

به نام ایزد پاک

موضوع: جریان ویسکوز در مجراها

استاد: مهندس غفوری

تهیه کننده: محمد صفرپور

شماره دانشجویی: ۸۸۰۲۴۴۳۱۵

سال تحصیلی: ترم مهر ۱۳۹۱

contents of chapter 6

جریان ویسکوز در مجراها

عدد رینولدز

جریان ویسکوز داخلی و خارجی

افت هد

جریان لایه ای فراگیر در لوله با مقطع دایره ای

جریان متلاطم در لوله

تاثیر زبری دیواره

نمودار مودی

۴ دسته مسائل جریان در لوله ها

جریان در مجراهای غیر دایره ای

قطر هیدرولیکی

جریان بین صفحات موازی

Viscous Flow in Ducts •

Reynolds-Number •

Internal versus External Viscous Flows •

Head loss •

laminar Flow in a Circular Pipe •

Turbulent-Flow Solution •

Effect of Rough Walls •

The Moody Chart •

four Types of Pipe-Flow Problems •

Flow in Noncircular Ducts •

The Hydraulic Diameter •

Flow between Parallel Plates •

Flow through a Concentric Annulus- Minor Losses in Pipe Systems-

جریان در یک طوقه هم مرکز
اتلافات جزئی در سیستم های لوله کشی

عدد رینولدز:

تاکنون هیچ روش تحلیلی برای بررسی جریان سیالات در حالت کلی وجود ندارد و هنوز یک نظریه کلی به دست نیامده است زیرا:

با تغییرات عدد رینولدز، رفتار سیال دستخوش تغییرات زیادی می شود.
توضیح آنکه:

با افزایش عدد رینولدز، جریان هموار لایه ای تبدیل به جریان افت و خیزی متلاطم می شود.

این فرآیند، که آن را گذار می گویند، به عواملی مانند **زبری سطح** و **آشفتگی جریان** بستگی دارد.

$$Re_d = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$$Re_d = \frac{V d}{\nu}$$

توجه: عدد رینولدز یک عدد **بی بعد** است.

d: قطر

v: سرعت متوسط

ρ : چگالی

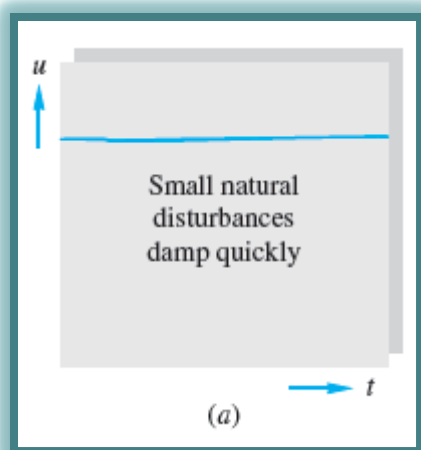
ν : لزجت سینماتیکی

μ : لزجت دینامیکی

جریان داخلی:

۱- جریان لایه ای: دارای آشفتگی های کوچکی است که سرعاً از بین می روند.

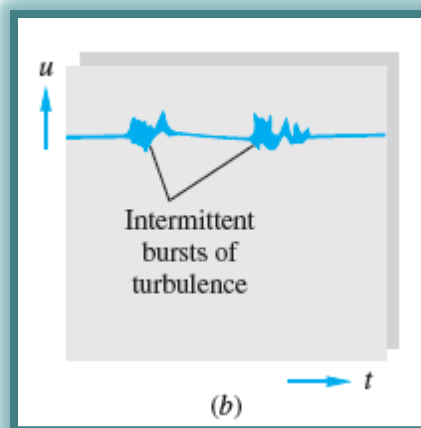
رینولدز جریان آرام (لایه ای) $Re < 2300$



۲- جریان در فرآیند گذار:

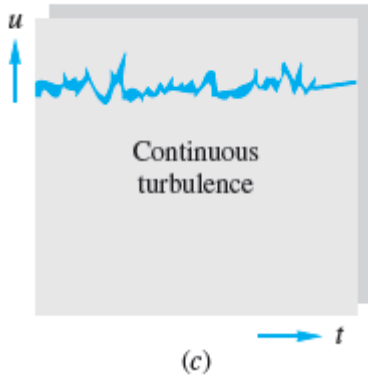
در حالت گذار افت و خیزها شروع می شوند (شروع تلاطم)

رینولدز جریان گذار $2300 < Re < 4000$



۳- جریان متلاطم:

در جریان متلاطم پایا، سرعت جریان حول یک مقدار میانگین پایا به صورت تصادفی نوسان می کند. این نوسان ها، که معمولا ۱٪ تا ۲۰٪ سرعت متوسط هستند، یک طیف پیوسته را نشان می دهند.



این شکل نوسانات سرعت یک جریان کاملا متلاطم را نشان می دهد.

رینولدز جریان متلاطم $Re > 4000$

مثال ۶-۱: صفحه ۴۰۰

حل:

اطلاعات مسئله

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$V = ?$$

$$Re = 2300$$

سرعت جریان گذار در:

الف: جریان هوای ۲۰ درجه؟

ب: جریان آب ۲۰ درجه؟

$$(a) \text{ Air: } \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{(1.205 \text{ kg/m}^3) V (0.05 \text{ m})}{1.80 \text{ E-5 kg/(m} \cdot \text{s)}} = 2300 \quad \text{or} \quad V \approx 0.7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

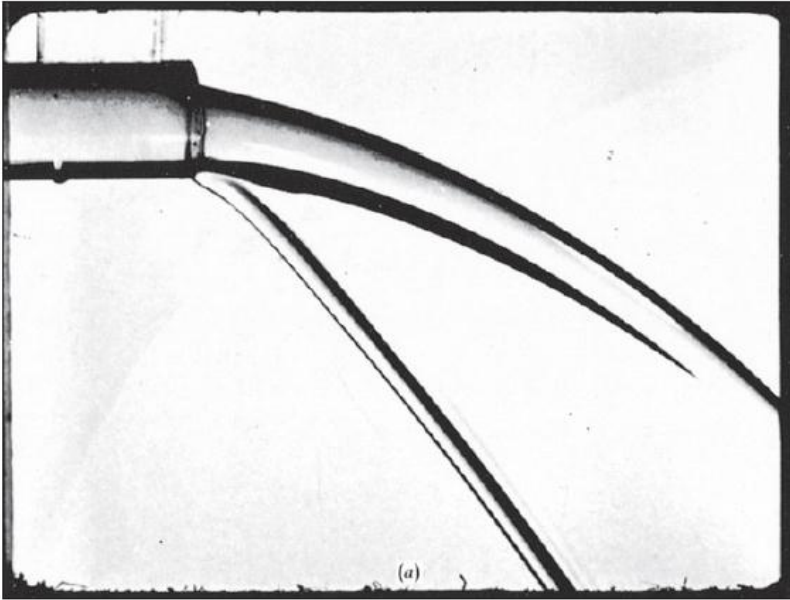
$$(b) \text{ Water: } \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{(998 \text{ kg/m}^3) V (0.05 \text{ m})}{0.001 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}} = 2300 \quad \text{or} \quad V = 0.046 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

توضیح: ملاحظه می شود که نتایج حاصله بسیار کم هستند. بنابراین جریان آب و

هوا در لوله ها معمولا متلاطم هستند. اما، جریان سیالات ویسکوزتر (مانند روغن های

روانکار، یا گلیسیرین) ممکن است به صورت لایه ای نیز باشد.

نمایش جریان آرام و متلاطم با سطح آزاد:

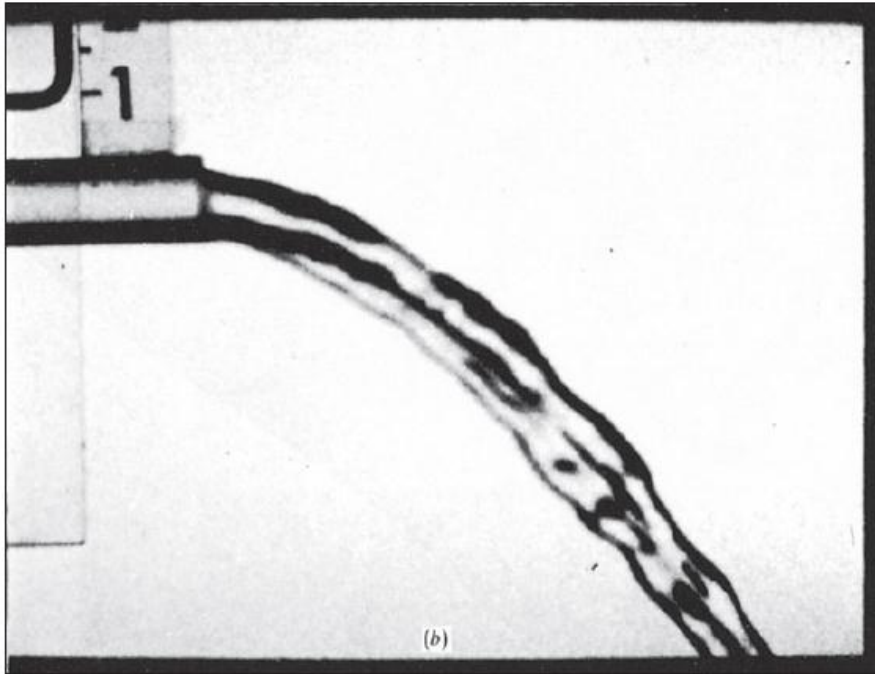


ویسکوزیته زیاد و عدد رینولدز کم (جریان لایه ای)

جت مایع در شکل رو به رو ، دارای عدد رینولدز کم، و به صورت لایه ای است.

