مکانیک خاکهای غیر اشباع

رفتار فازهای مختلف

Unsaturated soils

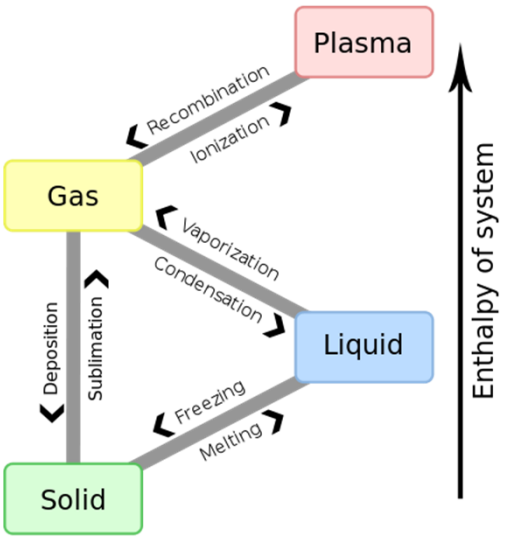
Phases Behaviour

Hasan Ghasemzadeh
http://wp.kntu.ac.ir/ghasemzadeh

فهرست عناوین و فصول

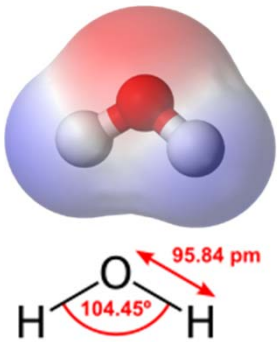
۱- مقدمه – آشنایی – مختصری از ترمودینامیک
۲-رفتار فازهای مختلف
۳- اندازه گیری در خاک غیر اشباع
۴-نتایج آزمایشات خاک غیر اشباع
۵- تنش موثر و کرنش
۶- تئوری های خاک غیر اشباع
۷- جریان در خاک غیر اشباع
۸- کاربرد خاک غیر اشباع در مهندسی

