

مکانیک سیالات ۲

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

بخش دوم از مباحث فصل ششم:
محاسبات سیستم های لوله کشی

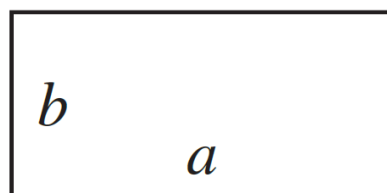
کلاس درس دکتر نوروزی
خرداد ۹۹



مفهوم قطر هیدرولیکی

برای تعریف گروههای بعد نظیر عدد رینولدز، عدد ناسلت و ... در لوله های غیر مدور، از قطر هیدرولیکی استفاده می شود. در این لوله ها، تنش برشی دیواره در نقاط مختلف دیوار می تواند متفاوت باشد. مثلاً در کانال دارای مقطع مربعی، کمترین تنش برشی در گوشه ها و بیشترین تنش برشی برشی در وسط اضلاع رخ می دهد. فرض کنید، متوسط محیطی تنش برشی یک کانال غیرمدور برابر $\bar{\tau}_w$ است. در اینصورت قطر هیدرولیکی این کانال برابر با قطر لوله مدوری است که تنش برشی دیواره آن تحت گرادیان فشار یکسان، برابر با $\bar{\tau}_w$ باشد. می توان نشان داد که بر اساس این آنالوژی، قطر هیدرولیکی برابر است با:

$$D_h = \frac{4A}{\Gamma} \quad (1)$$



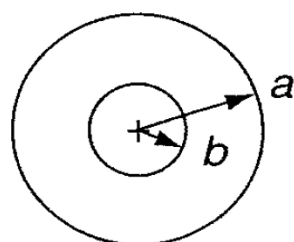
که در رابطه فوق، A مساحت سطح مقطع جریان و Γ محیط تر شده جداره است.

برای مثال، برای جریان در یک کانال دارای مقطع مستطیلی با ابعاد $a \times b$ داریم:

$$D_h = \frac{4A}{\Gamma} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} \quad (2)$$

و برای جریان بین دو لوله هم مرکز به شعاع a و b داریم:

$$D_h = \frac{4A}{\Gamma} = \frac{4(\pi a^2 - \pi b^2)}{2\pi a + 2\pi b} = \frac{4\pi(a^2 - b^2)}{2\pi(a+b)} = 2(a-b) \quad (3)$$



عدد رینولدز معادل و افت هد در لوله های غیرمدور

معمولا عدد رینولدز معادل کانالهای غیرمدور بر اساس قطر هیدرولیکی محاسبه می شود:

$$Re_{D_h} = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (4)$$

البته نباید انتظار داشت که با این تعریف برای عدد رینولدز، امکان تعیین دقیق ضریب اصطکاک داری از دیاگرام مودی برای لوله های غیر مدور وجود دارد و این تخمین برای جریانهای آرام و آشسته به ترتیب تا ۴۰٪ و ۱۵٪ دارای خطا است:

$$f \approx \begin{cases} \frac{64}{Re_{D_h}} & \pm 40\% \quad \text{laminar flow} \\ f_{\text{Moody}}\left(Re_{D_h}, \frac{\epsilon}{D_h}\right) & \pm 15\% \quad \text{turbulent flow} \end{cases} \quad (5)$$

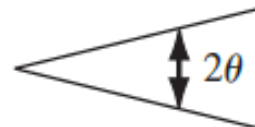
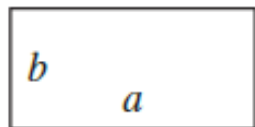
خوشبختانه خطای فوق الذکر برای جریانهای آشسته در محدوده خطای پذیرفته شده در کاربردهای مهندسی قرار دارد و لذا در عمل می توان از قطر هیدرولیکی در بسیاری از کاربردها استفاده نمود. برای تعیین دقیق تر ضریب اصطکاک داری می توان از قطر موثر در تعریف عدد رینولدز استفاده کرد. در جریانهای آشسته، این قطر بصورت ضریبی از قطر هیدرولیکی بیان می شود. برای جریانهای آرام که امکان خطا برای محاسبه f بر اساس قطر هیدرولیکی بیشتر است، استفاده از قطر موثر می تواند که مفیدتر باشد:

$$D_{eff} = D_h \left(\frac{64}{f Re_{D_h}} \right) \rightarrow Re_{D_{eff}} = \frac{\rho U D_{eff}}{\mu} \quad (6)$$

