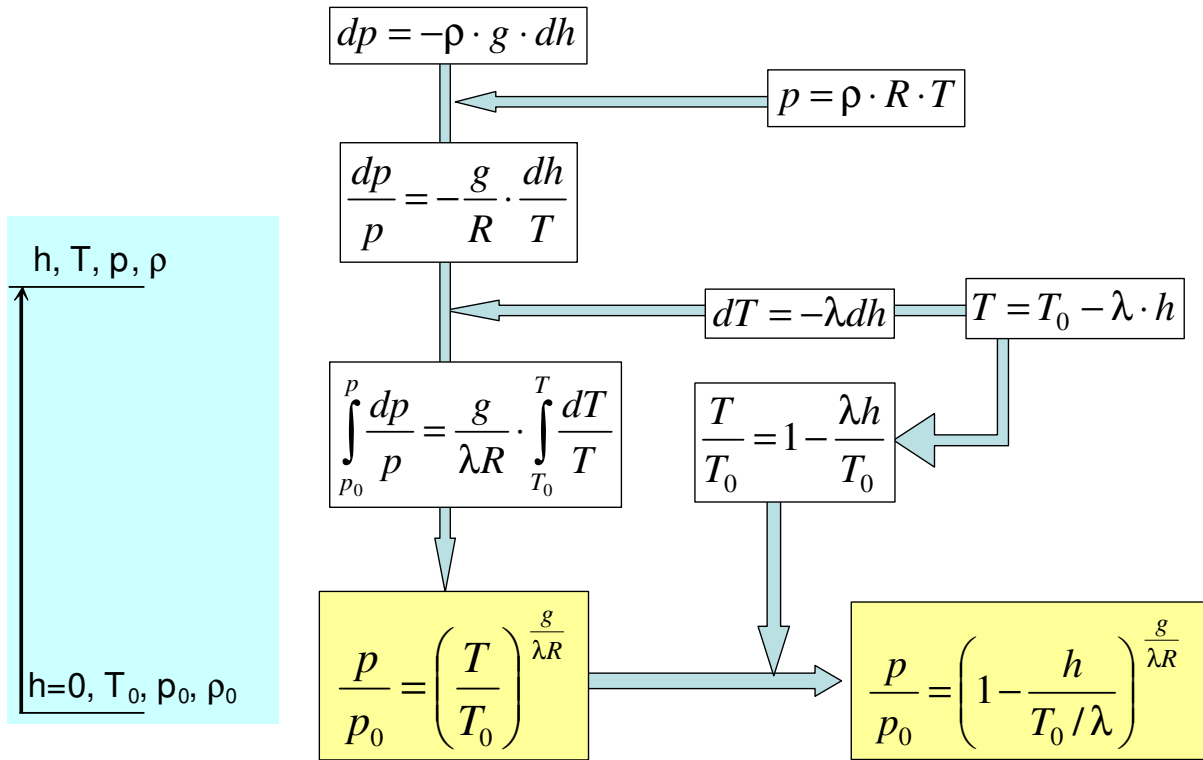
Standart Atmosfer içerisinde sıcaklık değişimi

h(m) dT/dh (°/km)

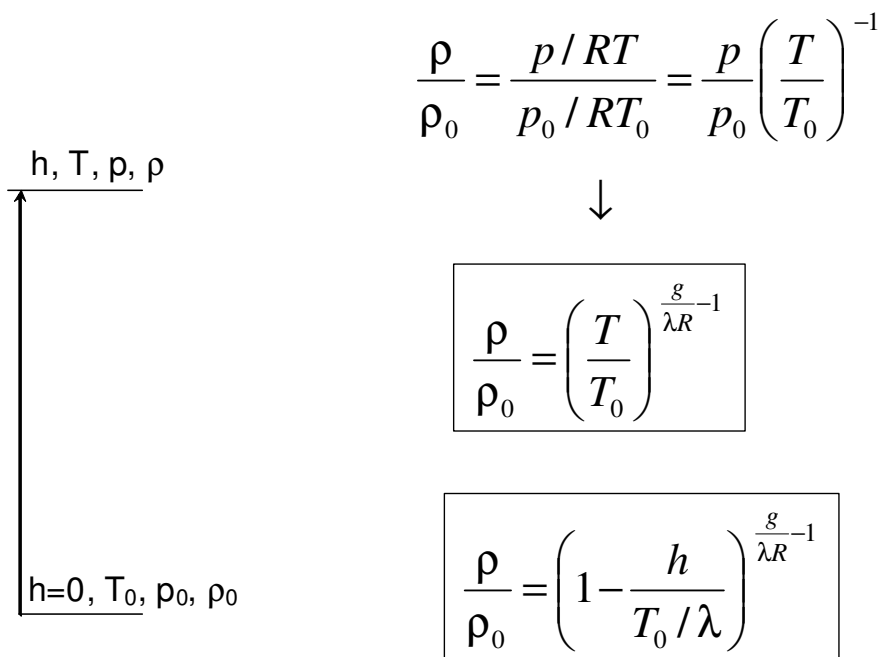
0,000 – 11,000	-6.5
11,000 – 25,000	0.
25,000 – 47,300	2.96
47,300 – 53,500	0.
53,500 – 75,800	-3.85
75,800 – 91,300	0.