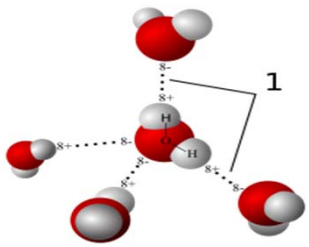
حالات مختلف فازها



Dr. Hasan Ghasemzadeh 3

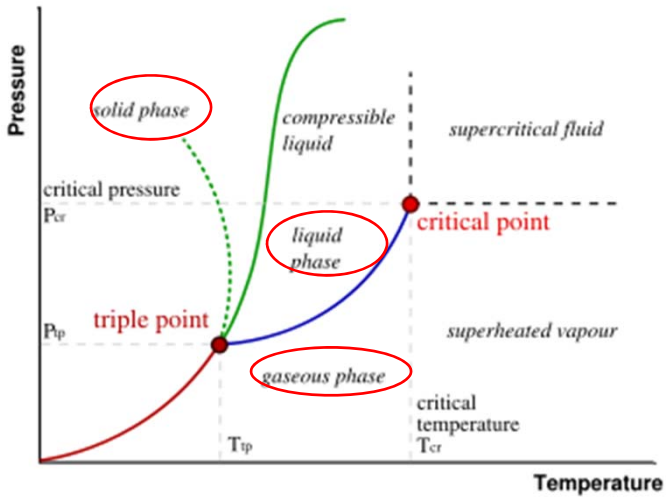
فاز آب





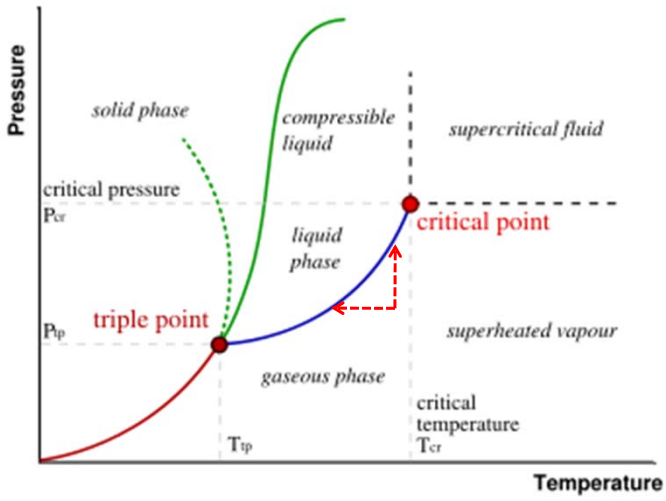
Dr. Hasan Ghasemzadeh 4

آب – بخار– یخ



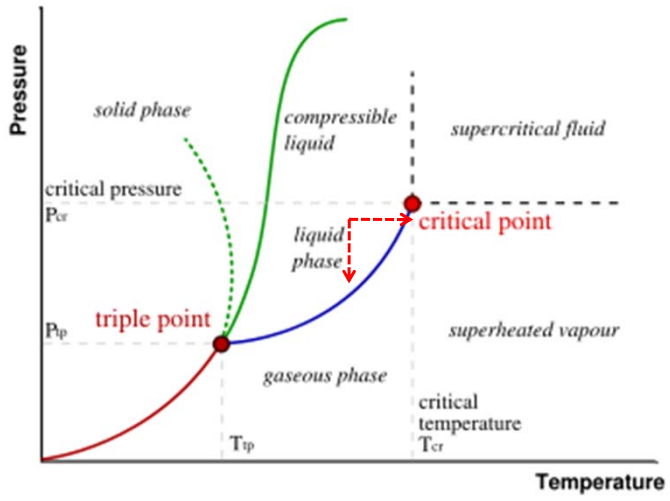
Dr. Hasan Ghasemzadeh 5

نقطه شبنم



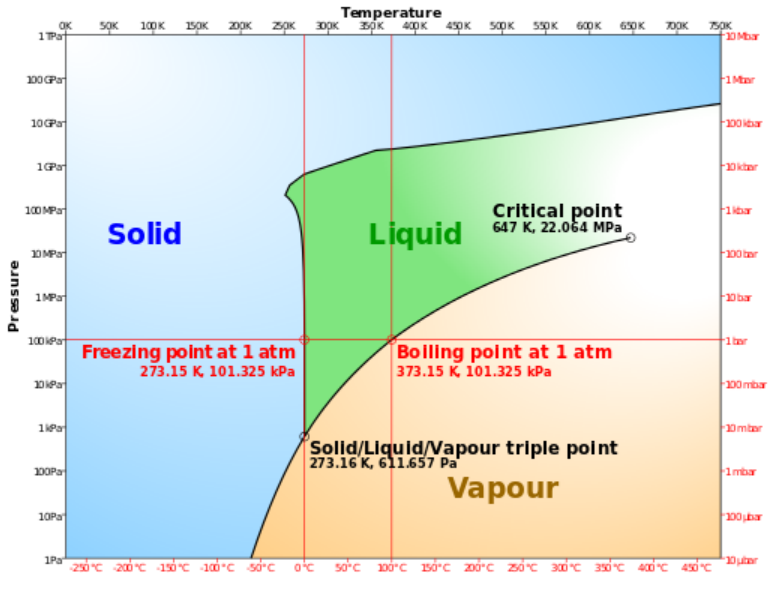
Dr. Hasan Ghasemzadeh 6

کاویتاسیون و جوشش



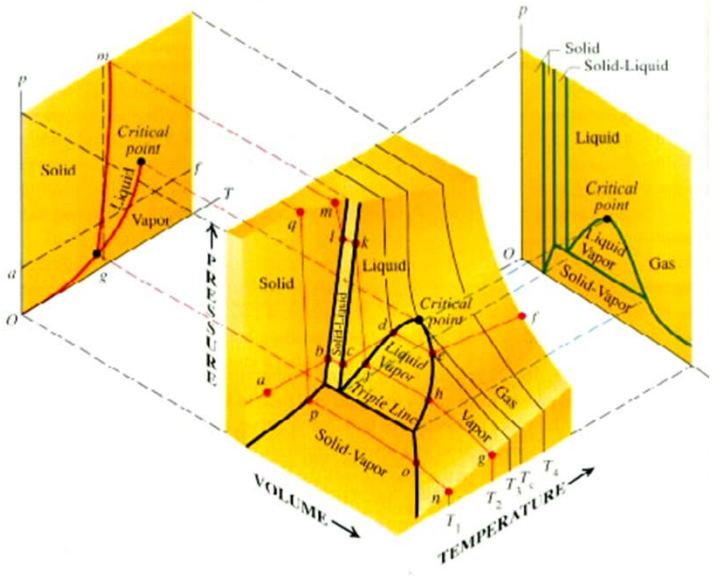
Dr. Hasan Ghasemzadeh 7

کاویتاسیون و جوشش



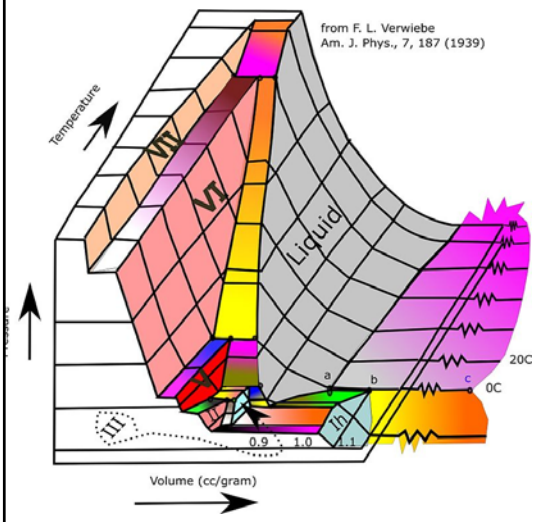
8

آب – بخار– یخ



9

آب – بخار– یخ



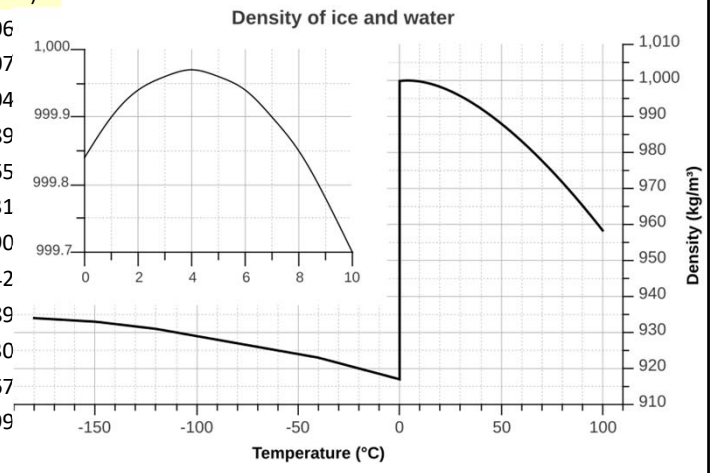
The various triple points of water

Phases in stable equilibrium	Pressure	Temperature
liquid water, ice I_h, and water vapor	611.657 Pa[42]	0.01 °C
liquid water, ice I_h, and ice III	209.9 MPa	−22 °C
liquid water, ice III, and ice V	350.1 MPa	−17.0 °C
liquid water, ice V, and ice VI	632.4 MPa	0.16 °C
ice I_h, Ice II, and ice III	213 MPa	−35 °C
ice II, ice III, and ice V	344 MPa	−24 °C
ice II, ice V, and ice VI	626 MPa	−70 °C

