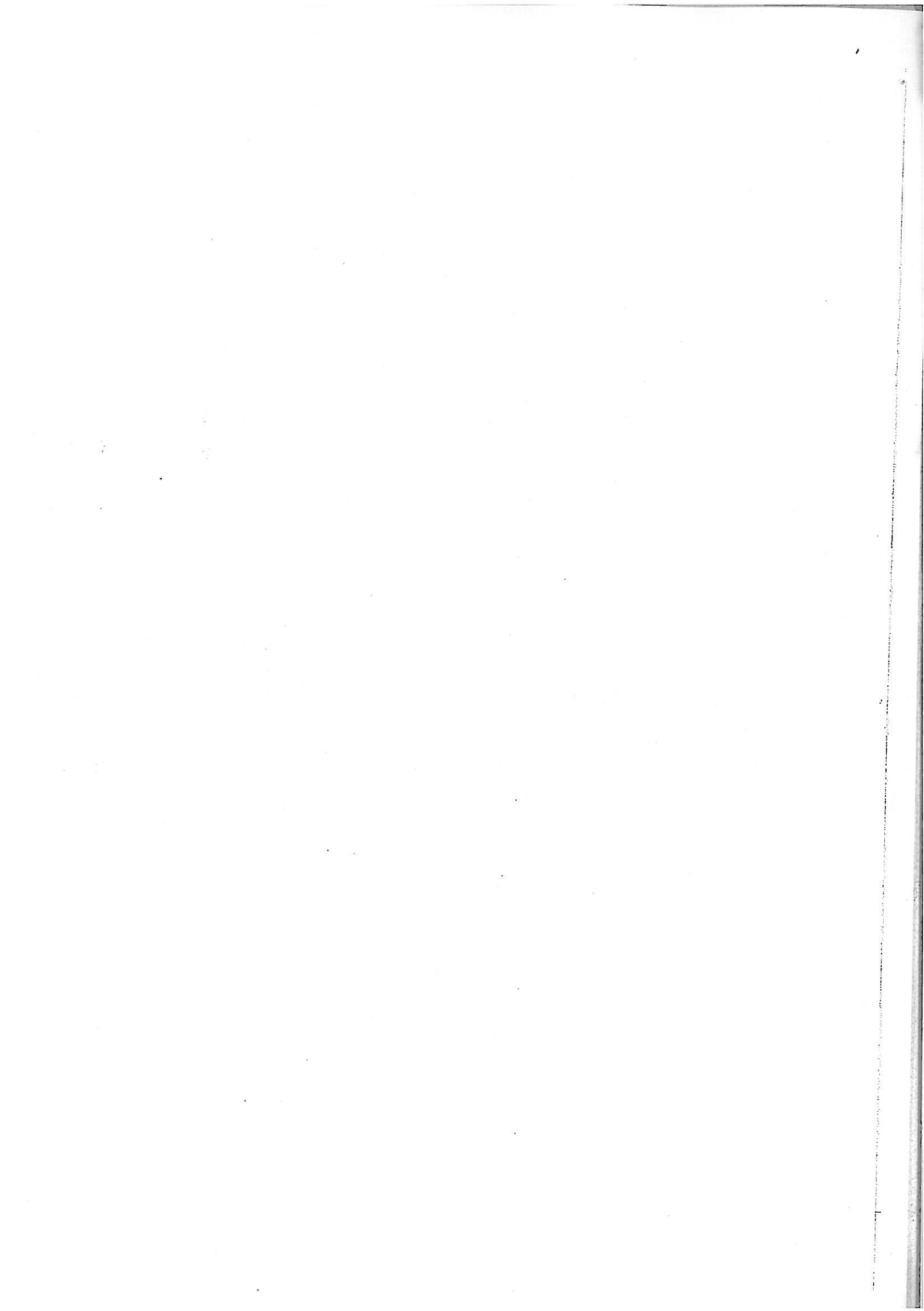
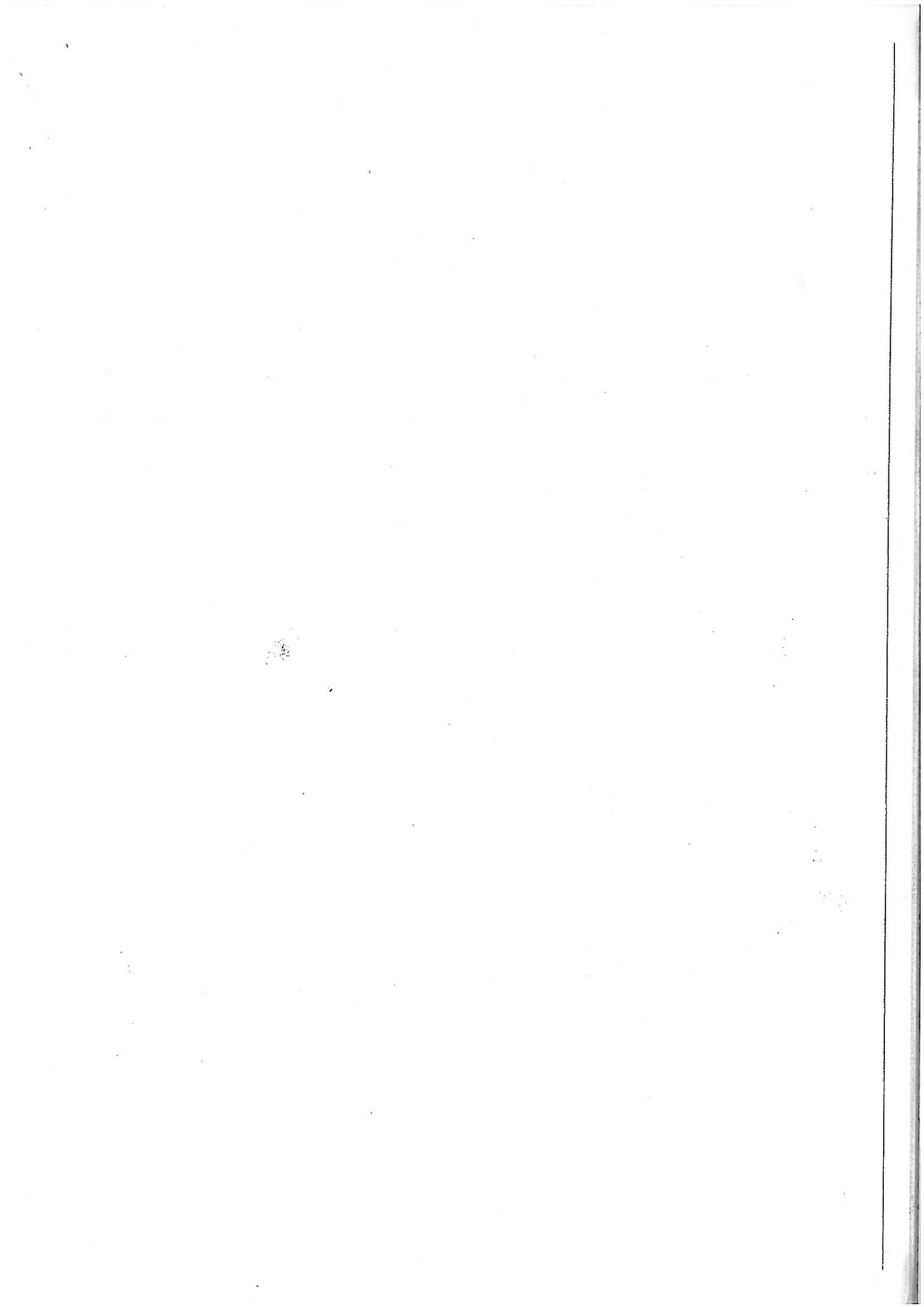


فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول:
۱	سیستم ابعادی و واحدها ۱-۱
۴	مفاهیم ۲-۱
۴	مقایسه جامدات و سیالات ۳-۱
۵	تعریف سیال ۴-۱
۶	تقسیم بندی سیالات ۵-۱
۷	نیروهای مؤثر در سیالات و خواص مربوطه ۶-۱
۸	جرم مخصوص و نیروی حرکتی ۷-۱
۸	وزن مخصوص و نیروی ثقل ۸-۱
۱۰	ضریب ارتجاع حجمی سیال و نیروی الاستیک ۹-۱
۱۵	لزجت سیال و نیروی لزجت ۱۰-۱
۲۴	کشش سطحی مایعات و نیروی کشش سطحی ۱۱-۱
۲۷	فشار و نیروی فشاری ۱۲-۱
	فصل دوم:
۳۸	ارزیابی تاثیر نیروها در جریان سیالات ۱-۲
۴۴	مطالعه سیال در حالت سکون ۲-۲
۴۷	انواع فشار ۳-۲
۴۸	وسایل اندازه گیری فشار ۴-۲
۵۵	نیروهای وارد بر سطوح مستوی در آب ۵-۲
۶۴	نیروهای وارد بر سطوح منحنی در آب ۶-۲
۷۱	شناوری ۷-۲
۷۴	پایداری اجسام غوطه ور و شناور ۸-۲
۸۴	تعداد نسبی مایعات ۹-۲

صفحه	عنوان
	فصل سوم:
۱۰۶	۱-۳ بررسی کینماتیکی جریان
۱۱۲	۲-۳ معادلات جریان یک بعدی - پایدار
۱۱۶	۳-۳ اصل حرکت - معادله جریان سیال
۱۱۹	۴-۳ اصل انرژی در جریان سیالات
۱۲۵	۵-۳ توان
۱۲۹	۶-۳ اندازه گیری پارامترهای انرژی جریان در هر مقطع
۱۳۵	۷-۳ کاربرد معادله انرژی در جریان مایعات
	فصل چهارم:
۱۵۸	۱-۴ مقدمه
۱۵۸	۲-۴ معادله عمومی مومنتم
۱۶۱	۳-۴ کاربرد اصل مومنتم
۱۶۷	۴-۴ نیروی عکس العمل یک فواره
۱۶۹	۵-۴ ممان مومنتم و کاربرد آن
۱۷۰	۶-۴ هیدرولیک جریان در پمپ های گریز از مرکز
	فصل پنجم:
	(مریدط ۴ گروه مکانیک)
۱۷۸	۱-۵ مقدمه
۱۷۹	۲-۵ معادله عمومی جریان سیال واقعی
۱۸۱	۳-۵ معادله افت انرژی در لوله ها
۱۸۱	۴-۵ معادله تنش برشی در لوله ها
۱۸۲	۵-۵ جریان آرام در لوله ها
۱۸۳	۶-۵ جریان متلاطم در لوله ها
۱۸۶	۷-۵ زبری لوله و ضریب زبری
۱۸۹	۸-۵ حل مسائل لوله ها
۱۹۲	۹-۵ افت های جزئی در مسیر لوله ها



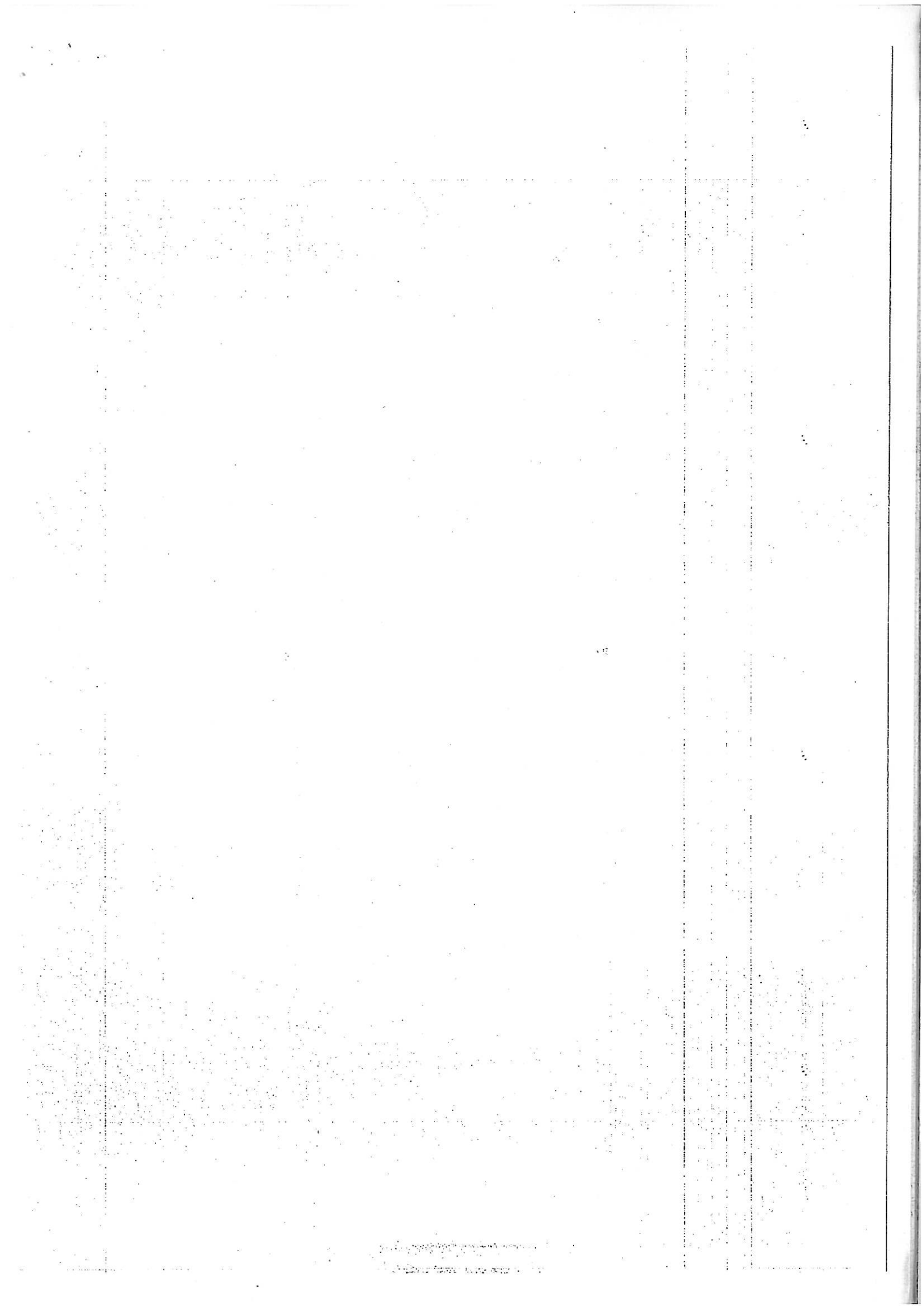


فصل اول:

خواص سیال

FLUID MECHANICS

- ۱-۱ سیستم ابعادی و واحدها
- ۲-۱ مفاهیم
- ۳-۱ مقایسه جامدات و سیالات
- ۴-۱ تعریف سیال
- ۵-۱ تقسیم بندی سیالات
- ۶-۱ نیروهای مؤثر در سیالات و خواص مربوطه
- ۷-۱ جرم مخصوص و نیروی حرکتی
- ۸-۱ وزن مخصوص و نیروی ثقل
- ۹-۱ ضریب ارتجاع حجمی سیال و نیروی الاستیک
- ۱۰-۱ لزجت سیال و نیروی لزجت
- ۱۱-۱ کشش سطحی مایعات و نیروی کشش سطحی
- ۱۲-۱ فشار و نیروی فشاری



سیستم ابعادی و واحدها (Dimensions and Units)



سیستم ابعادی: شاخص نوع کمیت بعد است. تمام کمیت‌های فیزیکی را می توان بصورت تابعی از کمیت‌های اصلی بیان نمود.