سرعت جریان در قسمت مرکزی این جت بیشتر از سرعت جریان در دیواره لوله است.

در نتیجه: ذرات سیال در مسیرهای مختلفی که توسط یک ورقه مایع به هم متصل می شوند حرکت می کنند.

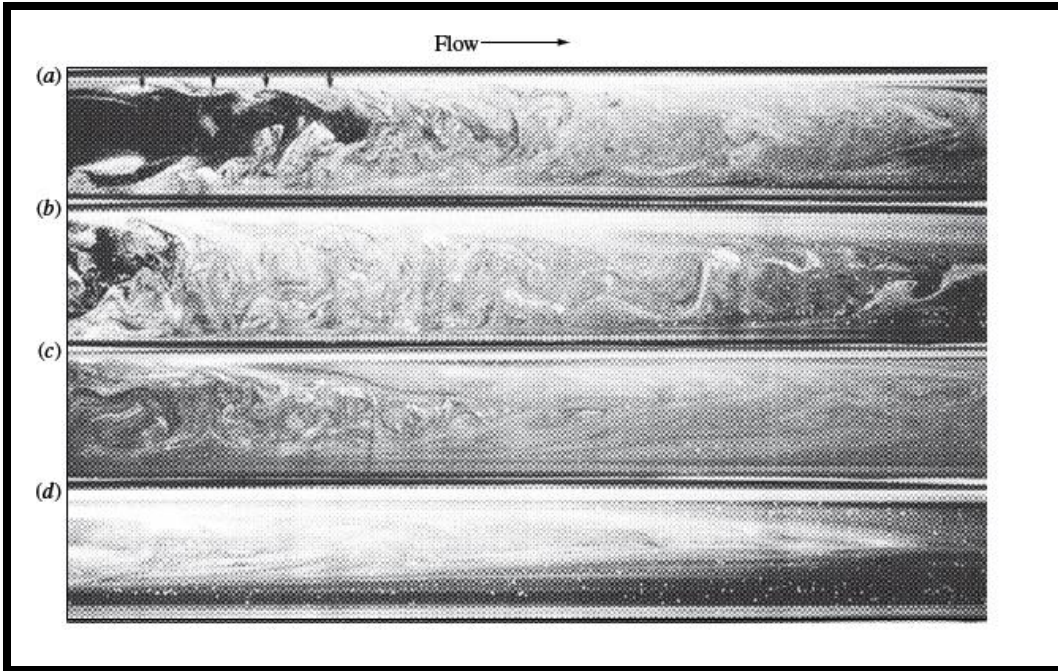


ویسکوزیته کم و عدد رینولدز زیاد (جریان متلاطم)

✓ جت مقابل ، دارای عدد رینولدز زیاد است.

این جریان ناپایا و نا منظم است (البته، سرعت متوسط آن پایاست.

نمونه تشکیل توده جریان متلاطم در یک لوله:



جریان لایه ای در عدد رینولدز ۲۳۰۰ ناپایدار می شود. در نتیجه، توده هایی با تلاطم زیاد به وجود می آیند. هر توده در جلوی خود دارای سرعت زیاد، و در عقب دارای سرعت کم است.

در نزدیکی ورودی (الف و ب)، یک تداخل نامنظم لایه ای - متلاطم، و یک ناحیه گردابی مشاهده می شود. کمی در فرودست، توده مذکور متلاطم و فعال می شود. در نتیجه جریان به صورت مارپیچ در می آید. (شکل ج) دور از فرودست، توده به صورت مخروطی و دارای فعالیت کمتر است. (شکل د)

یک نکته تاریخی: HISTORICAL OUTLINE

آزمایش هاگن: این مهندس آلمانی در سال ۱۸۳۹ فرمول زیر را برای افت فشار جریان آب در لوله های بلند برنجی

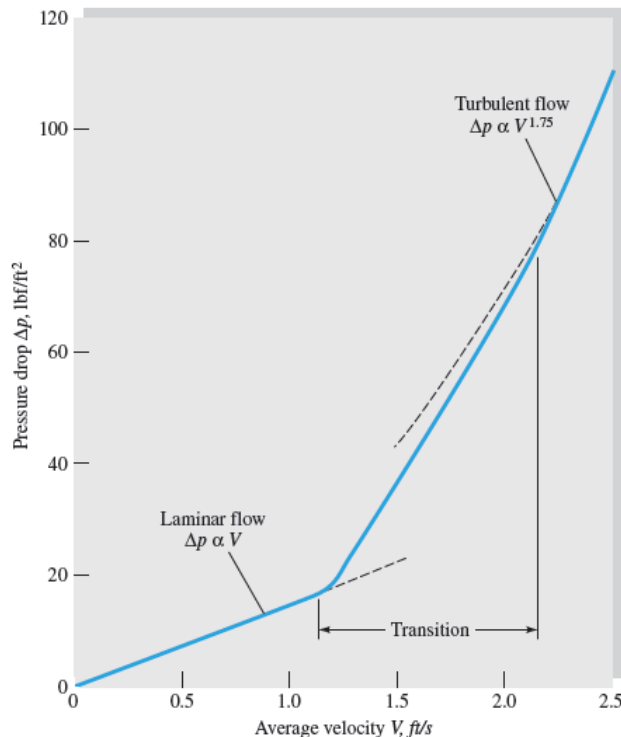
$$\Delta p = (\text{const}) \frac{LQ}{R^4} + \text{entrance effect}$$

بدست آورد.

L= طول لوله

R= شعاع لوله

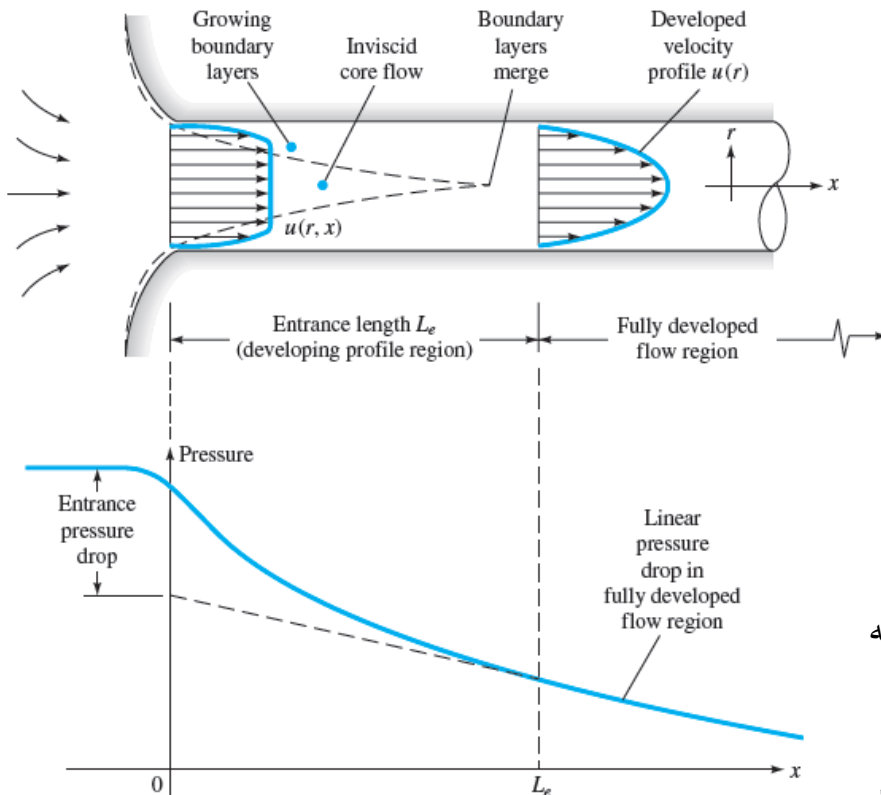
Q= دبی



در شکل زیر داده های آزمایشی هاگن نشان داده شده است ، طبق این شکل افت فشار بر حسب سرعت تا مقدار 1.1 Ft/s به صورت خطی تغییر می کند.

در سرعت بیشتر از ۲.۲، افت فشار تقریبا بر حسب مربع سرعت تغییر می کند.

جریان ویسکوز داخلی:



تغییرات منحنی سرعت و فشار جریان در ورودی مجرا

پس از ورود جریان تقریباً ناویسکوز به داخل لوله، رشد لایه های نازک ویسکوز شروع می شود. در نتیجه، سرعت محوری جریان در دیواره کاهش می یابد و در هسته مرکزی افزایش می یابد. طبق اصل پیوستگی برای جریان تراکم ناپذیر،

$$Q = \int u \, dA = \text{const}$$

در یک فاصله معین از ورودی، لایه های مرزی در هم فرو می روند و جریان ویسکوز تمام لوله را فرا می گیرد.

پس از ناحیه ورودی، به طول L_e منحنی سرعت جریان در امتداد لوله تغییر نمی کند.

در این حالت، جریان کاملاً فراگیر است و منحنی سرعت فقط تابع امتداد شعاعی است.

نکته: ۱- در ناحیه کاملاً فراگیر برای جریان لایه ای یا متلاطم، منحنی

سرعت ثابت است. **۲-** تنش برشی جداری ثابت است. **۳-** فشار بر حسب x به صورت خطی تغییر می کند.

طول توسعه یافتگی:

طول ورودی توسط تابع زیر بیان می شود: $L_e = f(d, V, \rho, \mu)$

که در آن، $V = \frac{Q}{A}$ ، تحلیل ابعادی نشان می دهد که:

$$\frac{L_e}{d} = g\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right) = g(\text{Re})$$

طبق این رابطه، طول ورودی فقط به عدد رینولدز بستگی دارد.