Dr. Hasan Ghasemzadeh 10

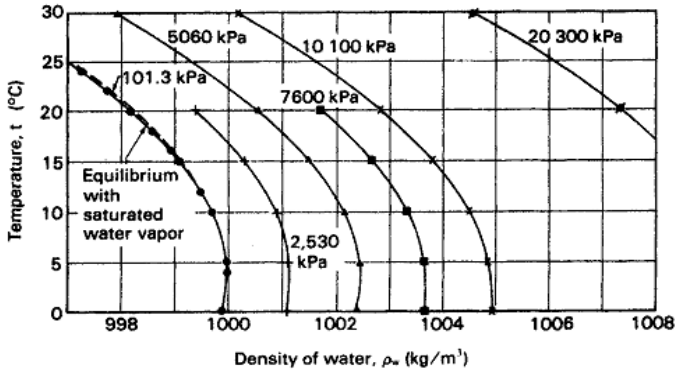
دانسیته آب

Temperature - t - (°C)	Density - ρ - (kg/m³)	Specific Weight - γ - (kN/m³)
0	999.9	9.806
5	1000	9.807
10	999.7	9.804
20	998.2	9.789
30	995.7	9.765
40	992.2	9.731
50	988.1	9.690
60	983.2	9.642
70	977.8	9.589
80	971.8	9.530
90	965.3	9.467
100	958.4	9.399



Dr. Hasan Ghasemzadeh 11

دانسیته آب



چگالی آب خالص تحت فشار و دمای متغیر

Dr. Hasan Ghasemzadeh 12

هوا

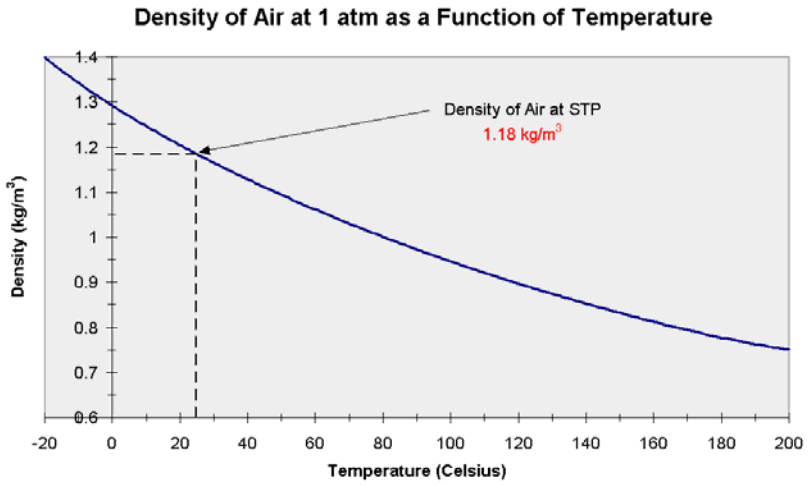
ترکیب هوای خشک

Gas	Formula	Percent by Volume[a]	Percent by Weight
Nitrogen	N_2	78.03	75.47
Oxygen	O_2	20.99	23.18
Argon	Ar	0.94	1.30
Carbon dioxide	CO_2	0.039	0.05
Other[d]	—	0.01	—

در صورت وجود بخار آب به ترکیب فوق هوای مرطوب اتلاق می گردد.

Dr. Hasan Ghasemzadeh 13

دانسیته هوا



Dr. Hasan Ghasemzadeh 14

دانسیته هوا

Density of Air, ρ_a (kg/m^3)			
Absolute Air Pressure, $\bar{u}_a$ (kPa)	Temperature, t^0 (°C) 10	20	30
80	0.982	0.946	0.910
85	1.043	1.005	0.968
90	1.105	1.065	1.025
95	1.167	1.124	1.083
100	1.228	1.184	1.140
101	1.240	1.196	1.152
105	1.290	1.243	1.198

Density Adjustments for Humidity (kg/m^3)		
Relative Humidity, RH (%)	Temperature, t^0 (°C) 10	20
20	+0.003	+0.006
25	+0.003	+0.005
30	+0.002	+0.004
35	+0.002	+0.003
40	+0.001	+0.002
45	+0.001	+0.001
50	0	0
55	−0.001	−0.001
60	−0.001	−0.002
65	−0.002	−0.003
70	−0.002	−0.004
75	−0.003	−0.005
80	−0.003	−0.006

Dr. Hasan Ghasemzadeh 15

قانون گازهای کامل

در شرایط معمول از حجم مولکولهای گاز و نیروهای بین آنها صرفنظر می کنیم و قانون گاز کامل برقرار است

$$PV = nRT = mR_{specific}T$$

فشار مطلق برحسب پاسکال P

دمای مطلق برحسب درجه کلوین T

حجم بر حسب مترمکعب V

مقدار گاز برحسب مول n

مقدار جرم برحسب کیلوگرم m

$$R = 8.314 \quad Nm/\text{mol}^\circ K \ or \ \text{J/mol}^\circ K$$

$$R_{specific} = \frac{R}{M}$$

ثابت گاز ویژه (برای گاز مشخص) $R_{specific}$

جرم مولی $M = \frac{m}{n}$

$$R_{specific} = c_p - c_v$$

حرارت مخصوص در فشار ثابت c_p

حرارت مخصوص در حجم ثابت c_v

$$R_d = 29.271 \ m/^\circ k$$

مثال : ثابت گاز ویژه برای هوای خشک

Dr. Hasan Ghasemzadeh 16

گازهای حقیقی

در دمای بالا و فشار زیاد صرفنظر نمودن از حجم مولکولهای گاز و نیروهای بین آنها درست نمی باشد و قانون گاز کامل برای گاز حقیقی اصلاح می شود