قطر موثر در جریان بین دو لوله
هم مرکز و کانالهای مستطیلی و مثلثی

Table 6.4 Laminar Friction
Constants fRe for Rectangular and
Triangular Ducts

Rectangular Isosceles triangle



b/a	fRe_{D_h}	θ , deg	fRe_{D_h}
0.0	96.00	0	48.0
0.05	89.91	10	51.6
0.1	84.68	20	52.9
0.125	82.34	30	53.3
0.167	78.81	40	52.9
0.25	72.93	50	52.0
0.4	65.47	60	51.1
0.5	62.19	70	49.5
0.75	57.89	80	48.3
1.0	56.91	90	48.0

Table 6.3 Laminar Friction Factors
for a Concentric Annulus

b/a	fRe_{D_h}	$D_{eff}/D_h = 1/\zeta$
0.0	64.0	1.000
0.00001	70.09	0.913
0.0001	71.78	0.892
0.001	74.68	0.857
0.01	80.11	0.799
0.05	86.27	0.742
0.1	89.37	0.716
0.2	92.35	0.693
0.4	94.71	0.676
0.6	95.59	0.670
0.8	95.92	0.667
1.0	96.0	0.667

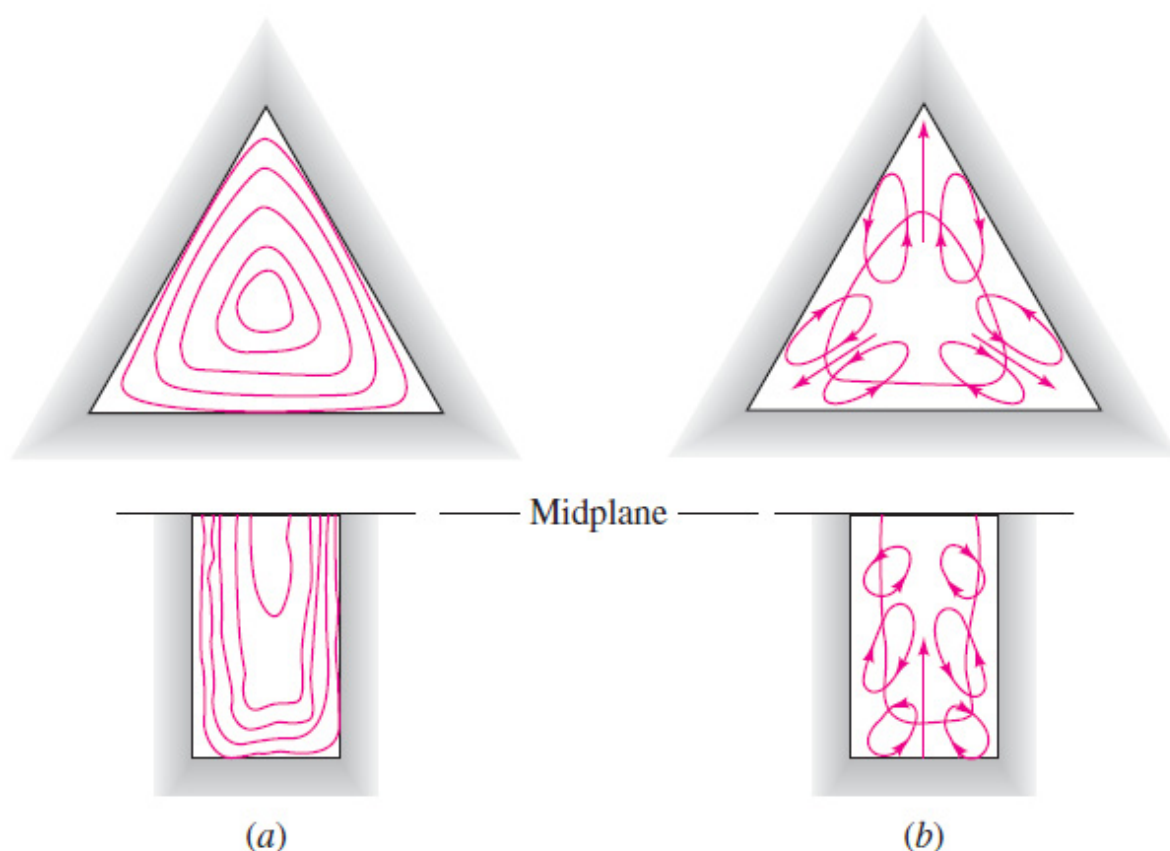


Fig. 6.16 Illustration of secondary turbulent flow in noncircular ducts: (a) axial mean velocity contours; (b) secondary flow in-plane cellular motions. (After J. Nikuradse, *dissertation, Gttingen, 1926.*)