$\frac{L_e}{d} \approx 0.06 \text{ Re}$ laminar \longrightarrow برای جریان لایه ای

$\frac{L_e}{d} \approx 4.4 \text{ Re}_d^{1/6}$ turbulent \longrightarrow برای جریان متلاطم

مثال ۶-۲:

آب ۲۰ درجه سانتی گراد، با آهنگ ۵ گالن بر دقیقه، در یک لوله به قطر 1/2 in و طول ۶۰ فوت جریان دارد. طول ورودی چند درصد طول لوله است؟

حل:

Convert

$$Q = (5 \text{ gal/min}) \frac{0.00223 \text{ ft}^3/\text{s}}{1 \text{ gal/min}} = 0.0111 \text{ ft}^3/\text{s}$$

سرعت متوسط جریان چنین است:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.0111 \text{ ft}^3/\text{s}}{(\pi/4)[(1/2)/12 \text{ ft}]^2} = 8.17 \text{ ft/s}$$

$$\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1.09 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$$

طبق جدول الف-۴ برای آب:

$$Re_d = \frac{Vd}{\nu} = \frac{(8.17 \text{ ft/s})[(1/2)/12 \text{ ft}]}{1.09 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}} = 31,300$$

بنابراین عدد رینولدز جریان چنین است:

بنابراین جریان متلاطم است:

$$\frac{L_e}{d} \approx 4.4 \text{ Re}_d^{1/6} = (4.4)(31,300)^{1/6} = 25$$

برای لوله داده شده،

$$L/d = (60 \text{ ft}) / [(\frac{1}{2}/12) \text{ ft}] = 1440.$$

در نتیجه:

$$\frac{L_e}{L} = \frac{25}{1440} = 0.017 = 1.7\%$$

توضیح: نتیجه حاصله مقدار کمی دارد. بنابراین، می توان فرض کرد که جریان در این لوله از ابتدا **کاملاً فراگیر** است.

Flow in a Circular Pipe

برای کاربرد فرمول جریان در لوله، معمولاً از روش حجم کنترلی استفاده می شود. جریان پایای تراکم ناپذیر بین مقاطع ۱ و ۲ در یک لوله مایل را در نظر بگیرید:

$$Q_1 = Q_2 = \text{const} \longrightarrow V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = V_2 = \frac{Q_2}{A_2} \quad \text{برای این جریان، طبق اصل پیوستگی داریم:}$$

با توجه به اینکه کار شفت بین مقاطع ۱ و ۲ وجود ندارد، معادله انرژی به صورت زیر در می آید:

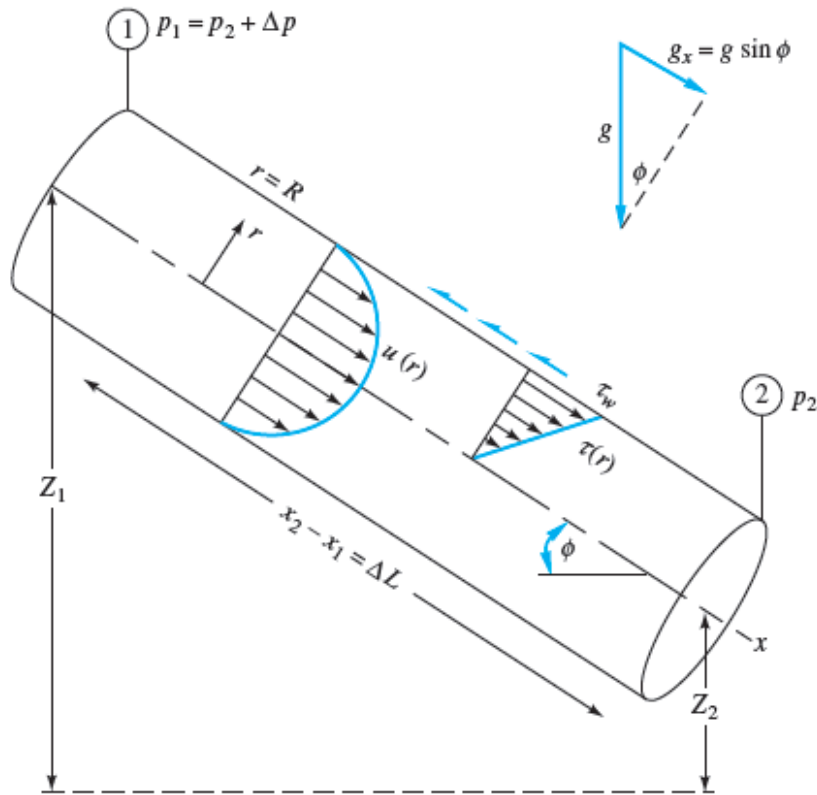
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_1 V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_2 V_2^2 + gz_2 + gh_f$$

برای جریان کاملاً فراگیر، منحنی سرعت در مقاطع ۱ و ۲ دارای شکل یکسان است. بنابراین، $\alpha_1 = \alpha_2$ ، با توجه به اینکه

از معادله ۶-۷ داریم:

$$h_f = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \Delta \left(z + \frac{p}{\rho g} \right) = \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g}$$

طبق رابطه بالا، افت هد با تغییرات ارتفاع خط شیب هیدرولیکی برابر است.



از کاربرد رابطه تکانه برای حجم کنترل در شکل رو به رو داریم:

$$\Delta p \pi R^2 + \rho g (\pi R^2) \Delta L \sin \phi - \tau_w (2\pi R) \Delta L = \dot{m} (V_2 - V_1) = 0$$

در این رابطه، $\sum F$ برآیند نیروهای فشاری، گرانشی و برشی در امتداد محور X است.

$$\Delta z = \Delta L \sin \phi$$

با توجه به شکل داریم:

$$\Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g} = h_f = \frac{2\tau_w}{\rho g} \frac{\Delta L}{R}$$

در سال ۱۸۵۰، جولیس ویسباخ رابطه زیر را برای افت هد در جریان متلاطم به دست آورد.

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$$

پارامتر بی بعد f را ضریب اصطکاک دارسی می گویند. متغیر f ارتفاع زبری دیواره لوله است. این متغیر در جریان متلاطم حائز اهمیت است، اما در جریان لایه ای نقشی ندارد.

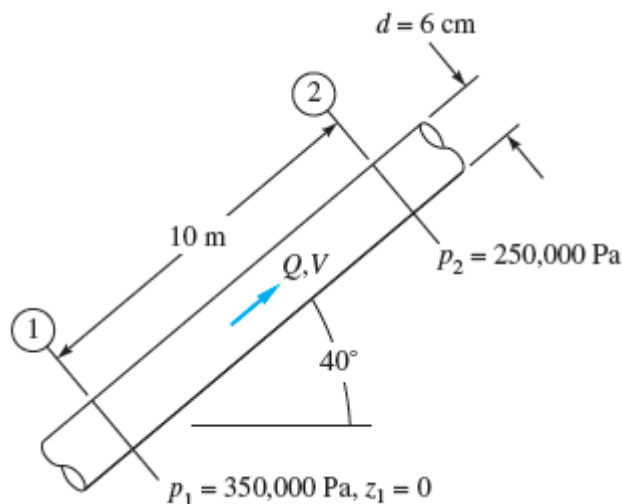
جریان لایه ای کاملاً فراگیر در لوله:

جریان لایه ای در لوله های دایره ای یا غیر دایره ای را به سهولت می توان تحلیل کرد. در قسمت ۴-۱۰، جریان پوازیل در لوله دایره ای به طور کامل تحلیل شد. در اینجا، نتایج حاصله را بیان می کنیم:

$$h_{f, \text{lam}} = \frac{64\mu}{\rho V d} \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = \frac{32\mu L V}{\rho g d^2} = \frac{128\mu L Q}{\pi \rho g d^4}$$

مثال ۳-۶:

مطابق شکل، روغن با چگالی ۹۰۰ و لزجت دینامیکی ۰.۰۰۰۲ / در یک لوله شیب دار جریان دارد. مطلوبست: الف: جهت جریان، ب) افت هد بین مقالع ۱ و ۲، ج) آهنگ جریان، د) سرعت متوسط.



حل:

الف): فرض می کنیم جریان لایه ای است. می نویسیم:

$$\mu = \rho\nu = (900 \text{ kg/m}^3)(0.0002 \text{ m}^2/\text{s}) = 0.18 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$$

$$z_2 = \Delta L \sin 40^\circ = (10 \text{ m})(0.643) = 6.43 \text{ m}$$

با توجه به اینکه سیال در جهت کاهش ارتفاع خط شیب هیدرولیکی جریان می یابد، ارتفاع خط شیب هیدرولیکی در هر مقطع را می یابیم:

$$\text{HGL}_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = 0 + \frac{350,000}{900(9.807)} = 39.65 \text{ m}$$

$$\text{HGL}_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = 6.43 + \frac{250,000}{900(9.807)} = 34.75 \text{ m}$$

ملاحظه می شود که $HGL_1 > HGL_2$ بنابراین:

روغن به طرف بالا حرکت می کند.

(ب). افت هد برابر است با تغییرات HGL.

$$h_f = HGL_1 - HGL_2 = 39.65 \text{ m} - 34.75 \text{ m} = 4.9 \text{ m}$$

ملاحظه می شود که افت هد برابر با نصف طول لوله است، که مقدار بزرگی است.