$$PV = ZnRT$$

$$Z = \frac{V_{actual}}{V_{ideal}}$$

Z ضریب تراکم پذیری یا ضریب انحراف گاز – بی بعد

V_{actual} حجم واقعی n مول گاز

V_{ideal} حجم ایده‌آل n مول گاز

ضریب انحراف گاز را در نمودارها و جداول مربوطه می توان بدست آورد

Dr. Hasan Ghasemzadeh 17

دانسیته هوا

$$P_a V_a = nRT \rightarrow P_a V_a = \frac{m_a}{M_a} RT$$

هوا را گاز کامل فرض می کنیم

Effect of temperature	
°C	ρ in kg/m³
−10	1.342
−5	1.317
0	1.292
+5	1.269
+10	1.247
+15	1.225
+20	1.204
+25	1.184
+30	1.165

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} = \frac{P_a M_a}{RT}$$

$R = 8.314\ \text{Nm/mol}^\circ K$

مثال : دانسیته هوا در دمای ۲۰ درجه و فشار استاندارد یک اتمسفر

$$\rho_{a,20^\circ\text{C}} = \frac{(1.01325 \times 10^5\ \text{N/m}^2)(28.97\ \text{g/mol})}{[8.314\ \text{N}\cdot\text{m/(mol}\cdot\text{K)}][(273.15+20)\text{K}]}$$

$$= 1204\ \text{g/m}^3 = 1.204\ \text{kg/m}^3$$

$$\frac{\Delta\rho_a}{\rho_{a0}} = \frac{M_a}{RT\rho_{a0}}\Delta P_a - \frac{M_a P_a}{RT^2 \rho_{a0}}\Delta T = \frac{\Delta P_a}{P_a} - \frac{\Delta T}{T}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 18

دانسیته هوا

P_b = pressure at elevation z_b, N/m^2

P_a = atmospheric pressure at sea level, 1.01325×10^5 N/m^2

g = acceleration due to gravity, 9.81 m/s^2

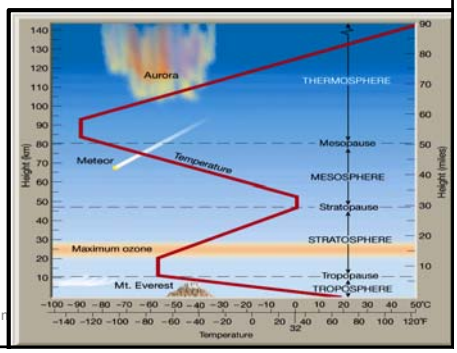
M = molecular weight of air (see Table B-1), 28.97 g/mol

z = elevation, m

R = universal gas constant, $8.314\,N \cdot m/(mol \cdot K)$

T = temperature, K $(273.15 + {}^\circ C)$

$$\frac{P_b}{P_a} = \exp\left[-\frac{gM(z_b - z_a)}{RT}\right]$$



Dr. Hasan Ghaser

دانسیته بعضی سیالات

Liquid	Temperature - t - (°C)	Density - ρ - (kg/m³)
Acetic Acid	25	1049
Acetone	25	784.6
Alcohol, ethyl (ethanol)	25	785.1
Alcohol, methyl (methanol)	25	786.5
Ammonia (aqua)	25	823.5
Automobile oils	15	880 - 940
Beer (varies)	10	1010
Benzene : C6H6	25	873.8
Brine	15	1230
Citric acid, 50% aqueous solution	15	1220
Cresol-methylphenols :CH3C6H4OH	25	1024
Crude oil, 48° API	15	790
Crude oil, 40° API	15	825
Gas oil- Diesel fuel oil 20 to 60 : C14-C20	15	820 - 950
Fuel oil	15	890
Gasoline, Vehicle : C7 to C11	15	737

Dr. Hasan Ghasemzadeh 20

دانسیته بعضی گازها

Gas	Formula	Molecular Weight, g/mol	Density, g/L
Air	—	28.97[a]	1.2928
Ammonia	NH_3	17.03	0.7708
Carbon dioxide	CO_2	44.00	1.9768
Carbon monoxide	CO	28.00	1.2501
Hydrogen	H_2	2.016	0.0898
Hydrogen sulfide	H_2S	34.08	1.5392
Methane	CH_4	16.03	0.7167
Nitrogen	N_2	28.02	1.2507
Oxygen	O_2	32.00	1.4289

Dr. Hasan Ghasemzadeh 21

گرانروی

گرانروی، لِزجت، وُشکسانی یا ویسکوزیته : مقدار مقاومت لایه‌های سیال در برابر جریان برشی

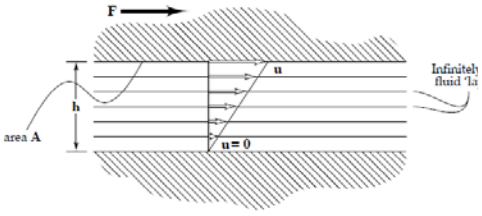
Dynamic (or Absolute) Viscosity:

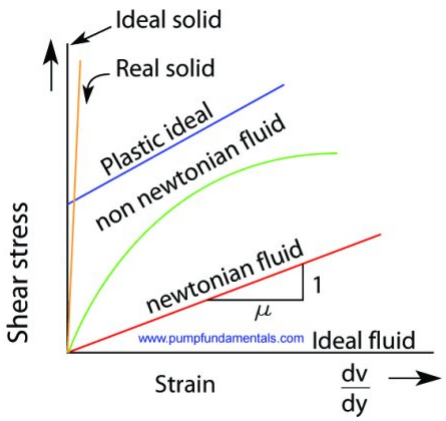
- $\mu = F/(A*u/h)$

$\mu = \tau/(u/h)$ N-s/m²

Kinematic Viscosity :

$\upsilon = \mu/\rho$ m²/s

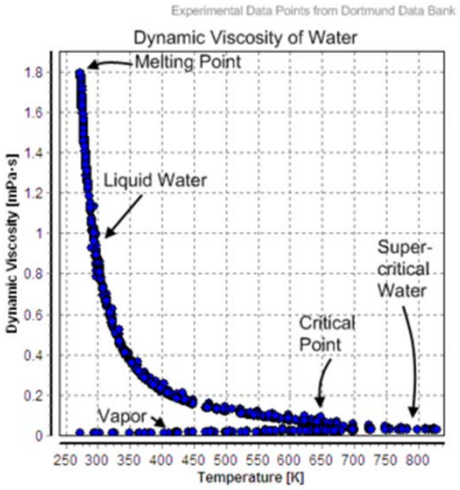




Dr. Hasan Ghas

گرانروی آب

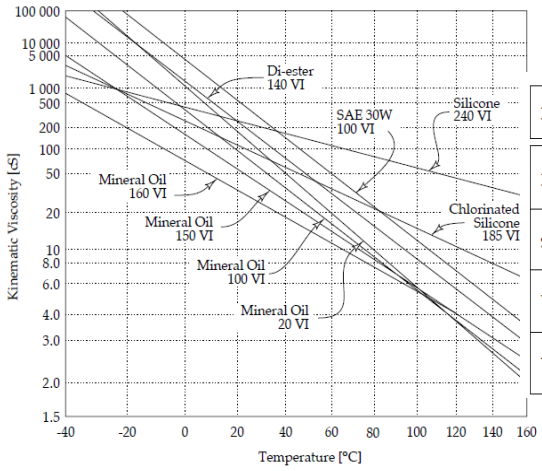
Temperature [ºC]	viscosity [Pa·s]
10	1.308×10^{-3}
20	1.003×10^{-3}
30	0.7978×10^{-3}
40	0.6531×10^{-3}
50	0.5471×10^{-3}
60	0.4668×10^{-3}
70	0.4044×10^{-3}
80	0.3550×10^{-3}
90	0.3150×10^{-3}
100	0.2822×10^{-3}



Dr. Hasan Ghasemzadeh 23

گرانروی بعضی مایعات

گرانروی انواع مایعات



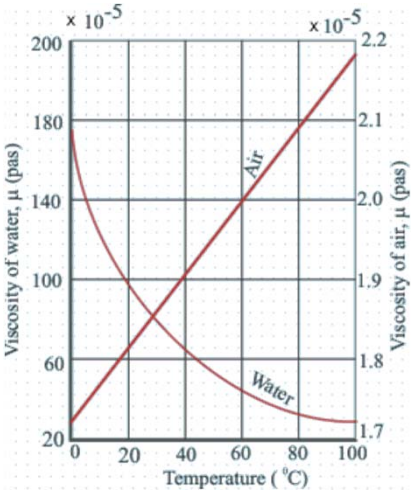
Name	Equation	Comments
Reynolds	$\eta = be^{-aT}$	Early equation; accurate only for a very limited temperature range
Slotte	$\eta = a/(b+T)^c$	Reasonable; useful in numerical analysis
Walther	$(\upsilon + a) = bd^{1/T^c}$	Forms the basis of the ASTM viscosity-temperature chart
Vogel	$\eta = ae^{b/(T-c)}$	Most accurate; very useful in engineering calculations

با افزایش دما لزجت سیالات مایع کاهش می یابد

Dr. Hasan Ghasemzadeh 24

گرانروی هوا

Temperature (K)	Dynamic Viscosity - μ - 10^{-5} (kg/ms)	Kinematic Viscosity[1] - ν – 10^{-5} (m^2/s)
175	1.182	0.586
200	1.329	0.753
225	1.467	0.935
250	1.599	1.132
275	1.725	1.343
300	1.846	1.568
325	1.962	1.807
350	2.075	2.056
375	2.181	2.317
400	2.286	2.591
450	2.485	3.168
500	2.670	3.782
550	2.849	4.439



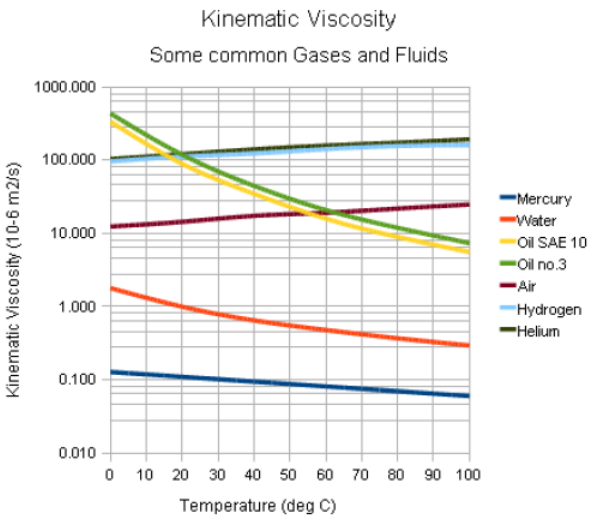
با افزایش دما لزجت سیالات گازی افزایش می یابد