کمیت‌های اصلی: $\left. \begin{array}{l} \text{Mass (M)} \\ \text{Force (F)} \\ \text{Length (L)} \\ \text{Time (T)} \\ \text{Temperature (t)} \end{array} \right\}$

مثال ۱-۱

سرعت (Velocity): $v = \frac{dx}{dt} = \frac{\text{طول}}{\text{زمان}} \rightarrow$ بعد سرعت: $[v] = \frac{[x]}{[t]} = \frac{L}{T} = LT^{-1}$

شتاب (Acceleration): $a = \frac{dv}{dt} = \frac{\text{سرعت}}{\text{زمان}} \rightarrow$ بعد شتاب: $[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{LT^{-1}}{T} = LT^{-2}$

جرم مخصوص (Density): $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم}} \rightarrow$ بعد جرم مخصوص: $[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{M}{L^3} = ML^{-3}$

فشار (Piessuse): $P = \frac{F}{A} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح}} \rightarrow$ بعد فشار: $[P] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{F}{L^2} = FL^{-2}$

نکته: بعد F و بعد M قابل جایگزینی هستند. چگونه؟

Newton 2nd Law: $F = ma \rightarrow [F] = [m][a] = MLT^{-2}$

نتیجه:

سیستم ابعادی: دو سیستم ابعادی داریم،

- ۱- سیستم ابعادی فیزیکی $MLTt$
- ۲- سیستم ابعادی مکانیکی $FLTt$

سیستم واحدی: شاخص اندازه کمیت واحد است. دو سیستم واحدی داریم،

$F = m.a$ $\left\{ \begin{array}{l} 1N = 1Kg \times \frac{m}{s^2} \leftarrow \text{System International (SI)} \quad \text{۱- سیستم بین‌المللی} \\ 1lb = 1slug \times \frac{ft}{s^2} \leftarrow \text{English System (ES, BG)} \quad \text{۲- سیستم انگلیسی} \end{array} \right.$

جداول (۱-۱) و (۲-۱) ملاحظه شوند.

In BG units: $W = mg = (1 \text{ slug})(32.2 \text{ ft/sec}^2) = 32.2 \text{ lb};$

In SI units: $W = mg = (1 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) = 9.81 \text{ N}.$

انواع معادلات: ۲ نوع معادله

۱- معادلات ابعادی: Dimensionally Homogeneous Eqs.

تمام ترم‌ها بعد یکسان دارند و معادله تابع سیستم واحدها نیست.

$A = B + C - D + H.L - \frac{F}{E}$

مثال: $Q = A \times V \rightarrow [Q] = L^3 T^{-1}, \quad [A] = L^2, \quad [V] = LT^{-1}$

$h = \frac{1}{2} g t^2 \rightarrow [h] = L, \quad [g] = LT^{-2}, \quad [t^2] = T^2,$ عدد بدون بعد $\frac{1}{2}$

۲- معادلات تجربی: Empirical Eqs.

از نظر ابعادی همگن نیستند و تابع سیستم واحدی است.

$$A = B + 2$$

مثال: $Q = 5A^2 \rightarrow [Q] = L^3T^{-1}, [A^2] = L^4$, عدد ۵ بدون بعد نیست.

مسئله: نوع معادله را تعیین کنید؟

$$H = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z$$

$$V = 15h + 3$$

جدول ۱-۱: ابعاد اصلی و تبدیل واحدها

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

Parameter	British Engineering System to International System	International System to British Engineering System
Length	1 in = 0.0254 m 1 ft = 0.3048 m	1 m = 39.37 in 1 m = 3.281 ft
Mass	1 slug = 14.59 kg	1 kg = 0.06854 slug
Force	1 lb = 4.448 N	1 N = 0.2248 lb
Time	1 sec = 1 s	1 s = 1 sec
Specific (or unit) weight	1 lb/ft ³ = 157.1 N/m ³	1 N/m ³ = 0.006366 lb/ft ³
Mass density	1 slug/ft ³ = 515.2 kg/m ³	1 kg/m ³ = 0.001941 slug/ft ³
Specific gravity	Same dimensionless value in both systems	Same dimensionless value in both systems
Dynamic viscosity	1 lb-sec/ft ² = 47.88 N-s/m ²	1 N-s/m ² = 0.02089 lb-sec/ft ²
Kinematic viscosity	1 ft ² /sec = 0.09290 m ² /s	1 m ² /s = 10.76 ft ² /sec
Pressure	1 lb/ft ² = 47.88 Pa 1 lb/in ² = 6.895 kPa	1 Pa = 0.02089 lb/ft ² 1 kPa = 0.1450 lb/in ²
Surface tension	1 lb/ft = 14.59 N/m	1 N/m = 0.06853 lb/ft

جدول ۱-۲: لیست اختصارات هیدرولیکی

LIST OF ABBREVIATIONS	
abs = absolute	α (alpha) angle, kinetic energy correction factor
atm = atmospheric	β (beta) angle, momentum correction factor
avg = average	γ (gamma) specific (or unit) weight
bhp = brake (or shaft) horsepower	δ (delta) boundary layer thickness
Btu = British thermal unit	Δ (delta) flow correction term
cal = calorie	ϵ (epsilon) surface roughness
cfm = cubic feet per minute	η (eta) eddy viscosity
cfs = cubic feet per second	θ (theta) any angle
cm = centimeter	μ (mu) absolute viscosity
d = day or days (SI)	ν (nu) kinematic viscosity
fpm = feet per minute	π (pi) dimensionless parameter
fps = feet per second	ρ (rho) density
ft = foot or feet	σ (sigma) surface tension, intensity of tensile stress
g = gram or grams	τ (tau) shear stress
gal = gallon	ϕ (phi) speed factor, velocity potential, ratio
gpm = gallons per minute	ψ (psi) stream function
h = hour or hours (SI)	ω (omega) angular velocity
ha = hectare	
hp = horsepower	
hr = hour or hours (BG)	
Hz = hertz (cycles per second)	
in = inch or inches	
J = joules = N·m = W·s	
kg = kilograms = 10 ³ grams	
kgf = kilogram force	
kgm = kilogram mass	
km = kilometer	
L = liter	
lb = pounds of force (not lbs)	

جدول ۱-۳: ابعاد اصلی در سیستم واحدها

Dimension	BG unit	SI unit
Length (L)	Foot (ft)	Meter (m)
Mass (M)	Slug ^a	Kilogram (kg)
Time (T)	Second (sec)	Second (s)
Force (F)	Pound (lb)	Newton (N) ^b
Temperature		
Absolute	Rankine (°R)	Kelvin (K)
Ordinary	Fahrenheit (°F)	Celsius (°C)

^a Derived unit (lb·sec²/ft).^b Derived unit (kg·m/s²).