مزیت استفاده از قطر هیدرولیکی برای جریانهای آشفته

جریانهای آشفته در مقاطع غیرممدور، مستقیم الخط نبوده و دارای جریان های ثانویه هستند. جریانهای ثانویه، جریانهای گردابی هستند که عمود بر جریان اصلی تشکیل می شوند. این جریانهای ثانویه سبب می شوند که ناحیه پر سرعت هسته جریان به سمت گوشه ها امتداد یابد و به این ترتیب نرخ برش و تنش برشی در گوشه ها بیشتر شود. به این ترتیب، تنش برشی در نقاط مختلف دیوار یکدست تر و نزدیک به مقدار ثابتی است که این امر سبب می شود تا تعریف قطر هیدرولیکی برای جریانهای آشفته مناسب باشد (توجه کنید که قطر هیدرولیکی بر اساس آنالوژی متوسط تنش برشی با یک کانال مدور تعریف شده است).

افت هد در اتصالات، تبدیلات، شیر آلات و ...

در جلسه پیش گفته شد که افت هد اصطلاحی لوله مستقیم از رابطه زیر بدست می آید:

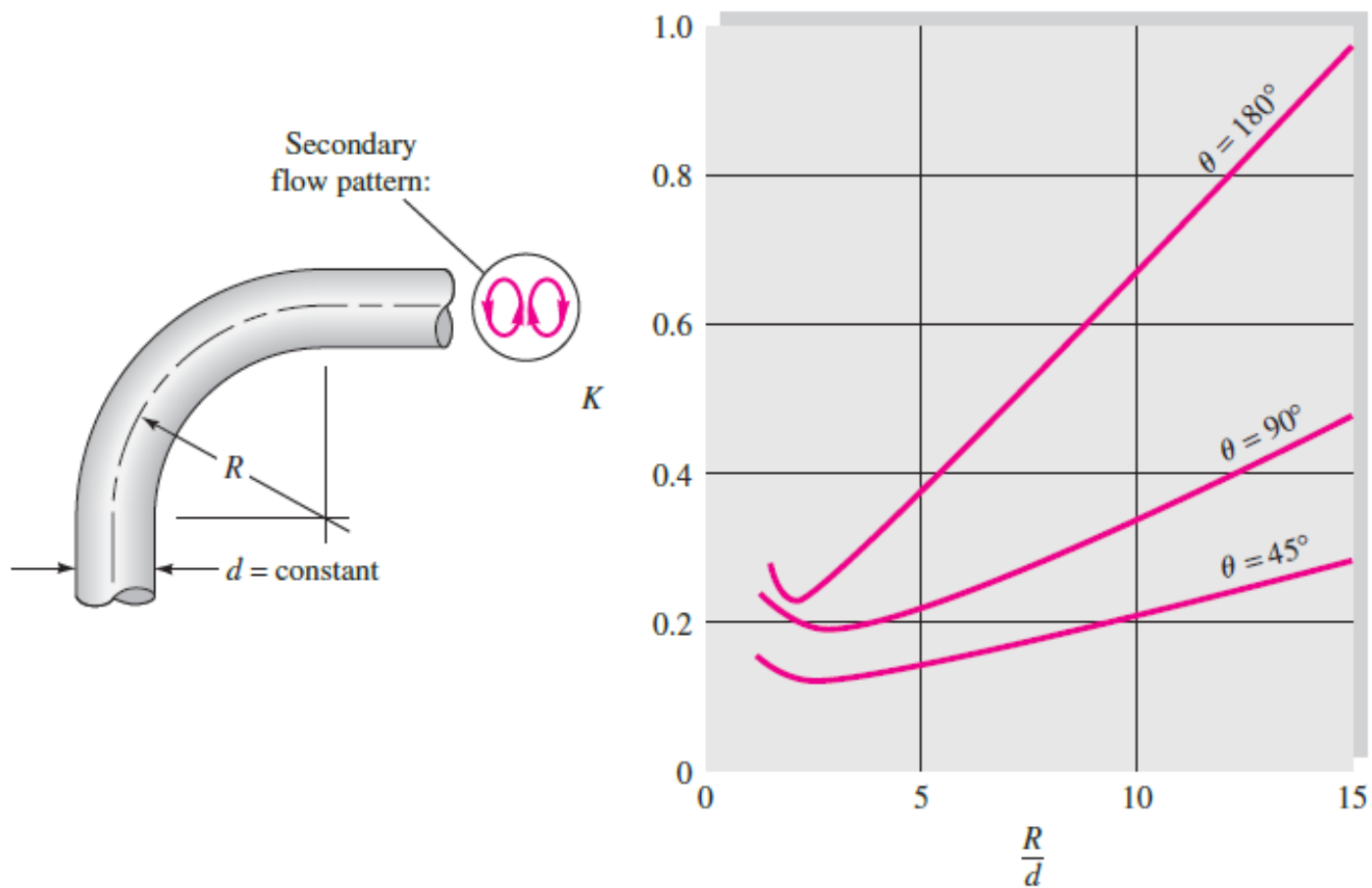
$$h_{loss} = f \frac{L}{d} \frac{U^2}{2g} \quad (۷)$$