گرانروی بعضی از گازها

گاز	[K] T_0	[K] C	μ_0[10^{-6} Pa s]
هوا	120	291.15	18.27
نیتروژن	111	300.55	17.81
اکسیژن	127	292.25	20.18
کربن دی‌اکسید	240	293.15	14.8
کربن مونوکسید	118	288.15	17.2
هیدروژن	72	293.85	8.76
آمونیاک	370	293.15	9.82
گوگرد دی‌اکسید	416	293.65	12.54
هلیم	79.4	273	19

با افزایش دما لزجت سیالات گازی افزایش می یابد

گرانروی بعضی از گازها



Dr. Hasan Ghasemzadeh 27

ترکیب هوا

Composition of dry air at 0°C and 1.0 atm

Gas	Formula	Percent by Volume[a]	Percent by Weight
Nitrogen	N_2	78.03	75.47
Oxygen	O_2	20.99	23.18
Argon	Ar	0.94	1.30
Carbon dioxide	CO_2	0.039	0.05
Other[d]	—	0.01	—

Dr. Hasan Ghasemzadeh 28

فشارهای جزیی و رطوبت نسبی

قانون دالتون

$$P_a = P_{o_2} + P_{N_2} + P_{co_2} + \ldots$$

$$P_{o_2} / P_a = n_{o_2} / \sum n_i$$

جرم مخصوص بخار در حالت تعادل در دمای ۲۵ درجه؟
فشار جزیی بخار در حالت تعادل۳/۱۷ کیلوپاسکال است

$$\rho_v = \frac{P_v M_v}{RT} = \frac{(18kg/kmol)(3.17kPa)}{(8.314J/mol^\circ K)(298.2^\circ K)} = 22.99gr/m^3$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 29

فشارهای جزیی و رطوبت نسبی

$$P_{v,sat} = 0.611e^{\left(17.27\frac{T-273.2}{T-36}\right)}$$

$$RH = \frac{\rho_v}{\rho_{v,sat}} = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$$

Relative humidity (RH) is the ratio of the partial pressure of water vapor to the equilibrium vapor pressure of water at the same temperature

رابطه رطوبت نسبی با پتانسیل شیمیایی و انرژی آزاد (E:J/kg)

$$E = \frac{\mu}{M_w} = -\frac{RT}{M_w}\ln\left(\frac{\rho_v}{\rho_{v,sat}}\right) = -\frac{RT}{M_w}\ln(RH)$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 30

فشارهای جزیی و رطوبت نسبی

Relative Humidity (%RH)						
Temperature °C	Potassium Carbonate	Magnesium Nitrate	Sodium Chloride	Potassium Chloride	Potassium Nitrate	Potassium Sulfate
0	43.13 ± 0.66	60.35 ± 0.55	75.51 ± 0.34	88.61 ± 0.53	96.33 ± 2.9	98.77 ± 1.1
5	43.13 ± 0.50	58.86 ± 0.43	75.65 ± 0.27	87.67 ± 0.45	96.27 ± 2.1	98.48 ± 0.91
10	43.14 ± 0.39	57.36 ± 0.33	75.67 ± 0.22	86.77 ± 0.39	95.96 ± 1.4	98.18 ± 0.76
15	43.15 ± 0.33	55.87 ± 0.27	75.61 ± 0.18	85.92 ± 0.33	95.41 ± 0.96	97.89 ± 0.63
20	43.16 ± 0.33	54.38 ± 0.23	75.47 ± 0.14	85.11 ± 0.29	94.62 ± 0.66	97.59 ± 0.53
25	43.16 ± 0.39	52.89 ± 0.22	75.29 ± 0.12	84.34 ± 0.26	93.58 ± 0.55	97.30 ± 0.45
30	43.17 ± 0.50	51.40 ± 0.24	75.09 ± 0.11	83.62 ± 0.25	92.31 ± 0.60	97.00 ± 0.40
35		49.91 ± 0.29	74.87 ± 0.12	82.95 ± 0.25	90.79 ± 0.83	96.71 ± 0.38
40		48.42 ± 0.37	74.68 ± 0.13	82.32 ± 0.25	89.03 ± 1.2	96.41 ± 0.38
45		46.93 ± 0.47	74.52 ± 0.16	81.74 ± 0.28	87.03 ± 1.8	96.12 ± 0.40
50		45.44 ± 0.60	74.43 ± 0.19	81.20 ± 0.31	84.78 ± 2.5	95.82 ± 0.45

Dr. Hasan Ghasemzadeh 31

فشارهای جزیی و رطوبت نسبی

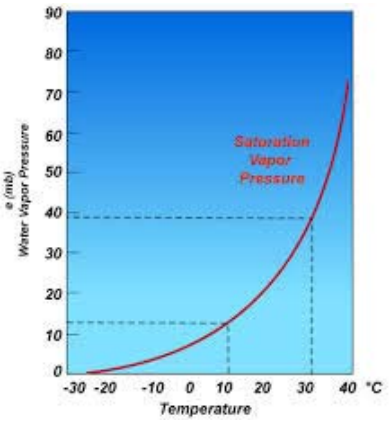
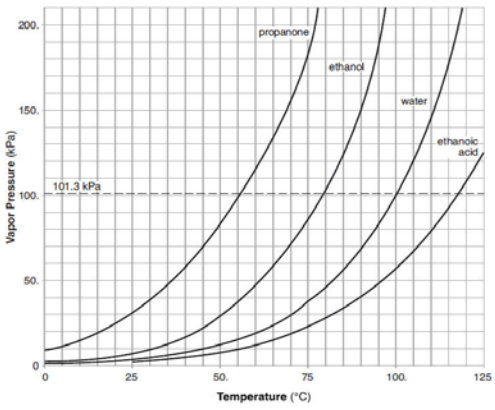