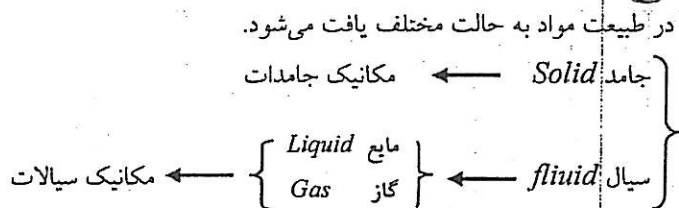
جدول ۱-۴: ابعاد و واحدهای کمیت های هیدرولیکی

Quantity	Commonly used dimensions	BG unit	SI unit
Acceleration (a)	LT^{-2}	ft/sec ²	m/s ²
Area (A)	L^2	ft ²	m ²
Density (ρ)	ML^{-3}	slug/ft ³	kg/m ³
Energy, work or quantity of heat	FL	ft·lb	N·m = J
Flowrate (Q)	L^3T^{-1}	ft ³ /sec (cfs)	m ³ /s
Frequency	T^{-1}	cycle/sec (sec ⁻¹)	Hz (hertz, s ⁻¹)
Kinematic viscosity (ν)	L^2T^{-1}	ft ² /sec	m ² /s
Power	FLT^{-1}	ft·lb/sec	N·m/s = W
Pressure (p)	FL^{-2}	lb/in ² (psi)	N/m ² = Pa
Specific weight (γ)	FL^{-3}	lb/ft ³ (pcf)	N/m ³
Velocity (V)	LT^{-1}	ft/sec (fps)	m/s
Viscosity (μ)	FTL^{-2}	lb·sec/ft ²	N·s/m ²
Volume (V)	L^3	ft ³	m ³

جدول ۱-۵: علائم نمایی اعداد در سیستم بین المللی

Prefixes for SI Units		
Factor by Which Unit Is Multiplied	Prefix	Symbol
10 ¹²	tera	T
10 ⁹	giga	G
10 ⁶	mega	M
10 ³	kilo	k
10 ²	hecto	h
10	deka	da
10 ⁻¹	deci	d
10 ⁻²	centi	c
10 ⁻³	milli	m
10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁻¹²	pico	p
10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ⁻¹⁸	atto	a

۱-۱ مفاهیم:



مکانیک سیالات مطالعه قوانین و اصول حاکم بر تعادل و حرکت سیالات و مکانیک جامدات مطالعه قوانین اجزاء صلب و اجزاء قابل تفکیک و مستقل می‌باشد. در مکانیک سیالات ذرات نسبت به هم حرکت نسبی دارند و بصورت یک حجم کنترل (*Control Volume*) بررسی می‌شود. مکانیک سیالات به سه بخش عمده تقسیم می‌شود.

۱- استاتیک سیالات (*Fluid Statics*) یا هیدرواستاتیک (*Hydro Statics*): بررسی سیال در حالت سکون یا تعادل ایستایی (مطالعه فشار، نیرو، ...).

۲- کینماتیک سیالات (*Fluid Kinematics*): مطالعه خصوصیات جریان (سرعت، فشار، هندسه جریان و ...) بدون در نظر گرفتن نیروها و انرژی مؤثر.

۳- دینامیک سیالات (*Fluid Dynamics*): مطالعه خصوصیات جریان (سرعت، شتاب، جهت و ...) در ارتباط با نیروهای مؤثر.

هیدرولیک (*Hydraulics*): بیشتر در مورد مایعات (آب) بحث می‌کند. آئرو دینامیک (*Aero-Dynamics*) و ترمودینامیک (*Thermo-Dynamics*) در مورد گازها و بخارات بحث می‌کند.

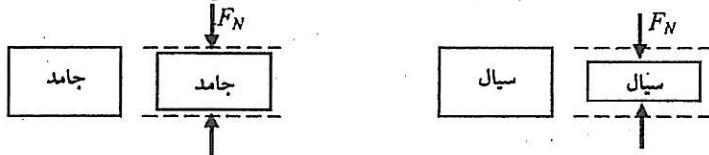
۱-۲ مقایسه جامدات و سیالات:

۱- از نظر فاصله مولکولی: $F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}$ → قانون جاذبه نیوتن

در جامدات، فاصله مولکولی (r) بسیار کم، جاذبه زیاد، مولکولها متراکم‌تر و بصورت صلب (*Rigid*) و در سیالات فاصله مولکولی (r) بیشتر، جاذبه کمتر است. در سیالات مولکولها قابلیت حرکت نسبی و قابلیت جریان و سیلان (*Flow*) دارند. همچنین قابلیت انتشار در گازها بسیار بیشتر از مایعات است. گازها در فضا منتشر می‌شوند ولی مایعات در ظرف خود، سطح آزاد ایجاد می‌کنند.

۲- از نظر تأثیر نیروها:

۱-۲ تحت نیروی فشاری (*Compression*)، تراکم پذیری بصورت جامد > مایع >> گاز می‌باشد. علت: فاصله مولکولی است.



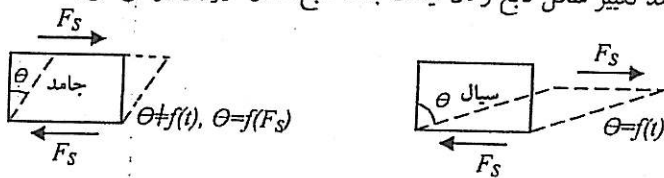
شکل ۱-۱: تأثیر نیروی فشاری

۲-۲ تحت نیروی کششی (*Tension*):

جامدات مقاومت کششی دارند و تا حدی نیز تغییر فرم آنها *Elastic* (برگشت‌پذیر خطی) است ولی سیالات، تحت تأثیر کشش، سریعاً گسیخته (*Fail*) می‌شوند. زیرا باند مولکولی قوی ندارند.

۳-۲ تحت نیروی برشی (*Shear*):

جامدات، مقاومت برشی دارند. تغییر فرم آنها در محدوده *Elastic* متناسب با تنش برشی است. در سیالات، نیروی چسبندگی مولکولی (مقاومت برشی) در برابر تنش برشی خارجی ناچیز است. سیال تحت تنش برشی بطور دائم و پیوسته تغییر فرم یافته و برگشت پذیری ندارند. بهمین دلیل، سیال با اعمال تنش برشی (*Shear Stress*) به جریان درمی آید (*Flow*). تغییر شکل در سیال با اعمال نیروی برشی (هر اندازه کم) شروع و ادامه می یابد پس تغییر شکل در سیال تابع زمان است. در اجسام جامد تغییر شکل تابع زمان نیست بلکه تابع اندازه نیروی برشی می باشد.