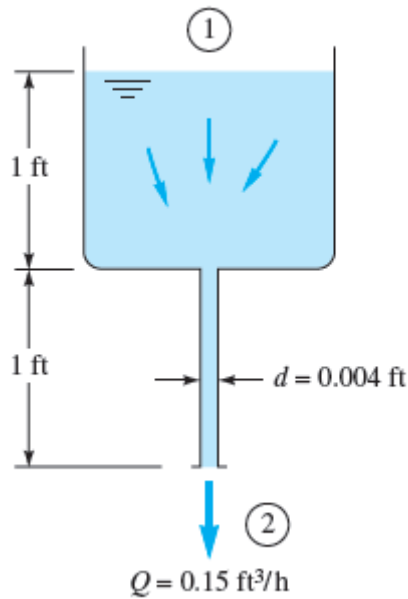
$$Q = \frac{\pi \rho g d^4 h_f}{128 \mu L} = \frac{\pi (900) (9.807) (0.06)^4 (4.9)}{128 (0.18) (10)} = 0.0076 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{(ج). طبق رابطه (۶-۱۲ هـ)،}$$

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{0.0076}{\pi (0.03)^2} = 2.7 \text{ m/s} \quad \text{(د).}$$

توضیح: برای واریسی صحت فرض جریان لایه ای، عدد رینولدز را می یابیم:

$$Re_d = \frac{Vd}{\nu} = \frac{2.7(0.06)}{0.0002} = 810$$

بنابراین، فرض درست است.



مثال ۴-۶

وزن مخصوص: 0.58 lb/ft^3

آهنگ تخلیه $0.15 \text{ ft}^3/\text{h}$

ویسکوزیته مایع را بیابید؟

حل: جریان را لایه ای، کاملاً فراگیر، و تراکم ناپذیر در نظر می گیریم.

طبق اصل پیوستگی،

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{(0.15/3600) \text{ ft}^3/\text{s}}{\pi(0.002 \text{ ft})^2} \approx 3.32 \text{ ft/s}$$

اکنون، با استفاده از معادله انرژی، افت هد بین مقاطع ۱ و ۲ را می یابیم:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

اما، $p_1 = p_2 = p_a$. با فرض اینکه $V_1 \approx 0$ ، از رابطه (۱) نتیجه می شود:

$$h_f \approx z_1 - z_2 - \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = 2.0 \text{ ft} - 2.0 \frac{(3.32 \text{ ft/s})^2}{2(32.2 \text{ ft/s}^2)} \approx 1.66 \text{ ft}$$

با توجه به فرض لایه ای و معادله، α_2 را برابر با ۲ قرار داده ایم.

طبق رابطه (۶-۱۲ هـ)،

$$h_f = 1.66 \text{ ft} = \frac{32\mu LV}{\rho g d^2} = \frac{32\mu(1.0 \text{ ft})(3.32 \text{ ft/s})}{(58 \text{ lbf/ft}^3)(0.004 \text{ ft})^2} = 114,500 \mu$$

$$\mu = \frac{1.66}{114,500} = 1.45 \text{ E-5 slug/(ft} \cdot \text{s)}$$

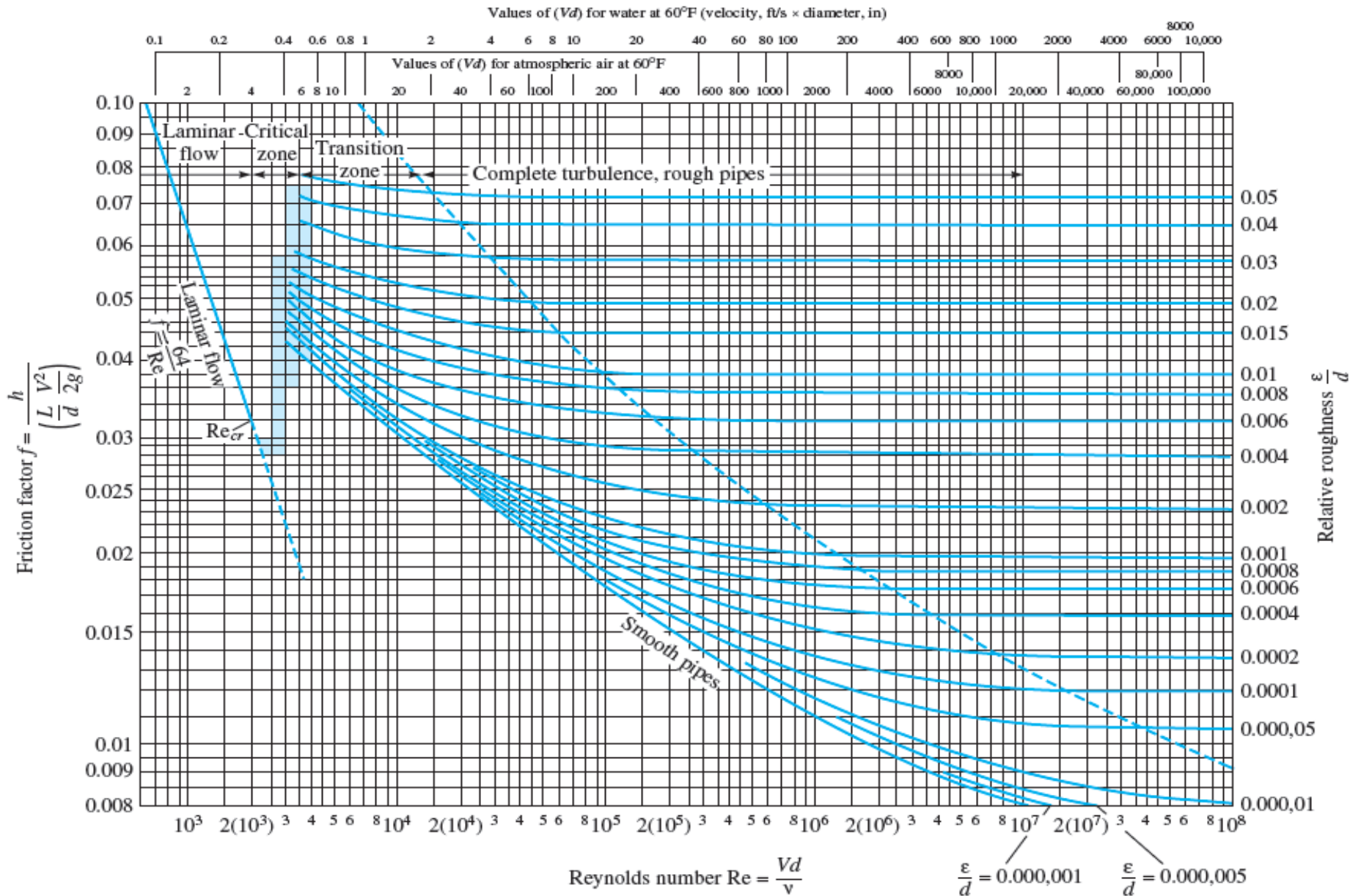
واریسی صحت فرض جریان لایه ای: طبق صورت مسئله، $\rho g = 58 \text{ lbf/ft}^3$. در نتیجه،

$$\text{Re}_d = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{(58/32.2 \text{ slug/ft}^3)(3.32 \text{ ft/s})(0.004 \text{ ft})}{1.45 \text{ E-5 slug/(ft} \cdot \text{s)}} = 1650 \quad \text{laminar}$$

عدد رینولدز چنین است:

بنابراین، فرض درست است.

نمودار مودی برای اصطکاک در لوله های صاف و زبر



در سال ۱۹۳۹، **کلبروک** رابطه زیر را پیشنهاد کرد.

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_d f^{1/2}} \right)$$

این فرمول، که ناحیه گذار را نیز در نظر می گیرد، یک فرمول پذیرفته شده برای ضریب اصطکاک در **جریان متلاطم** است. در سال ۱۹۴۴، مودی نمودار فرمول کلبروک را رسم کرد. این نمودار، که آن را نمودار مودی می گویند و در شکل نشان داده شده است؛ مشهورترین نمودار در مکانیک سیالات است. دقت این نمودار در محاسبات طراحی ۱۵٪ است. این نمودار برای جریان در لوله های دایره ای، لوله های غیر دایره ای، جریان در لایه های مرزی، و جریان در کانال های باز به کار می رود. برای درگیر نشدن در محاسبات پیچیده، از **فرمول تجربی هالند** نیز می توان استفاده کرد:

$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{\text{Re}_d} + \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

نکته: نتیجه حاصل از این رابطه کمتر از ۲٪ با نتیجه حاصل از معادله کلبروک اختلاف دارد.

ناحیه سایه خورده در نمودار مودی گستره ای را نشان می دهد که در آن **جریان لایه ای** به **جریان متلاطم** تبدیل می شود.

در این ناحیه، $2000 < Re_d < 4000$. وضرب اصطکاک مقدار مشخصی ندارد. در ناحیه کاملاً زبر، منحنی های ضریب

اصطکاک تقریباً افقی هستند.

در جدول ۶-۱، زبری متوسط لوله های تجارتي آورده شده است.

Material	Condition	ε		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	± 60
	Stainless, new	0.000007	0.002	± 50
	Commercial, new	0.00015	0.046	± 30
	Riveted	0.01	3.0	± 70
	Rusted	0.007	2.0	± 50
Iron	Cast, new	0.00085	0.26	± 50
	Wrought, new	0.00015	0.046	± 20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	± 40
	Asphalted cast	0.0004	0.12	± 50
Brass	Drawn, new	0.000007	0.002	± 50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	± 60
Glass	—	Smooth	Smooth	
Concrete	Smoothed	0.00013	0.04	± 60
	Rough	0.007	2.0	± 50
Rubber	Smoothed	0.000033	0.01	± 60
Wood	Stave	0.0016	0.5	± 40

مثال ۶-۶:

آب با سرعت متوسط 6 ft/s در یک لوله افقی، به طول 200 ft و قطر 6-in جریان دارد. لوله از چدن با پوشش آسفالت است. افت هد و افت فشار را بیابید.