در سیستم های لوله کشی معمولاً قطعات دیگری بجز لوله، بکار رفته است که شامل تبدیلات، اتصالات، شیر آلات، فیلترها، مبدلها و ... است. این قطعات/تجهیزات دارای افت فشار بیشتری نسبت به لوله مستقیم با طول و قطر یکسان هستند و افت هد آنها از رابطه زیر تبعیت می کند:

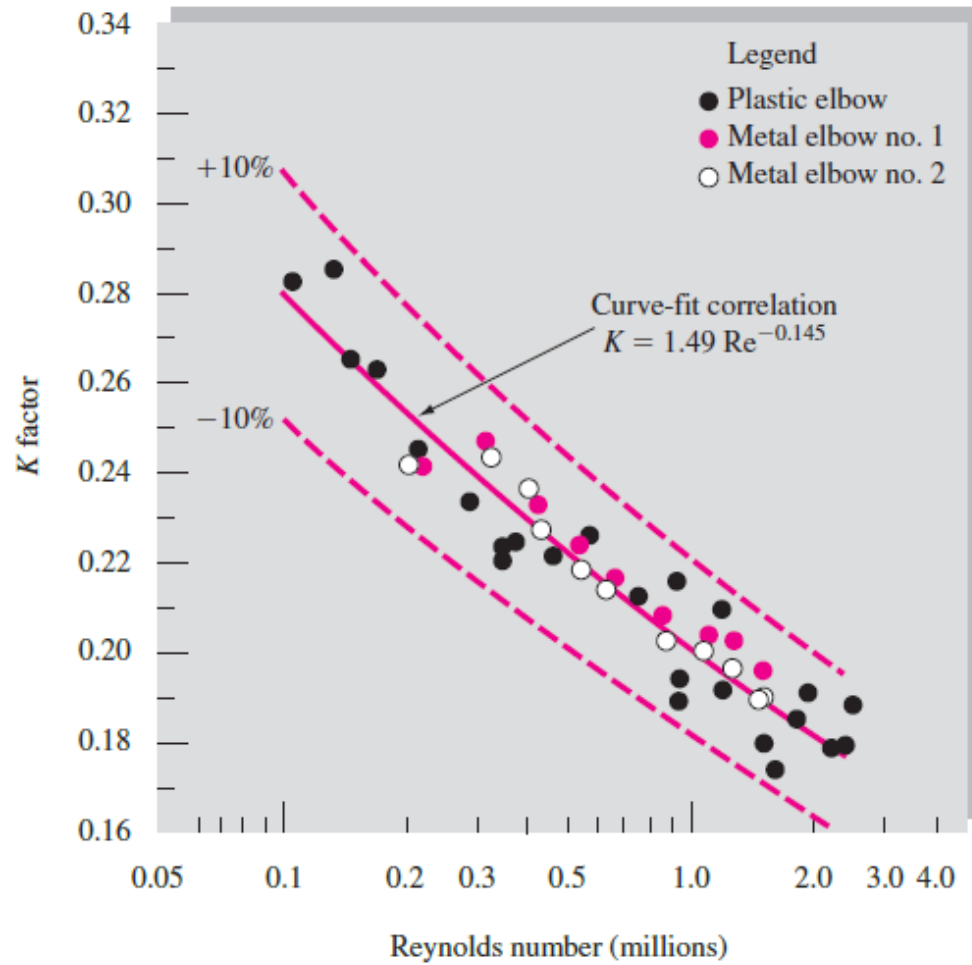
$$h_{loss} = K \frac{U^2}{2g} \quad (۸)$$

در رابطه فوق، K ضریب افت هد مربوط به قطعه/تجهیز است و بصورت آزمایشگاهی تعیین می شود.