Table II
Vapor Pressure of Four Liquids



Dr. Hasan Ghasemzadeh 32

دانسیته بخار

$$\rho_d = \frac{P_{a,d} M_{a,d}}{RT}$$

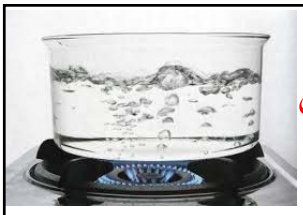
$$\rho_v = \frac{P_v M_v}{RT} = \frac{P_{v,sat} M_v}{RT} RH = \rho_{v,sat} RH$$

$$\rho_{a,moist} = \frac{P_v M_v + (P_a - P_v) M_d}{RT}$$

$$\rho_{a,moist} = \rho_{a,d} - \left(\frac{M_{a,d}}{M_v} - 1 \right) \rho_v$$

$$\rho_{a,moist} = \rho_{a,d} - \left(\frac{M_{a,d}}{M_v} - 1 \right) \rho_{v,sat} RH$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 33



کاویتاسیون و جوشش

جوشش: ایجاد حباب بخار در دمای بالاتر از دمای بخار اشباع
کاویتاسیون: ایجاد حباب فشار کمتر از فشار بخار اشباع

$$P_a = P_0 \left(1 - \frac{\lambda z}{T_0} \right)^{1/R_v \lambda}$$

فشار هوا در اتمسفر تا ارتفاع T_0= 288.15 k ,z=11000 m

$$\lambda = -dT/dz = 6.5\ °k/km, P_0 = 1013.25 mbar$$

$$R_v = R_d \left(1 + 0.38 RH \frac{P_{v0}}{P_0} \right)$$

ثابت اتمسفر مرطوب با فرض فشار بخار خیلی کوچک در برابر فشار کل هوا

$$R_d = 29.271\ m/°k$$

$$P_g = P_a - P_v = P_a - RHP_{v0}$$

فشار کاویتاسیون

Dr. Hasan Ghasemzadeh 34

اندرکنش فازهای مختلف

قانون هنری

$$\frac{m_i / M_i}{V_l} = K_{Hi} P_i$$

m_i جرم گاز kg

M_i جرم مولکولی گاز kg/mol

V_l حجم مایع

P_i فشار جزیی گاز i

$$\frac{m_{o_2}/M_{o_2} + m_{N_2}/M_{N_2} + \ldots}{V_l} = K_{Ho_2} P_{o_2} + K_{HN_2} P_{N_2} + \ldots = K_{Ha} P_a$$

اندرکنش فازهای مختلف

قانون هنری

At a **constant** temperature, the amount of a given gas that dissolves in a given type and volume of liquid is directly proportional to the partial pressure of that gas in equilibrium with that liquid

$$\frac{V_i}{V_l} = h_i \frac{P_i}{P_a}$$

$$\frac{V_{o_2} + V_{N_2} + \ldots}{V_l} = h_{o_2} \frac{P_{o_2}}{P_a} + h_{N_2} \frac{P_{N_2}}{P_a} + \ldots = h_a$$

$$\frac{V_{ai}}{V_l} = K_{Hai} RT = h_{ai} \frac{P_i}{P_a}$$

$$\frac{V_a}{V_l} = K_{Ha} RT = h_a$$

اندرکنش فازهای مختلف

Henri constant

ثابت هنری

gas	mol/(L.bar)	L.bar/mol
O_2	1.3 E-3	769.23
H_2	7.8 E-4	1282.05
CO_2	3.4 E-2	29.41
N_2	6.1 E-4	1639.34
He	3.7 E-4	2702.7
Ne	4.5 E-4	2222.22
Ar	1.4 E-3	714.28
CO	9.5 E-4	1052.63

$$k_{\mathrm{H,pc}} = \frac{p}{c_{\mathrm{aq}}}$$

c_{aq}= concentration (or molarity) of gas in solution (in mol/L)

p= partial pressure of gas above the solution (in atm)

ثابت هنری

When the temperature of a system changes, the Henry constant will also change
A simple example is which is a form of the van 't Hoff equation:

$$H(T) = H(T_0)\exp^{C(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0})} \qquad T_0 = 298^\circ K$$

H for a given temperature is the Henry's Law constant

$$C = \frac{U_{solution}}{R} = \frac{-d\ln(H(T))}{d(1/T)}$$

$U_{solution}$ is the enthalpy of solution
R is the gas constant.

Values of C (in K)

Gas	O_2	H_2	CO_2	N_2	He	Ne	Ar	CO
C	1700	500	2400	1300	230	490	1300	1300

رژیم جریان

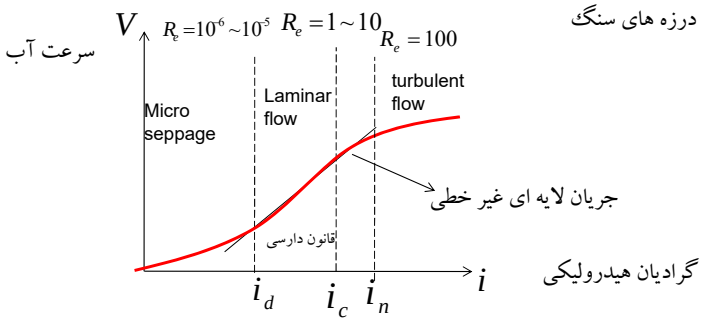
$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