حل: جدول الف - ۳، برای آب،

$$\mu = 998 / 515.38 = 1.94 \text{ slug/ft}^3$$

$$\rho = 0.001 / 47.88 = 2.09 \times 10^{-5} \text{ slug/ft}^3$$

$$Re_a = \rho v \cdot d / \mu = 279000$$

عدد رینولدز جریان چنین است.

بنابراین جریان متلاطم است.

طبق جدول ۶-۱، برای چدن با پوشش آسفالت، $\epsilon = 0.0004 \text{ ft}$ بنابراین، زبری نسبی چنین است:

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0.0004}{\frac{6}{12}} = 0.0008$$

برای **تعیین ضریب اصطکاک** با استفاده از نمودار مودی، منحنی مربوط به زبری نسبی $\epsilon/d = 0.0008$ را در نظر می گیریم و عدد رینولدز $Re = 2.7 \times 10^5$ را بر روی محور افقی مشخص می کنیم. از این نقطه یک **عمود** رسم می کنیم تا منحنی مربوط به زبری نسبی 0.0008 را قطع کند. از نقطه تقاطع حاصله، یک **خط افقی** رسم می کنیم تا محور ضریب اصطکاک در سمت چپ را قطع کند. نقطه تلاقی، ضریب اصطکاک $f = 0.02$ را می دهد.

طبق معادله (۶-۱۰)،

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = (0.02) \frac{200}{0.5} \frac{(6 \text{ ft/s})^2}{2(32.2 \text{ ft/s}^2)} = 4.5 \text{ ft}$$

طبق معادله (۶-۸)، برای لوله افقی ($\Delta z = 0$)

$$\Delta p = \rho g h_f = (62.4 \text{ lbf/ft}^3)(4.5 \text{ ft}) = 280 \text{ lbf/ft}^2$$

مسائل جریان در لوله ها به چهار دسته تقسیم بندی می شود:

head loss h_f = مجهول

۱- Q و L و D و ρ و μ و g معلوم

V or flow rate Q = مجهول

۲- h_f و L و D و ρ و μ و g معلوم

the diameter d of the pipe = مجهول

۳- L و h_f و ρ و μ و g معلوم

مجهول = طول خط لوله مجهول است.

۴- توان پمپ مشخص است

مساله نوع دوم: روش تکرار

$$f = h_f \frac{d}{L} \frac{2g}{V^2}$$

محاسبه f ← محاسبه Re ← محاسبه v → حدس برای f



کنترل میزان خطا $> 5\%$ قابل قبول

مثال ۶-۹: صفحه ۴۳۰ ویرایش ۷

روغن، با مشخصات زیر در یک لوله به طول ۱۰۰ متر و قطر ۳۰ سانتی متر جریان دارد. زبری نسبی لوله ۰/۰۰۰۲

و افت هد ۸ متر است. سرعت متوسط، و آهنگ جریان را بیابید.
 $\rho = 950 \text{ kg/m}^3 \quad \nu = 2 \text{ E-5 m}^2/\text{s}$

حل: روش تکراری. طبق تعریف، رابطه ضریب اصطکاک چنین است:

$$f = h_f \frac{d}{L} \frac{2g}{V^2} = (8 \text{ m}) \left(\frac{0.3 \text{ m}}{100 \text{ m}} \right) \left[\frac{2(9.81 \text{ m/s}^2)}{V^2} \right] \quad \text{or} \quad fV^2 \approx 0.471 \quad (\text{SI units})$$

برای حل این رابطه، یک مقدار اولیه فرضی برای ضریب اصطکاک در نظر می‌گیریم. سپس سرعت را می‌یابیم. آنگاه رینولدز را به دست می‌آوریم. سرانجام، ضریب اصطکاک را از نمودار مودی می‌یابیم. با استفاده از مقدار حاصله برای ضریب اصطکاک، فرآیند بالا را تکرار می‌کنیم تا حل متقارب شود. معمولاً از ۰/۰۲ که در وسط قرار دارد شروع می‌کنیم.

$$f = 0.02 \longrightarrow V = \sqrt{0.471/0.0201} = 4.84 \text{ m/s} \longrightarrow \text{Re}_d \approx 72,600. \longrightarrow f = 0.0201$$

حل تا سه رقم متقارب شده است؛ پس سرعت را ۴.۸۴ را در نظر می‌گیریم.

$$Q = V \left(\frac{\pi}{4} \right) d^2 = (4.84) \left(\frac{\pi}{4} \right) (0.3)^2 \approx 0.342 \text{ m}^3/\text{s}$$

مسائل گروه ۴: تعیین طول لوله

برای طراحی سیستم های لوله کشی، گاهی قطر لوله، قدرت پمپاژ و آهنگ جریان معلوم است، و طول لوله خواسته می شود. با چشم پوشی از اتلافات، از رابطه (۶-۱۰) نتیجه می شود:

$$\text{توان پمپ} = \gamma Q L$$

در یک سیستم لوله کشی باید پمپ را طوری انتخاب کرد که در ناحیه ماکزیمم بازده کار کند.

$$H_{\text{pump}} = \text{power} / \rho g Q$$

طول خط لوله تا جایی می رود که:

$$H_{\text{pump}} = h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$$

جریان در مجراهای غیر دایره ای:

قطر هیدرولیکی:

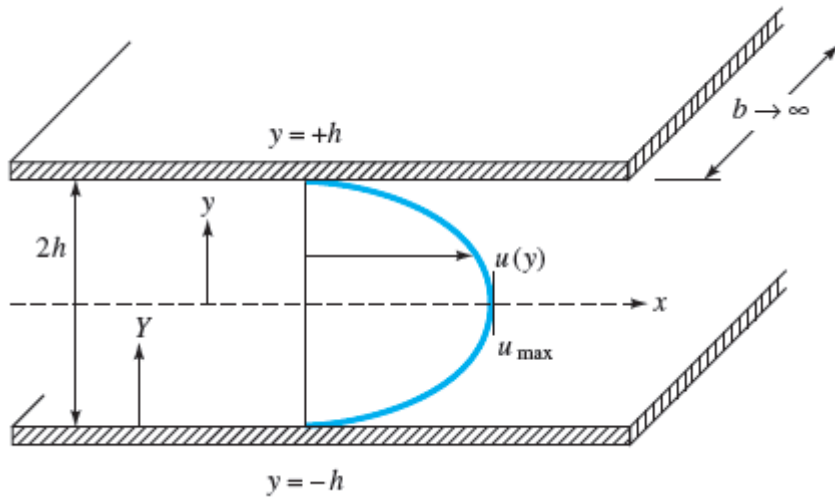
برای تحلیل در مجراهای غیر دایره ای، از شعاع هیدرولیکی استفاده می شود:

$$R_h = \frac{A}{\mathcal{P}} = \frac{\text{cross-sectional area}}{\text{wetted perimeter}} = \frac{\text{مساحت مقطع عرضی}}{\text{محیط خیس شده}}$$

$$D_h = 4R_h$$

$$D_h = \frac{4A}{\mathcal{P}} = \frac{4 \times \text{area}}{\text{wetted perimeter}} = 4R_h$$

جریان بین دو صفحه موازی: Flow between Parallel Plates



ساده ترین جریان در مجراهای غیر دایره ای است.
جریان بین دو صفحه موازی به فاصله $2h$ از یکدیگر
نشان داده شده است.

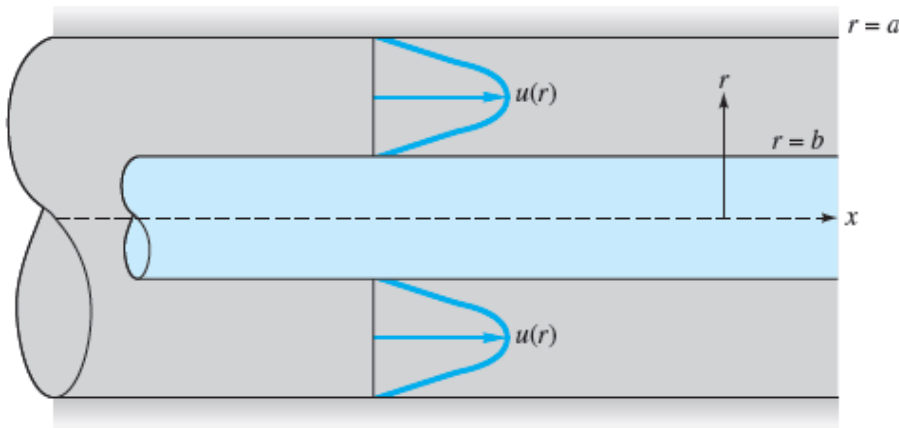
طبق این شکل، $B \gg h$ (عرض صفحات در امتداد
عمود بر صفحه کاغذ است).

بنابراین، جریان اساساً دو بعدی است؛ یعنی، $U = u(y)$

قطر هیدرولیکی جریان چنین است:

$$D_h = \frac{4A}{\rho} = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{4(2bh)}{2b + 4h} = 4h$$

Flow through a Concentric Annulus: جریان در یک طوقه هم مرکز:



جریان **لایه ای پایای** محوری در فضای حلقوی بین دو استوانه هم مرکز را در نظر بگیرید.

حالت **نبود لغزش** در دیواره های داخلی و خارجی برقرار است. (اصل عدم لغزش)

$$f = h_f \frac{D_h}{L} \frac{2g}{V^2} \quad \text{where } V = \frac{Q}{\pi(a^2 - b^2)}$$

و در نهایت می رسیم به رابطه زیر:

$$D_h = \frac{4\pi(a^2 - b^2)}{2\pi(a + b)} = 2(a - b)$$

افت های موضعی:

برای هر سیستم لوله کشی، علاوه بر اتلافات اصطکاکی ناشی از طول لوله کشی، اتلافات دیگری وجود دارد که به آنها **اتلافات جزئی** یا **اتلافات محلی** می گویند. این اتلافات از عوامل زیر ناشی می شوند:

- ۱- هنگامی که برای **بردارهای سرعت** اتفاقی بیاید مثل زانویی ها و سه راهی ها و سایر اتصالات
- ۲- ورودی و خروجی از مخازن
- ۳- انبساط ها و انقباض های ناگهانی
- ۴- انبساط ها و انقباض های تدریجی
- ۵- خم ها، زانویی ها، سه راهی ها، شیر آلات، و سایر اتصالات.