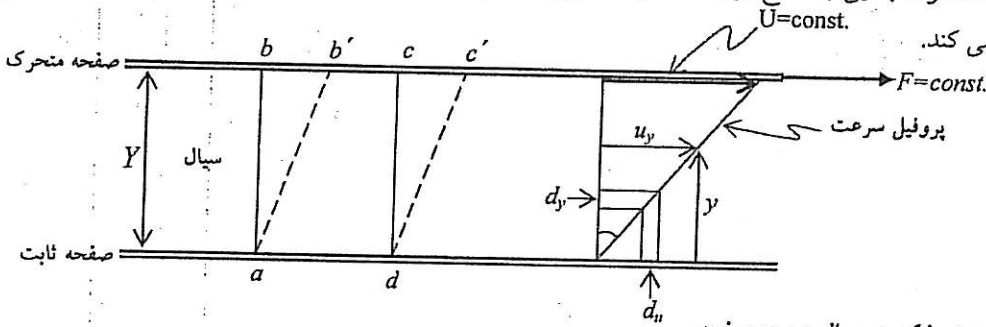
شکل ۱-۲: تغییر شکل با اعمال نیروی برشی

تعریف سیال (Fluid):

سیال حجم مادی پیوسته ای است که در اثر کمترین تنش برشی خارجی (*Shear Stress*) از خود کمترین مقاومتی نشان نداده و بطور دائم تغییر شکل می یابد.

اصول شناخت سیال:

- ماده ای را بین دو صفحه موازی (یکی ثابت و دیگری متحرک) با فاصله کم Y در نظر بگیرید.
- صفحه متحرک بالایی با سطح بزرگ A توسط نیروی یکنواخت F کشیده می شود؛ که با سرعت یکنواخت U حرکت می کند.



شکل ۱-۳: ایجاد گرادیان هیدرولیکی در سیال، بین دو صفحه

- تنش برشی متوسط بر روی سطح بالایی ماده اعمال می شود:

$$\tau_{(mean)} = \frac{F}{A}$$

(۱-۱)

- اگر حجم ماده ای از موقعیت اولیه ($a b c d$) به موقعیت جدید ($a b' c' d'$) تغییر شکل یافته و جابجا شود، در این صورت ماده مزبور، سیال است. یعنی سیال در مقابل تنش برشی مقاومتی نشان نمی دهد و جریان می یابد.
- نتایج تجربی نشان می دهد که لغزشی بین سیال و صفحه متحرک بالایی بوجود نمی آید. ذرات سیال در تماس با صفحه متحرک با همان سرعت U حرکت می کنند. همچنین ذرات سیال در تماس با صفحه ثابت پائینی تحت تنش برشی نبوده و حرکت نمی کنند.

- گرادیان سرعت در عمق سیال وجود دارد.

$$\begin{cases} At \ y = 0 \rightarrow u = 0 \\ At \ y = Y \rightarrow u = U \end{cases} \Rightarrow (0 < y < Y \Rightarrow \frac{du}{dy} \neq 0)$$

- وجود گرادیان سرعت $(\frac{du}{dy})$ نشانگر وجود مقاومت برشی بین ذرات و لایه‌های سیال است. این مقاومت برشی در سیال در اثر خاصیت چسبندگی یا لزجت (*Viscosity*) است (این مقاومت در برابر تنش خارجی برشی ناچیز و تقریباً صفر است).

- برای جریان آرام (*Laminar Flow*) و سیال لزج حرکت ذرات با سرعت کم و بموازات یکدیگر خواهد بود.

$$\begin{cases} F \propto \frac{du}{dy} \\ F \propto A \end{cases} \Rightarrow F \propto A \frac{du}{dy}, \quad F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-1)$$

μ : ضریب تناسب = شاخص خاصیت فیزیکی سیال مربوط به چسبندگی بین ذرات = *Viscosity* (تابع نوع سیال و دما)

تقسیم بندی سیالات:

۱- سیال واقعی (*Real Fluid*):

در سیال واقعی خاصیت چسبندگی وجود دارد در نتیجه مقاومت برشی بین لایه‌های سیال در برابر حرکت، اصطکاک بین لایه‌های سیال و گرادیان سرعت در عمق سیال وجود دارد.

$$\begin{cases} \text{if } \tau \neq 0 \rightarrow \frac{du}{dy} \neq 0 & \text{(سیال روان)} \\ \text{if } \tau = 0 \rightarrow \frac{du}{dy} = 0 & \text{(سیال ساکن)} \end{cases}$$

۱-۱- سیال نیوتنی (*Newtonian Fluid*):

سیالی که لزجت (μ) در تمام نقاط آن ثابت و یکسان باشد را نیوتنی گویند. مانند گازها و سیالات رقیق و ساده (مثل آب)، ترکیبات ساده روغن.

$$\mu = \frac{\tau}{(du/dy)} = \text{Const}$$

۲-۱- سیال غیر نیوتنی (*Non Newtonian*):

سیالی که لزجت (μ) در قسمت‌های مختلف آن ثابت نیست. مانند سیالات مرکب و غلیظ (خون، شیر، مواد رنگریزی، مواد نفتی سنگین، شیره نباتات).

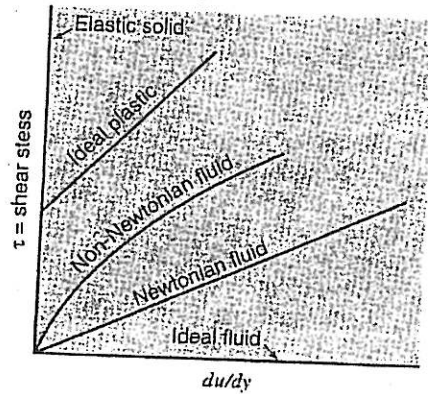
$$\mu \neq \text{const}$$

$$\tau^n = \mu \left(\frac{du}{dy} \right), \quad \mu = f \left(\frac{du}{dy} \right)$$

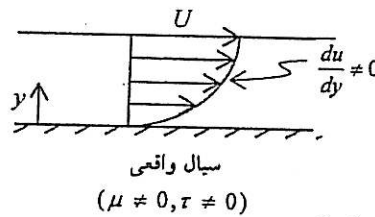
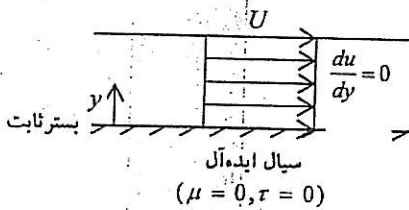
۲- سیال ایده‌آل (*Ideal Fluid*):

یک سیال فرضی، بدون لزجت، بدون مقاومت برشی در بین لایه‌ها و بدون اصطکاک است. لایه‌های سیال نسبت به هم حرکت و لغزش ندارند و سیال بصورت یک حجم در نظر گرفته می‌شود. با اعمال نیروی برشی خارجی، تمام حجم سیال با سرعت U حرکت می‌کند.

$$\tau = 0, \quad \mu = 0 \Rightarrow \frac{du}{dy} = 0$$



شکل ۱-۳: تقسیم بندی سیالات



شکل ۱-۴: مقایسه سیال ایده آل و سیال واقعی

نیروهای مؤثر در سیالات و خواص مربوطه

(Forces acting in fluids and their related Properties)

در سیالات ۱- نیروهای مؤثر ۲- هندسه مجرای جریان (بدلیل شکل پذیری)، مشخصات جریان و حرکت سیال را تعیین می کند.