ρ : جرم مخصوص

V : سرعت آب

D : قطر موثر خاک یا درزه های سنگ

μ : ویسکوزیته



رژیم خطی در لوله ها

$10^{-6} < R_e < 1.0 \Rightarrow$ قانون دارسی معتبر است

$R_e < 2000 \Rightarrow$ قانون دارسی معتبر است

رژیم جریان

رژیم جریان دارسی یا جریان لغزشی که در آن نیروهای لزجت (نیروی دراگ لزج) حاکم می‌باشد $(\mathrm{Re} < 1)$

$$\mathbf{u} = -\frac{\boldsymbol{\kappa}}{\mu_f}\left(\nabla p - \gamma \nabla \mathbf{z}\right)$$ قانون دارسی

رژیم جریان اینرسی یا فورشهایمر که در آن جریان لایه‌ای غیر خطی برقرار شده و اثرات دراگ شکل تعیین کننده می‌باشد $(1 \sim 10 < \mathrm{Re} < 150)$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{\kappa} u + \beta \rho u^2$$ فورشهایمر

رژیم جریان گذرا (پس–فروشهایمر) که در آن جریان لایه‌ای غیر دایمی بوده و نوسانات و گرداب‌هایی در جریان ایجاد می‌شود $(150 < \mathrm{Re} < 300)$

رژیم جریان کاملا آشفته که مشابه جریان متلاطم در لوله‌ها می‌باشد $(\mathrm{Re} > 300)$

دیبس و ادواردس (۱۹۸۴)

مساله

۱- نسبت تخلخل خاکی در تهران که ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۰۰ متر می‌باشد برابر ۴۰ درصد است. ۳۰ درصد حفرات را آب پر نموده است و رطوبت نسبی هوا برابر ۵۰ درصد می‌باشد. دمای هوا ۳۵ درجه سانتی گراد می‌باشد. جرم مخصوص دانه‌های خشک خاک برابر ۲/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب است مطلوبست محاسبه جرم مخصوص این خاک غیراشباع؟ در یک متر مکعب این خاک چند گرم آب وجود دارد؟

$$p_{a,sea\,level=0}(kPa) = 101.32\,kPa$$

$$g = 9.81\ \frac{m}{s^2}$$

$$M = 28.97 \times 10^{-3}\ \frac{kg}{mol}$$

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln\left[e + (\psi / a)^n \right]} \right]^m$$

حل مساله

حل

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_w + V_a}{V_s} = 0.4\ , S_r = \frac{V_w}{V_v} = 0.3 \rightarrow \quad V_w = 0.12 V_s\ , \qquad V_a = 0.28\,V_s$$

$$V = V_s + V_w + V_a = 1.4 V_s \quad , \qquad T = 273.2 + 35 = 308.2\ K$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \rightarrow m_s = \rho_d V = G_s V_s = 2.65\ \frac{gr}{cm^3},\ \rho_w = 1\ \frac{gr}{cm^3}$$

$$\frac{P_{h=1300}}{P_{h=0}} = exp\left[-\frac{gM(1300-0)}{RT} \right]$$

$$\rightarrow P_{h=1300} = P_{a,moist} = 101.32 \times exp\left[-\frac{9.81 \times 28.97 \times 10^{-3} \times (1300-0)}{8.314 \times 308.2} \right] = 87.716\ kpa$$

$$P_v = RH \times 0.611 \times e^{(17.27 \times \frac{T-273.2}{T-36})} = 0.5 \times 0.611 \times e^{(17.27 \times \frac{308.2-273.2}{308.2-36})} = 2.815\ kPa$$

ادامه حل مساله

با صرفنظر از تغییرات فشار اشباع بخار آب در ارتفاع مقدار فوق فشار جزیی بخار اب در محل می باشد

$$\rho_{a,moist} = \frac{P_v \times M_v + (P_{a,moist} - P_v) \times M_{a,d}}{RT} = \frac{2.815 \times 18 + (87.716 - 2.815) \times 28.97}{8.314 \times 308.2}$$

$$= 0.98 \frac{kg}{m^3} = 9.8 \times 10^{-4} \frac{gr}{cm^3}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{(m_s + m_w + m_a)}{V} = \frac{(\rho_s \times V_s + \rho_w \times V_w + \rho_{a,moist} \times V_a)}{V_s + V_w + V_a}$$

$$= \frac{(2.65 \times V_s + 1 \times 0.12 \times V_s + 9.8 \times 10^{-4} \times 0.28 \times V_s)}{1.4 \times V_s} = \mathbf{1.979} \frac{\boldsymbol{gr}}{\boldsymbol{cm^3}}$$

$$m_w = \rho_w V_w / V + \rho_{a,moist} V_a / V = (1000 \times 0.12 + 0.98 \times 0.28) / 1.4 = 85.91\ kg$$

توجه: وزن هوا ناچیز است و در محاسبه آمده است

مقدار آب موجود در هوای داخل هوا (رطوبت هوا) بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد.

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.4}{1+0.4} = 0.29 \ , \theta = n \times S_r = 0.29 \times 0.3 = 0.087 \quad , \theta_s = n \times 1 = 0.29$$

مساله

با دانستن خواص آب و هوا در شرایط متعارفی مطلوبست محاسبه میزان آب موجود در یک کیلوگرم هوا در ارتفاع ۱۸۰۰متری از سطح دریا در رطوبت نسبی ۵۰ درصد و درجه حرارت ۳۰ درجه سانتیگراد؟

- درصورتیکه دما ۱۰ درجه کاهش پیدا نماید رطوبت نسبی چقدر خواهد بود؟
- اگر ارتفاع ۱۰۰۰ متر افزایش پیدا کند رطوبت نسبی چقدر خواهد بود؟