ضریب افت جزئی در یک اتصال به صورت زیر تعریف می شود:

$$K = \frac{h_m}{V^2/(2g)} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Δp = افت فشار در اتصال

V = سرعت متوسط جریان در اتصال

اتلافات کل برای یک سیستم لوله کشی، با قطر ثابت، چنین است:

$$\Delta h_{\text{tot}} = h_f + \sum h_m = \frac{V^2}{2g} \left(\frac{fL}{d} + \sum K \right)$$

نکته مهم: اگر قطر لوله ها تغییر کند، اتلاف برای هر لوله را تعیین، و آنها را با هم جمع می کنیم.

انواع شیرهای تجارتي:

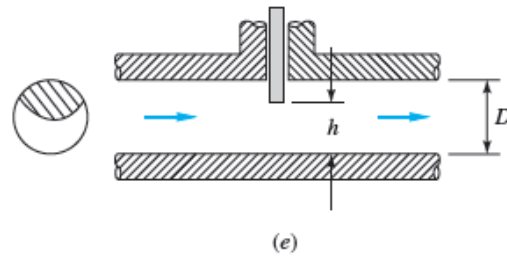
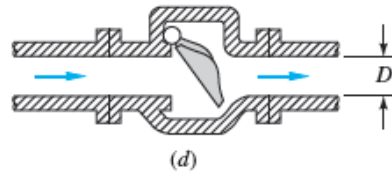
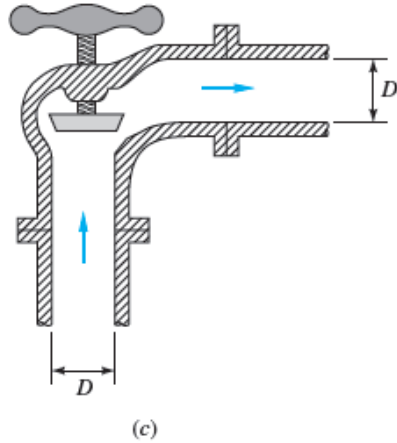
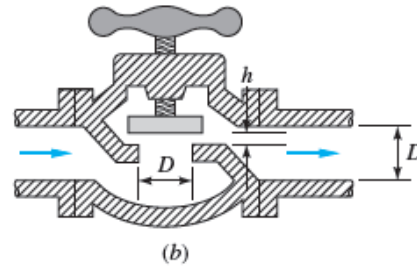
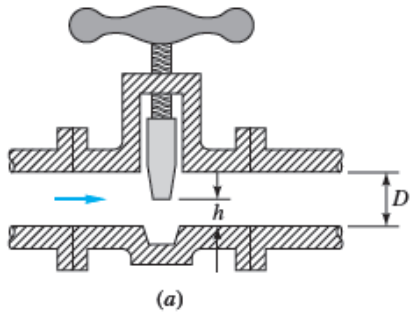
(الف) شیر کشویی

(ب) شیر کروی

(ج) شیر گوشه

(د) شیر یک طرفه

(هـ) شیر دیسکی



توضیحات:

کشویی: در عرض مقطع لوله می لغزد.

کروی: یک سوراخ را در یک مکان خاص می بندد.

گوشه: مشابه با شیر کروی، اما با گردش ۹۰ درجه

یک طرفه: اجازه عبور جریان را در یک جهت می دهد.

دیسکی: مقطع عرضی لوله را توسط یک دریچه دایره ای مسدود می کند.

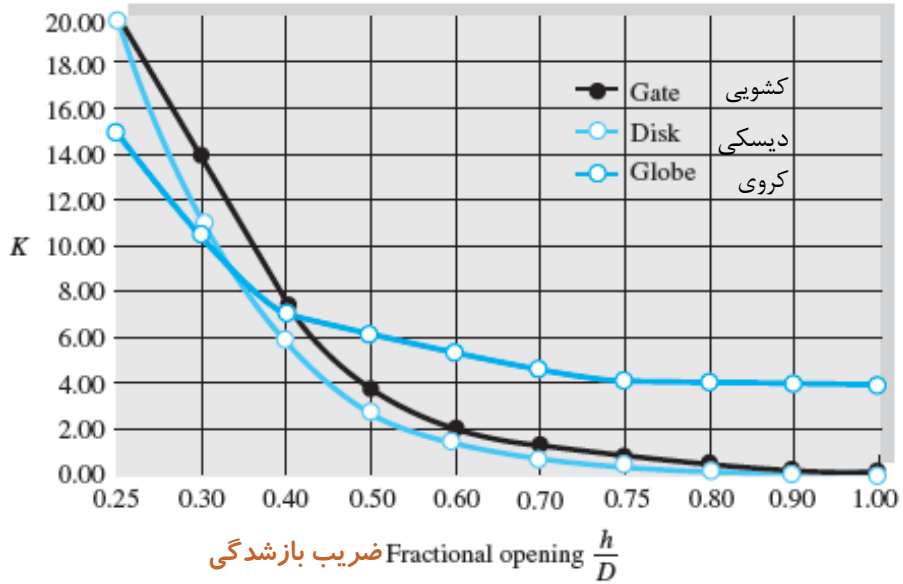
شیر باز کروی، که مسیر جریان در آن به صورت مارپیچ است، بیشترین اتلاف را دارد.

در جدول ۵-۶، ضریب k برای بعضی اتصالات آورده شده است. داده های جدول برای شیرهای کاملاً باز هستند. این ضرایب برای شیرهای نیمه باز بسیار بیشتر می شود. طبق این جدول، با افزایش اندازه اتصالات، ضریب k کاهش می یابد.

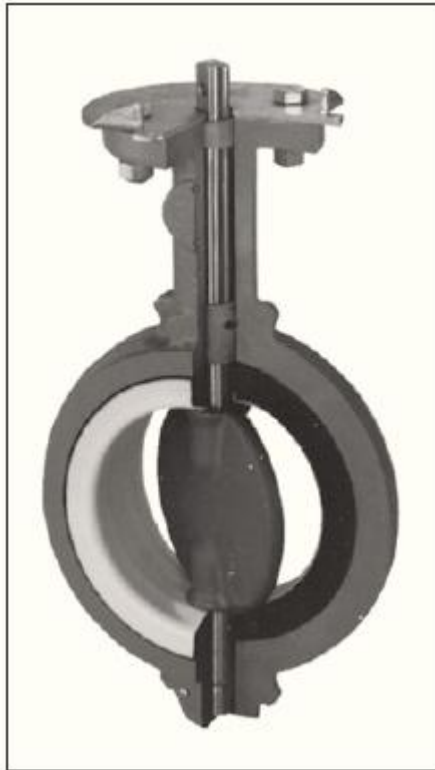
گفتنی است که جدول ۵-۶ مقادیر متوسط را نشان می دهد و ممکن است ۵۰ درصد خطا داشته باشد.

		Nominal diameter, in قطر اسمی									
		Screwed پیچی				Flanged فلانجی					
		1/2	1	2	4	1	2	4	8	20	
شیرها	Valves (fully open):										
	Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5	
کروی	Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03	
کشویی	Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
یک طرفه	Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0	
گوشه	Elbows:										
زانوبی ها	45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29						
	45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14	
	90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21	
	90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
	180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20	
	180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10	
سه راهی ها	Tees:										
	Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07	
	Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41	

در شکل ۶-۱۸ ب، ضرایب متوسط k برای سه نوع شیر بر حسب درصد باز شدگی شیر (h/d) نشان داده شده است.

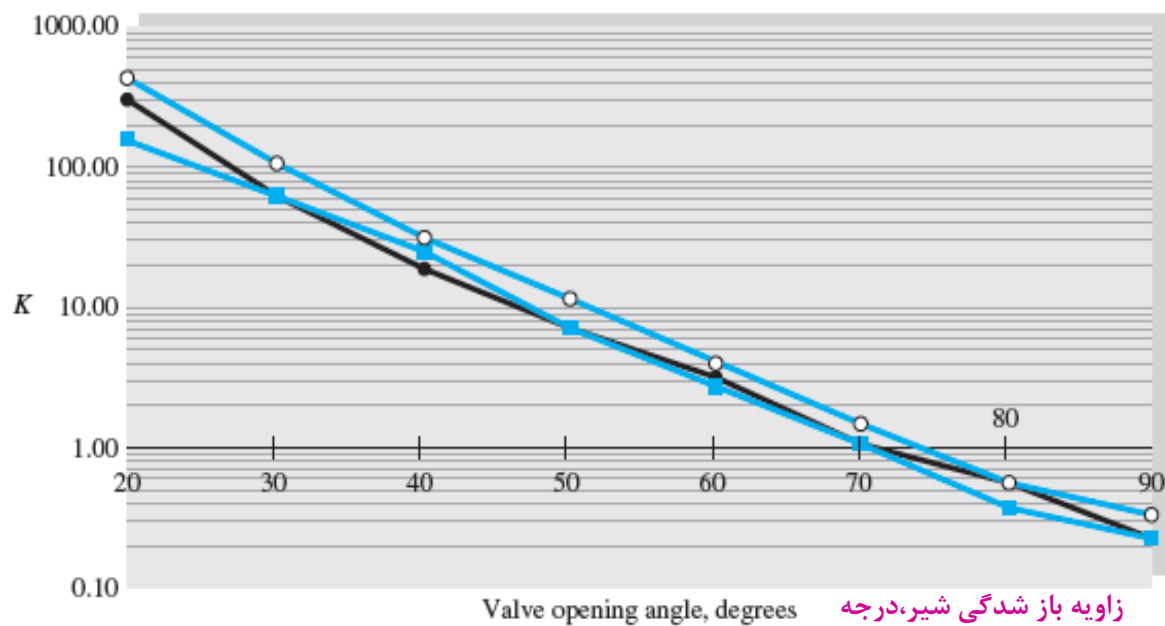


شکل ۶-۱۹ الف، یک شیر پروانه ای با ساقه دیسکی را نشان می دهد. این شیر در حالت بسته بر روی یک ارینگ می نشیند و سطح لوله را آب بندی می کند. این شیر، با یک گردش ۹۰ درجه، کاملاً باز می شود. در نتیجه، برای شرایط باز شوندگی سریع بسیار مناسب است. به همین دلیل، در آتش نشانی ها و نیروگاه ها به کار می رود. البته، برای بستن این شیرها گشتاور زیادی مورد نیاز است، و اتلاف هد در هنگامی که شیر تقریباً بسته است بسیار زیاد است.