نکات مهم:

- ۱) چه نیروهایی به ذرات سیال وارد می شود؟
- ۲) رابطه هر یک از نیروها با خواص سیال؟
- ۳) در یک شرایط جریان معین، کدام نیروها مؤثر هستند؟
- ۴) چگونه بر نحوه جریان اثر می گذارند؟

نیروهای مهم در سیالات:

در سیالات، ۶ نیروی مؤثر وجود دارد که مستقیم بستگی به خواص سیال (Fluid Properties) و هندسه مجرای جریان (Flow Boundary) دارد. این نیروها و خواص مربوط به نیروها عبارتند از:

- نیروی حرکتی ↔ جرم مخصوص
- نیروی ثقل ↔ وزن مخصوص
- نیروی الاستیک (تراکمی) ↔ ضریب ارتجاع حجمی
- نیروی لزجت ↔ لزجت
- نیروی کشش سطحی ↔ کشش سطحی
- نیروی فشاری ↔ فشار

نیروی حرکتی در واقع برآیند نیروهای مؤثر در جریان سیال را شامل می شود.

۷-۱) جرم مخصوص و نیروی حرکتی (Fluid Density (ρ) and The Inertia Force (F_I))

وقتی جرم (m) تحت شتاب (a) قرار گیرد، نیروی حرکتی (F_I) وجود دارد. بعبارت دیگر اگر جسمی تحت یک نیروی جثی نشده قرار گیرد، دارای شتابی متناسب و هم جهت با نیرو خواهد بود.



$$F_I = ma$$

Newton's 2nd law of Motion

F_I : برآیند نیروهای وارده بر سیال و m جرم ($Mass$) شاخص مستقلی از مکان و شتاب ثقل است.

در سیالات، ذرات نسبت به هم ثابت نیستند و شکل پذیری دارند. بنابراین بصورت حجم (V : Volume) در نظر

گرفته می‌شوند و عموماً بجای جرم (m) از پارامتر جرم واحد حجم ($\rho = \frac{m}{V}$) استفاده می‌شود. ρ : جرم

مخصوص ($Density$) یا دانسیته خاصیت فیزیکی سیال است. دانسیته بستگی دارد به نوع سیال، دما و فشار که در

جداول (۳-۱) تا (۷-۱) آورده شده است.

$$Density: \rho = \frac{m}{V}, \quad [\rho] = \frac{M}{L^3} = ML^{-3}, \quad (SI: Kg/m^3)$$

$$m = \rho V \rightarrow F_I = \rho V a \quad (3-1)$$

معادله (۳-۱)، رابطه بین نیروی F_I با خاصیت فیزیکی سیال ρ را نشان می‌دهد. در این معادله ∇ هندسه جریان و a کینماتیک جریان را نشان می‌دهد. a شتاب ($Acceleration$) است که در حالت کلی در اثر ۱- تغییر در جهت و

مسیر جریان (شتاب عمودی- گریز از مرکز، $a_n = \frac{v^2}{r}$) و ۲- در اثر تغییر در سرعت جریان- (شتاب

مماسی $a_t = \frac{dv}{dt}$) ایجاد می‌شود. شتاب برآیند از مجموع آنها ($a = a_n + a_t$) حاصل می‌شود.

نتیجه: وقتی ذره سیال یا حجم سیال، تغییر در جهت و یا مقدار سرعت داشته باشد، دارای شتاب (a) بوده و نیروی

حرکتی (F_I) وجود دارد. F_I بجز در حالت سیال ساکن ($v=0$)، جریان یکنواخت و مستقیم

الخط ($a_n = 0, \frac{dv}{dt} = 0$) و سرعت های خیلی کم ($v \leq 1^{m/day}$) در دیگر حالات جریان سیال وجود دارد.

۸-۱) وزن مخصوص و نیروی ثقل ($Specific Weight (\gamma)$ and the Gravity Force (F_g))

نیروی ثقل حالت خاصی از اصل دوم نیوتن است که به جای شتاب (a)، شتاب ثقل زمین (g) جایگزین می‌شود.

شتاب ثقل ($Acceleration due to Gravity$): شتاب ناشی از نیروهای جاذبه بین زمین و جسمی به جرم (m)

مقدار g در یک محل، ثابت و جهت آن به سمت مرکز زمین است ($g = 9.81 \frac{m}{s^2}$).



$$\bar{F} = m\bar{a}$$

$$\bar{a} = g \rightarrow F_g = mg = W \quad \text{وزن:}$$

$$F_g = mg = (\rho V)g = (\rho g)V = \gamma V = W \quad (4-1)$$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \rho g$$

$$[\gamma] = \frac{F}{L^3} = FL^{-3} = ML^{-2}T^{-2} \quad (SI: N/m^3)$$

$Specific Weight: \gamma$ = وزن مخصوص = وزن واحد حجم سیال (تابع نوع سیال، دما و فشار) و یک خاصیت

فیزیکی سیال است که در جداول (۷-۱) تا (۱۰-۱) بر اساس نوع سیال و دما بدست می‌آید.

تعریف:

- حجم مخصوص (*Specific Volume*): حجم واحد وزن یا جرم سیال است که با v نشان داده می‌شود.

$$v = \frac{1}{\gamma} \quad , \quad [v] = F^{-1}L^3 \quad \text{برای مایعات:}$$

$$v = \frac{1}{\rho} \quad , \quad [v] = M^{-1}L^3 \quad \text{برای گازها: (در گازها، } g \text{ موثر نیست)}$$

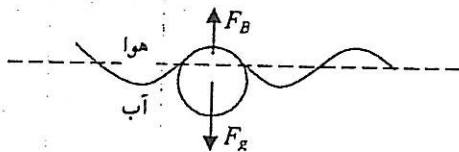
- دانسیته ویژه یا چگالی (*Specific Gravity*): برای مایعات، نسبت وزن مخصوص (یا جرم مخصوص) مایع به آب خالص (آب خالص در دما و فشار استاندارد)، برای گازها، نسبت به هوا یا هیدروژن در شرایط استاندارد است. با S_g نشان داده می‌شود و بدون بعد است.

$$S_f = \frac{\gamma_f}{\gamma_w} = \frac{\rho_f}{\rho_w} \quad , \quad (\rho_{\text{atm}} = 1 \text{atm}, T_c = 15^\circ\text{C})$$

$$S_g = \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{H_2}}$$

نکته: F_g همیشه وجود دارد، ولی وقتی در جریان سیال موثر است که ختشی نشده باشد. در حالتی زیر F_g موثر نیست.

- اگر وزن مخصوص شما معادل وزن مخصوص آب باشد ($\gamma = \gamma_w$) در این صورت وزن شما در حالت غوطه وری کامل صفر است و نیروی شناوری (آرشمیدسی)، نیروی ثقل را ختشی میکند.
- آب در استخر سر پوشیده (یعنی باد نباشد) در این صورت سطح آب افقی و ساکن است و موج نداریم.
- حالتی که F_g موثر است:
- آشفستگی در فصل مشترک دو سیال (مخلوط نشدنی) با وزن مخصوص مختلف بوجود آید. مثال: در سطح آزاد آب (فصل مشترک آب و هوا)، موج سطحی ایجاد شود. موج حرکت می‌کند تا به حالت تعادل افقی سطح آب برسد.
- چگونه؟ برای ذرات سطحی آب:



شکل ۱-۲: تغییر شکل با اعمال نیروی برشی

$V_t = V_w + V_a$: حجم کل ذره آب، V_w : حجمی که در آب است، V_a : حجمی که در هوا است.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_g = \gamma_w V_t = \gamma_w V_w + \gamma_w V_a \\ F_B = \gamma_w V_w + \gamma_a V_a \\ \gamma_a \ll \gamma_w \end{array} \right\} \Rightarrow F_g > F_B$$

یعنی نیروی ثقل کاملاً ختشی نمی‌شود و ($F_g - F_B$) یک نیروی موثر (ثقلی) است که باعث حرکت می‌شود. چون آب شکل پذیری دارد، تحت نیروی قائم F_g ختشی نشده، باعث حرکت موج به سمت تعادل افقی (سطح آب) می‌شود.