Troposfer için Hesaplar



Troposfer için Hesaplar



Troposfer için Hesaplar

ÖRNEK:

Troposfer içerisindeki basınç ve yoğunluğu deniz seviyesindeki değerlere irtifa cinsinden bağlayan bağıntıların katsayılarını SI ve IU birim sistemlerinde hesaplayınız.

Çözüm:

a) SI sisteminde: $T_0=288^\circ\text{K}$, $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $R=287\text{J/kg}^\circ\text{K}$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{h}{44308}\right)^{5.259}; \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{h}{44308}\right)^{4.259}$$

b) UK sisteminde: $T_0=518.4^\circ\text{R}$, $g=32.185 \text{ ft/s}^2$, $R=1716 \text{ ft}^2/\text{s}^2\text{R}$,
 $\lambda=3.566 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{R/ft}$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{h}{145373}\right)^{5.259}; \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{h}{145373}\right)^{4.259}$$

Stratosfer için Hesaplar

h, T_{11}, p, ρ



$h=11,000 \text{ m}$

$T_{11}, p_{11}, \rho_{11}$

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh$$



$$\leftarrow p = \rho \cdot R \cdot T_{11}$$

$$\int_{p_{11}}^p \frac{dp}{p} = \frac{g}{RT_{11}} \cdot \int_{h_{11}}^h dh$$

$$\ln \frac{p}{p_{11}} = \frac{g}{RT_{11}} (h - h_{11})$$

$$\frac{p}{p_{11}} = e^{\frac{g}{RT_{11}}(h-11,000)}$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T_{11}$$

$$p_{11} = \rho_{11} \cdot R \cdot T_{11}$$



$$\frac{\rho}{\rho_{11}} = \frac{p}{p_{11}} = e^{\frac{g}{RT_{11}}(h-11,000)}$$

Atmosferin diğer özellikleri

Viskozite ve ses hızı sadece sıcaklığın fonksiyonudur.

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{0.75}$$

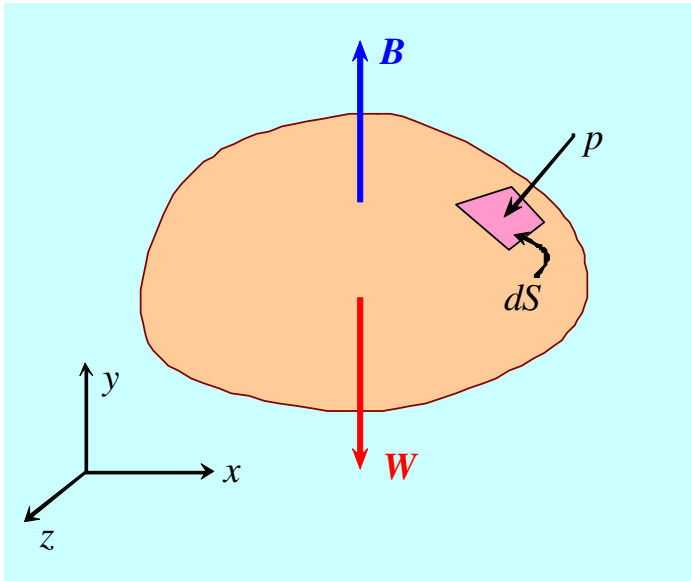
$$T_{ref} = 288^{\circ}K \quad \text{için} \quad \mu_{ref} = 1.784 \times 10^{-5} \text{ Pas}$$

$$a = \sqrt{\gamma RT}$$

$$\gamma = 1.4, \quad R = 287 \text{ J/kg}^{\circ}K$$

Aero/Hidro-statik Taşıma

Aero/Hidro-statik taşıma akışkan içerisinde basıncın yükseklikle değişmesinden kaynaklanır.



$$B = g \cdot \rho \cdot V$$

- g: Yer çekimi ivmesi
- ρ : Akışkanın yoğunluğu
- V: Cismin hacmi

Statik denge halinde

$$B = W$$

Denizaltı ve Balonlarda Aero/Hidro-statik Taşıma

Statik denge halinde

$$B = W$$

Cismin aşağı veya yukarı yer değiştirmesi için

$$B \neq W$$

Denizaltı gibi hacmi değişmeyen bir cisim için,

Deniz içerisinde belli bir derinlik kuşağında suyun yoğunluğunun önemli miktarda değişmediği farz edilirse suyun denizaltıya etkittiği hidrostatik taşıma kuvveti değişmeyeceği için

dengeyi değiştirmenin tek yolu

denizaltı içerisindeki özel bir bölmeye denizden su çekerek ağırlığın arttırılması veya bunun tersinin yapılması, yani su tahliye edilerek ağırlığın azaltılmasıdır.