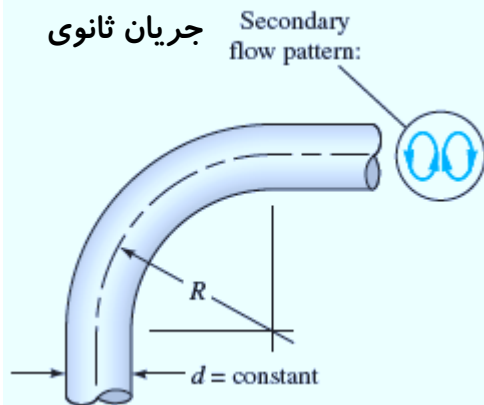
(a)

شکل ۶-۱۹ ب، ضریب k برای سه طرح شیر پروانه ای را بر حسب زاویه بازشدگی θ نشان می دهد. در این شکل، $\theta = 0$ متناظر با انسداد شیر است. طبق این شکل، اتلافات در حالت نسبتاً بسته بسیار زیاد است. ضمناً، k بر حسب θ تقریباً به صورت نمایی تغییر می کند. گفتنی است که k در شکل ۶-۱۹ ب بر مبنای سرعت متوسط $V = Q/A$ ارزیابی شده است.

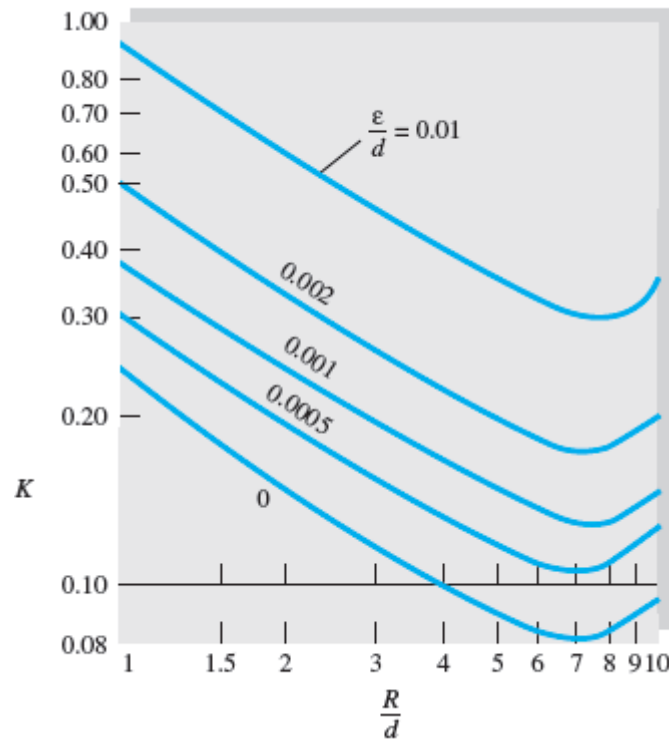


(b)

در شکل ۶-۲۰، ضریب k برای خم های صاف نشان داده شده است. طبق این شکل، افت هد در خم ها همواره بیشتر از افت هد در یک لوله مستقیم است، زیرا در خم ها پدیده جدایی رخ می دهد و جریان گردشی ثانوی بوجود می آید. طبق این شکل، با افزایش $\frac{R}{d}$ ، افت ناشی از جدایی و جریان ثانوی کاهش می یابد، اما افت هد در طول خم افزایش می یابد.



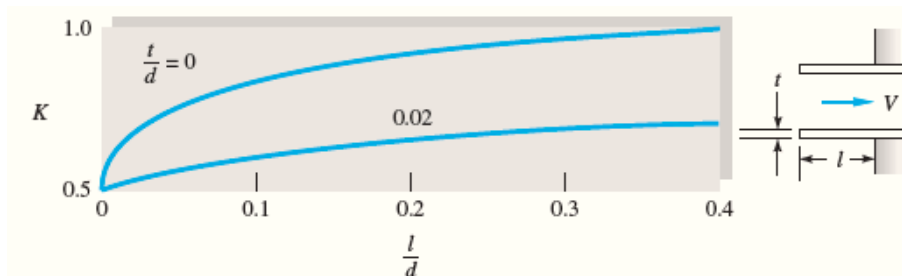
ضریب k برای خم های صاف 45° ، 90° و 180° ، در عدد رینولدز 200000 .



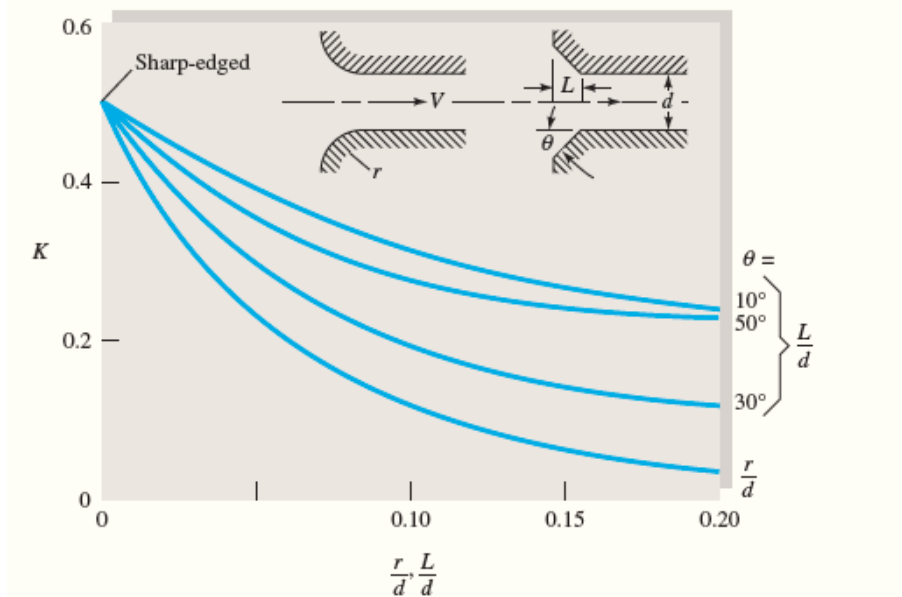
۱. وجود نقطه مینیمم در منحنی های شکل ۶ - ۲۰ ناشی از این دو اثر متضاد است.

شکل ۶-۲۱ ضریب افت برای ورودی را نشان می دهد. طبق این شکل، ضریب افت ورودی شدیداً بستگی به شکل هندسی ورودی دارد. برای لبه های ورودی به خوبی گرد شده ($r = 0.2d$) و $K = 0.05$ برای خروجی با هر شکل (تورفته، لبه تیز، مخروطی یا گرد)، $K = 1.0$

ضریب افت: (الف) ورودی تورفته



(ب) ورودی گرد و مخروطی



انقباض ناگهانی :

جدایی جریان در لوله فرودست باعث می شود که جریان اصلی در مقطع مینیمم دستخوش **انقباض ونا** شود. (شکل ۶-۲۲)

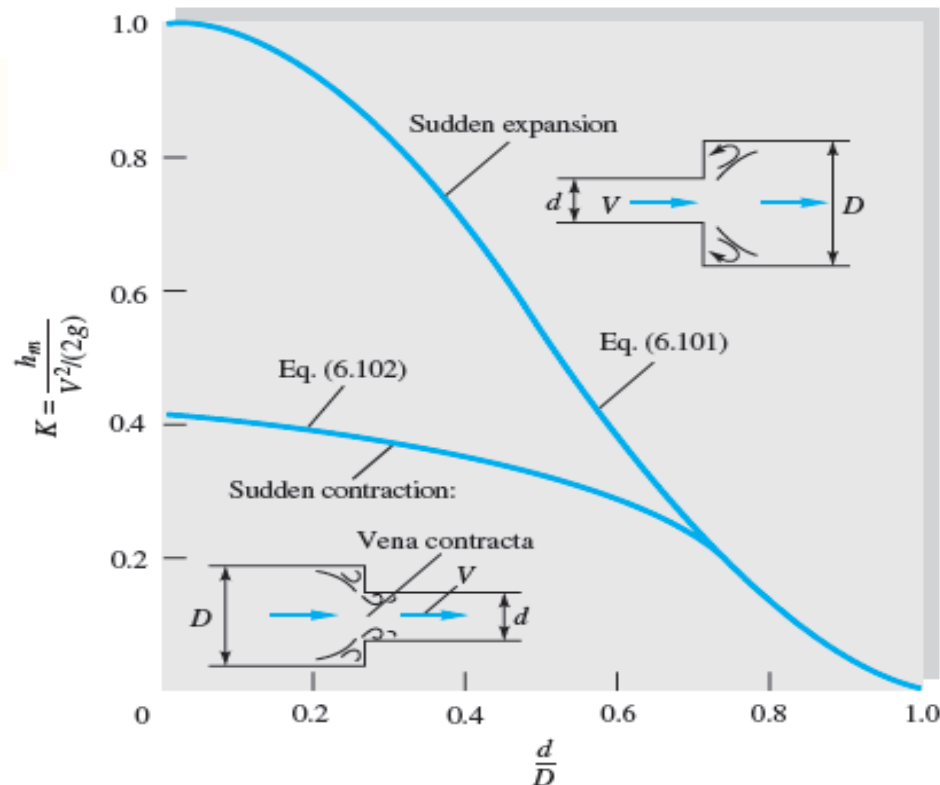
فرمول تجربی برای ضریب افت در انقباض ناگهانی چنین است:

$$K_{SC} \approx 0.42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)$$

این رابطه برای مقادیر d/D تا ۰/۷۶ به کار می رود. در بیشتر از این مقدار، حالت انبساط ناگهانی برقرار می شود و معادله