- جریان در مجاری روباز (روی شیب) در کانالها، رودخانه‌ها لوله‌های نیمه پر، جریان روی سرریزها.
- جریان های سیلابی، ایجاد موج و جریان غیر یکنواخت و ناپایدار در رودخانه.

۹-۱ ضریب ارتجاع حجمی سیال و نیروی الاستیک

: Fluid Bulk Modulus of Elasticity (E) and The Elastic Force (F_E)

تغییر پذیری حجم یا جرم مخصوص، تحت تاثیر فشار و دما را تراکم پذیری گویند که از خواص سیالات است. تراکم پذیری سیال بر اساس شاخص ضریب ارتجاع حجمی سیال (E_v) محاسبه می شود.

$$E = \frac{dP}{dV/V}$$

$$E_v = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V} = -\frac{P_2 - P_1}{(V_2 - V_1)/V_1} \quad (5-1)$$

$$[E_v] = [P] = FL^{-2} \quad , \quad (SI: N/m^2)$$

و آن عبارت است از نسبت تغییر فشار به ازای تغییر در واحد حجم نسبی سیال و علامت منفی نشان می دهد که افزایش فشار باعث کاهش حجم می گردد. P_2, P_1 : به ترتیب فشار اولیه و فشار ثانویه، V_2, V_1 : به ترتیب حجم اولیه و حجم ثانویه است.

الف) در مایعات: در تراکم پذیری، جرم مایع ثابت می ماند ولی حجم آن کاهش می یابد. در مایعات E_v به نوع سیال، فشار و دما بستگی دارد.

$$m = \rho V = \text{Const.} \quad \text{جرم مایع}$$

$$\text{تحت تراکم: } dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0 \rightarrow \rho dV = -V d\rho \rightarrow \frac{dV}{V} = -\left(\frac{d\rho}{\rho}\right)$$

$$E_v = -\frac{dP}{dV/V} = \frac{dP}{d\rho/\rho} = \frac{dP}{d\gamma/\gamma}$$

ب) تراکم پذیری در گازها:

بر خلاف مایعات، E_v بسادگی و بصورت ضرائب تجربی ارائه نشده است. بر اساس معادله حالت برای گازهای کامل ارائه شده است.

$$Pv = RT$$

(6-1)

P : فشار مطلق، v : حجم مخصوص، T : دمای مطلق، R : ثابت گاز (جدول ۱-۱)

شرایط خاص فیزیکی:

• شرایط *Isothermal*: فرآیند تراکم گاز در دمای ثابت است. مثال: جریان گاز از یک لوله در زیر دریا، در هوا (روی زمین).

$$T = \text{Const.} \quad , \quad Pv = \text{Const.}$$

$$E_v = P$$

ثابت کنند:

• شرایط *Adiabatic*: فرآیند تراکم بدون تبادل حرارتی با محیط خارج است یا *Isentropic Adiabatic* که

جریان گاز وقتی تغییر حرارتی در اثر اصطکاک ناچیز است. مثال: تراکم گاز در یک سیستم ایزوله (تراکم-افزایش حرارت داخلی گاز)- جریان گاز از یک نازل- حرکت امواج صوتی در گازها. در این شرایط، معادله عمومی

Poly Tropic برای گازهای کامل:

$$Pv^K = \text{Const.} \quad , \quad K = \frac{C_p}{C_v}$$

$$E_v = KP$$

C_p : گرمای ویژه در فشار ثابت، C_v : گرمای ویژه در حجم ثابت.

ثابت کنید در شرایط *Adiabatic* روابط زیر برقرار است:

$$Pv = RT$$

معادله عمومی حالت:

$$Pv^{\kappa} = Const.$$

معادله عمومی *Polytropic*:

$$E_v = KP$$

ضریب ارتجاع حجمی:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

نیروی الاستیک (تراکم) *Elastic Force* را با F_E نشان میدهند. در شرایطی که تراکم پذیری سیال قابل ملاحظه

باشد، نیروی F_E تاثیر مهمی در نحوه جریان سیال دارد.

$$F_E = E_v A$$

(۷-۱)

A : سطحی از سیال که تحت نیروی فشار تراکمی است.

شاخص ارزیابی اهمیت تراکم پذیری در جریان سیالات عدد ماخ (*Mach No.*) نام دارد.

$$M = \frac{V}{C}$$

(۸-۱)

$$C = \sqrt{E_v / \rho}$$

C : *(Sonic Velocity)* سرعت صوت در سیال مورد نظر و نمایشی از خاصیت فیزیکی سیال است. سرعت صوت

در هوای استاندارد $C = 341 m/s$ و در آب معمولی $C \approx 1500 m/s$ است. چرا بیشتر از هوا؟

If $M < 0.3 \Rightarrow$ *Incompressible Fluid* (سیال غیر قابل تراکم)

$$\Rightarrow \rho = Const. , \gamma = \rho g = Const.$$

$$\Rightarrow F_E \text{ is Negligible } (F_E \approx 0)$$

مثال: آب تحت فشارهای معمولی، جریان آب در لوله‌ها، کانالها و رودخانه‌ها، جریان باد، حرکت هواپیما، زیردریایی.

If $M \geq 0.3 \Rightarrow$ *Compressible Fluid* (سیال قابل تراکم)

$$\Rightarrow \rho \neq Const. , \gamma = \rho g \neq Const.$$

$$\Rightarrow F_E \text{ is to be Considered}$$

مثال: پرواز موشک مافوق صوت ($V > C$)، آب تحت فشارهای ناگهانی (ضربه قوچ در لوله‌ها).

جدول ۱-۶: ضریب ارتجاع حجمی آب E_v (بر حسب فشار و دما)

فشار مطلق ($P_{abs.}$) $(P \times 10^{-6}) N/m^2$	دما: $T^{\circ}C$			
	۰	۲۰	۵۰	۱۰۰
۰.۱	۱۹۵۰	۲۱۳۰	۲۲۱۰	۲۰۵۰
۱۰	۲۰۰۰	۲۲۰۰	۲۲۸۰	۲۱۳۰
۳۰	۲۱۱۰	۲۳۲۰	۲۴۱۰	۲۲۵۰
۱۰۰	۲۵۳۰	۲۷۳۰	۲۸۴۰	۲۷۰۰

نتایج جدول:

- ۱- در هر فشار معین، حداقل تراکم پذیری آب (یا ماکزیمم E_v) در دمای $50^{\circ}C$ است.
- ۲- در هر دمای معین، با افزایش فشار، مقدار E_v افزایش یا تراکم پذیری آب کاهش می‌یابد.