Denizaltı ve Balonlarda Aero/Hidro-statik Taşıma

Statik denge halinde

$$B = W$$

Cismin aşağı veya yukarı yer değiştirmesi için

$$B \neq W$$

Atmosfer içerisindeki balon için

- önceden bulunan safranın bir kısmı atılarak, veya
- balonun içindeki gazın ısıtılması yoluyla bir kısmı dışarı atılarak ağırlık azaltılabilir.

Ayrıca, irtifa ile havanın yoğunluğu değiştiği için

aynı hacimdeki atmosferin ağırlığı, yani aerostatik taşıma kuvveti değişir.

Örnek: Bir insan balonla nasıl taşınır?

Ortalama insan kütlesi 75 kg kabul edilirse gereken aerostatik taşıma kuvveti

$$B = 75 \times 9.81 = 735.75 \text{ N}$$

Bu kuvveti sağlayacak balon hacmi

$$V = \frac{B}{\rho \cdot g} = \frac{735.75}{1.226 \cdot 9.81} = 61.17 \text{ m}^3$$

Balonun küre şeklinde olduğu varsayılırsa çapı

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \rightarrow R = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{3 \times 61.17}{4\pi} \right)^{1/3} = 2.4 \text{ m} \rightarrow D \cong 5 \text{ m}$$

NOT: Bu hesaba balonun ağırlığı, şişirmek için gerekli gazın ağırlığı, insanı taşıyacak donanım ağırlığı vs katılmamıştır.

Örnek Problem:

Şişirilmiş haldeki çapı 30 ft olan bir sıcak-hava balonu içindeki hava da dahil olmak üzere 800 lb lik bir ağırlığı taşımaktadır.

(a) Deniz seviyesinde ipleri bırakıldığı andaki ivmesini hesaplayınız.

(b) Erişebileceği en yüksek irtifayı hesaplayınız.

Standart atmosferdeki yoğunluğun h yüksekliği ile $\rho = 0.002377(1 - 7 \times 10^{-6} h)^{4.21}$ şeklinde değiştiğini kabul ediniz.

Burada ρ is in slug/ft³ cinsinden verilmektedir.

Çözüm (a):

Deniz seviyesinde $h=0$, $\rho=0.002377$ slug/ft³ olup şişirilmiş balonun hacmi

$$V = \frac{4}{3}\pi(15)^3 = 14.137 \text{ ft}^3$$

Aerostatik taşıma kuvveti

$$B = \rho g V = 32.2 \times 0.002377 \times 14.137 = 1082 \text{ lb}$$

Balona etkiyen net kuvvet $F = B - W$ olup Newton kanunu gereği

$$F = B - W = ma \rightarrow a = \frac{B - W}{m} = \frac{1082 - 800}{24.8} = 11.4 \text{ ft} / \text{s}^2$$

Çözüm (b):

Maksimum irtifaya $B = W = 800$ lb olduğunda erişilecektir. Balonun hacminin değişmediği kabul edilerek

$$\rho = \frac{B}{gV} = \frac{800}{32.2 \times 14.137} = 0.00176 \text{ slug} / \text{ft}^3$$

Yoğunluğun irtifa ile değişimi için verilen formülden

$$\rho = 0.002377(1 - 7 \times 10^{-6} h)^{4.21} = 0.00176 \rightarrow h = 9842 \text{ ft}$$

Uçaklarda Aerostatik Taşıma

Örnek: A300 uçağı	Boy:	53 m
	Maksimum gövde çapı:	5.64 m
	Boş ağırlığı:	78 ton
	Dolu ağırlığı:	165 ton

Yaklaşık hacmi $V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot l = \frac{\pi \times (5.64)^2}{4} \times 53 = 1324 \text{ m}^3$

Bu hacimle sağlanacak yaklaşık aerostatik taşıma kuvveti

Deniz seviyesinde

$$B = \rho \cdot g \cdot V = 1.226 \times 9.81 \times 1324 = 15924 \text{ N} = 1623 \text{ kgk} \cong 1.6 \text{ ton}$$

10 km irtifada ($\rho / \rho_0 = 0.33$)

$$B = 0.33 \times 1623 \text{ kgk} = 536 \text{ kgk} \cong 0.5 \text{ ton}$$