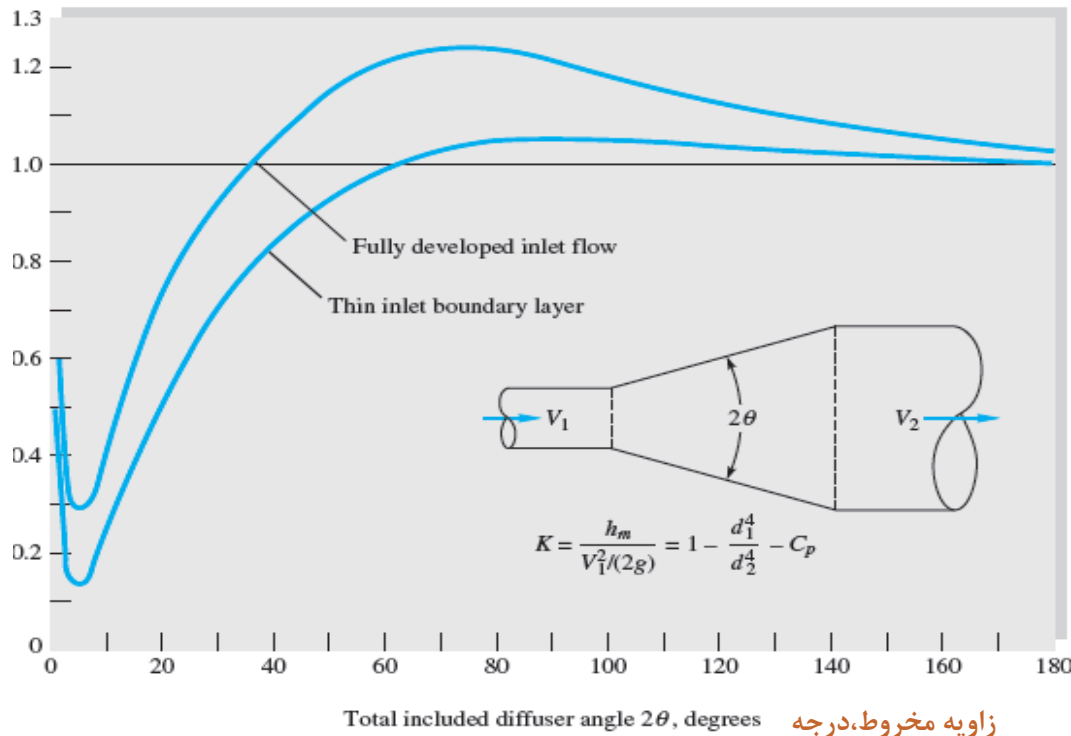
زیر به کار می رود.

$$K_{SE} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 = \frac{h_m}{V^2/(2g)}$$



انبساط تدریجی - دیفیوزر :

وقتی جریانی وارد یک انبساط تدریجی می شود (مانند دیفیوزر مخروطی در شکل (۶-۲۳) سرعت آن افت می کند و فشار آن افزایش می یابد. در دیفیوزر با زاویه مخروطی بزرگ، به علت جدایی جریان در دیواره، افت هد ممکن است زیاد باشد. در شکل ۶-۲۳، منحنی ضریب افت K بر حسب زاویه مخروط، برای نسبت های مختلف D_1/d_2 ، رسم شده است. این ضریب بر مبنای هد سرعت در قسمت ورودی محاسبه شده است.



نکته: در انقباض تدریجی، افت بسیار کم است.

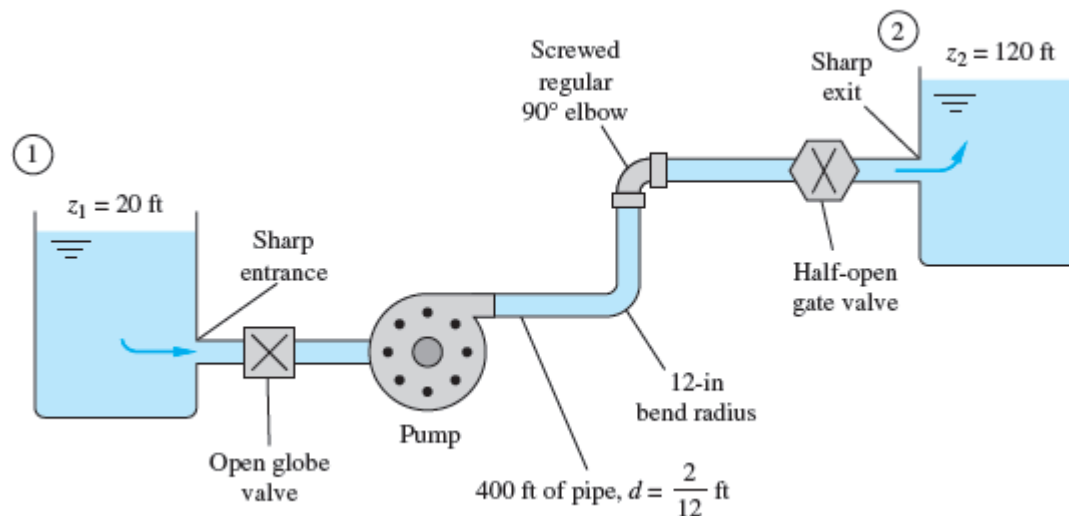
مثال: ۱۶-۶

آب، با مشخصات زیر در لوله ای به طول ۴۰۰ فوت و قطر ۲ اینچ پمپ می شود. قدرت پمپ را بیابید؟

$$\rho = 1.94 \text{ slugs/ft}^3 \text{ and } \nu = 0.000011 \text{ ft}^2/\text{s}$$

$$\text{آهنگ جریان: } 0.2 \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$\text{زبری نسبی: } \epsilon/d = 0.001$$



معادله انرژی بین سطح آزاد مخزن ها (مقاطع ۱ و ۲) را می نویسیم:



$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right) + h_f + \sum h_m - h_p$$

در این رابطه، h_p هد پمپ است. با توجه به اینکه $p_1 = p_2$ و $V_1 = V_2 \approx 0$ ، از رابطه (۱) نتیجه می شود:

$$h_p = z_2 - z_1 + h_f + \sum h_m = 120 \text{ ft} - 20 \text{ ft} + \frac{V^2}{2g} \left(\frac{fL}{d} + \sum K \right) \quad (1)$$

سرعت متوسط جریان چنین است:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.2 \text{ ft}^3/\text{s}}{\frac{1}{4}\pi \left(\frac{2}{12} \text{ ft}\right)^2} = 9.17 \text{ ft/s}$$

اکنون، جدول زیر را برای این سیستم لوله کشی تشکیل می دهیم:

k	اتصال
۰/۵	ورودی لبه تیز (شکل ۶-۲۱)
۶/۹	شیر کروی باز ۲ اینچ (جدول ۶-۵)
۰/۲۵	خم ۱۲ اینچ (شکل ۶-۲۰)
۰/۹۵	زانویی ۹۰° استاندارد (جدول ۶-۵)
۲/۷	شیر کشویی نیمه باز (شکل ۶-۱۸ ب)
$\sum k = 1/12.3$	خروجی لبه تیز (شکل ۶-۲۱)

عدد رینولدز چنین است:

$$Re_d = \frac{Vd}{\nu} = \frac{9.17(\frac{2}{12})}{0.000011} = 139,000$$

با توجه به اینکه $\epsilon/d = 0.001$ ، از نمودار مودی نتیجه می شود: $f = 0.0216$. از رابطه (۲) نتیجه می شود:

$$h_p = 100 \text{ ft} + \frac{(9.17 \text{ ft/s})^2}{2(32.2 \text{ ft/s}^2)} \left[\frac{0.0216(400)}{\frac{2}{12}} + 12.2 \right]$$

قدرت پمپ چنین است:

$$P = \rho g Q h_p = [1.94(32.2) \text{ lbf/ft}^3](0.2 \text{ ft}^3/\text{s})(184 \text{ ft}) = 2300 \text{ ft} \cdot \text{lbf/s}$$

با توجه به اینکه یک اسب بخار $\text{hp} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lbf/s}$ است، نتیجه می شود:

$$P = \frac{2300}{550} = 4.2 \text{ hp}$$

- اگر بازده پمپ را ۷۰ تا ۸۰ درصد در نظر بگیریم، قدرت ناخالص پمپ تقریباً ۶ hp خواهد بود.

امام سجاد (ع): نگو جز روی علم ، نپذیر جز روی علم

خدایا چنان کن سر انجام کار

تو خشنود باشی و ما رستگار