مثال ۲-۱

اگر به $(0.2m^3)$ آب با دمای $(20^\circ C)$ فشاری برابر $(10^6 N/m^2)$ وارد شود، مقدار کاهش حجم و حجم جدید آن چقدر خواهد بود؟

حل

$$(T = 20^\circ C, P = 10^6 N/m^2) \xrightarrow{\text{جدول (۱-۱) با میانایی}} E_v = 2136 \times 10^6 N/m^2 \approx 2.2 \times 10^9 N/m^2$$

$$V_1 = 0.2m^3, \quad dP = 10^6 N/m^2$$

$$E_v = -\frac{d\rho}{dV/V} \rightarrow 2.2 \times 10^9 (N/m^2) = \frac{10^6 (N/m^2)}{-dV/V} \quad \frac{dV}{V} = -\left(\frac{1}{2200}\right)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dV}{V_1} \rightarrow dV = -\left(\frac{1}{2200}\right)0.2m^3 = \frac{-1}{11000}m^3 \quad \text{کاهش حجم:}$$

$$dV = V_2 - V_1 \rightarrow V_2 - 0.2 = -\frac{1}{11000} \rightarrow V_2 = \left(0.2 - \frac{1}{11000}\right)m^3 \quad \text{حجم ثانویه:}$$

نتیجه: تغییر حجم آب (تراکم پذیری) در فشارهای معمولی ناچیز است.

مثال ۳-۱

الف) برای اکسیژن (O_2) در دمای $40^\circ C$ و فشار مطلق 100^{Kpas} ، V, γ, ρ را تعیین کنید؟ ب) اگر اکسیژن در شرایط *Adiabatic* (بدون تبادل حرارتی) متراکم شده و حجم آن به اندازه 40% اولیه کاهش یابد، T, P و E_v را تعیین کنید؟ ج) اگر اکسیژن در شرایط *Isothermal* (دمای ثابت) متراکم شده و حجم آن به 40% اولیه کاهش یابد، T, P و E_v را تعیین کنید؟

حل

ثابت گاز اکسیژن از جدول (۱-۱) $(10-1)$

$$(T^c = 40, \quad P_{obs} = 100kpas)$$

$$R = 260 \frac{N-m}{kg-k^\circ}$$

$$\left\{ T^k = 213 + T^c \right.$$

$$\left. \left\{ Kpas. = 10^3 (Pascal) = 10^3 N/m^2 \right. \right.$$

$$\gamma = \rho g, \quad v = \frac{1}{\rho}$$

$$\text{ثابت گاز اکسیژن از جدول (۱-۱): } \rho V = RT \quad \text{یا} \quad P\left(\frac{1}{\rho}\right) = RT \quad \text{یا} \quad \rho = \frac{P}{RT}$$

$$\rho = \frac{100kpas. \times (10^3 N/m^2 / kpas.)}{\left(260 \frac{N-m}{kg-k^\circ}\right) \times (273 + 40^{k^\circ})} = 1.23 kg/m^3$$

$$\gamma = \rho g = \left(1.23 kg/m^3\right) \times (9.81 m/s^2) = 12.07 \left(\frac{kg.m}{s^2.m^3}\right) = 12.07 N/m^3$$

$$V = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1.23 \text{ kg/m}^3} = 0.813 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

(ب)

Adiabatic برای شرایط: $Pv^k = \text{Const.}$ یا $P_1 v_1^k = P_2 v_2^k$

از جدول (۱-۱) برای اکسیژن: $K = 1.4$

همچنین: (حجم) $v \propto V$ (حجم مخصوص)

$$P_1 v_1^{1.4} = P_2 v_2^{1.4}$$

$$v_1 = 0.813 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad v_2 = 0.40 v_1 = 0.325 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad P_1 = 100 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$\therefore (10^5 \text{ N/m}^2)(0.813 \text{ m}^3 / \text{kg})^{1.4} = P_2 (0.325 \text{ m}^3 / \text{kg})^{1.4}$$

$$\rightarrow P_2 = 360.7 \times 10^3 \text{ N/m}^2 = 360.7 \text{ Kpas. (abs.)}$$

$$\text{معادله حالت گازها: } Pv = RT \quad \rightarrow P_2 v_2 = RT_2$$

$$\rightarrow T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{(360.7 \times 10^3 \text{ N/m}^2)(0.325 \text{ m}^3 / \text{kg})}{260 \frac{\text{N-m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = 441^\circ \text{K} = 178^\circ \text{C}$$

$$\text{Adiabotic ضریب ارتجاع حجمی: } E_v = k P_2 = 1.4(360.7 \times 10^3 \text{ N/m}^2) = 505 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

(ج)

$$\text{Isothermal در شرایط: } T_1 = T_2 = 40^\circ \text{C}$$

$$\text{Isothermal برای شرایط کامل گاز: } PV = \text{Const.} \quad \text{یا} \quad P_1 v_1 = P_2 v_2$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = (100 \times 10^3 \text{ N/m}^2) \left(\frac{0.813}{0.325} \right) = 250 \times 10^3 \text{ N/m}^2 \text{ (abs.)}$$

$$\text{IsoThermal در شرایط: } E_v = P_2 = 250 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

مثال ۱-۳

یک هواپیما در ارتفاع 7000m و با سرعت 1200km/h در هوای ساکن پرواز می‌کند. سرعت صوت (C: Sonic velocity) و عدد ماخ (M: mach No.) را در این ارتفاع محاسبه نمایند؟

حلی

$$C = \sqrt{kRT} \quad \text{است بنابراین: (Isentropic Flow) شرایط در هوا تحت شرایط}$$

$$\Rightarrow aT \quad H = 7000 = 7.0 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad T \approx -30^\circ \text{C}$$

$$T = (273 + T^\circ \text{C})^\circ \text{K} = (273 - 30) = 243^\circ \text{K}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k = 1.4 \\ R = 287 \frac{N.m}{kg.^{\circ}k} \end{cases} \quad \text{ثابت هوا}$$

$$C = \sqrt{1.4 \times 287 \frac{N.m}{kg.^{\circ}k} \times 243^{\circ}k}$$

سرعت صوت در هوا: $C = 312m/s$

$$M = \frac{V}{C}$$

$$V = 1200 \frac{km}{hr} \times \frac{hr}{3600s} \times \frac{1000m}{km} = 333m/s \quad \text{سرعت هواپیما یا سرعت نسبی هوا:}$$

$$M = \frac{333m/s}{312m/s} = 1.07 \quad \text{عدد ماخ:}$$

چون $M > 1$ است، هواپیما با سرعت مافوق صوت حرکت می‌کند. در این شرایط «تراکم پذیری هوا» قابل ملاحظه بوده و نیروی الاستیک (F_E) بر حرکت هواپیما اثر خواهد کرد.

مثال ۱-۵

سرعت صوت را در آب با دمای $(20^{\circ}C)$ و فشار استاندارد ($P_{abs.} = 103.3 \frac{KN}{m^2}$) محاسبه کنید؟

حل

$$C = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}}$$

رابطه عمومی سرعت صوت در سیالات:

$$\begin{cases} \rho_w = 998.2 \frac{kg}{m^3} \text{ یا } \frac{N.S^2}{m^4} \\ E_v = 2.18 \times 10^6 \frac{KN}{m^2} = 2.18 \times 10^9 \frac{N}{m^2} \end{cases}$$

از جدول (۷-۱) برای فشار استاندارد:

$$C = \sqrt{\frac{2.18 \times 10^3 \frac{KN}{m^2}}{998.2 \frac{NS^2}{m^4}}} = 1478m/s$$

اگر آب با سرعت ($V = 10m/s$) حرکت داشته باشد:

$$M = \frac{V}{C} = \frac{10m/s}{1478m/s} \ll 1$$

به عبارت دیگر نیروی (F_E) تاثیر خاصی بر نحوه جریان آب ندارد و قابل صرف نظر است.