ضریب افت هد در اتصال زانویی در $Re=200000$



ضریب افت هد در زانویی ۹۰ درجه در اعداد رینولدز مختلف

ضریب افت هدر ورودی و خروجی لوله از یک مخزن

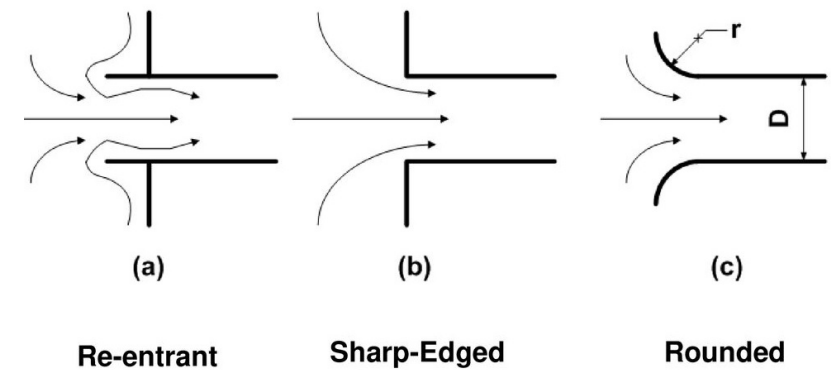
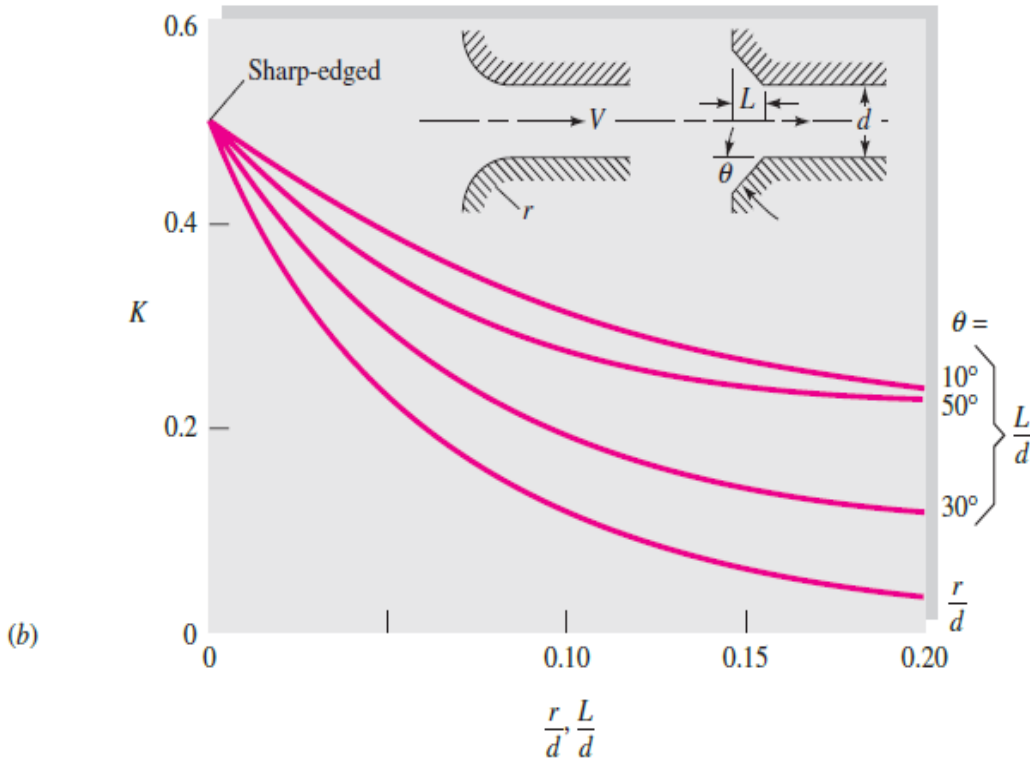
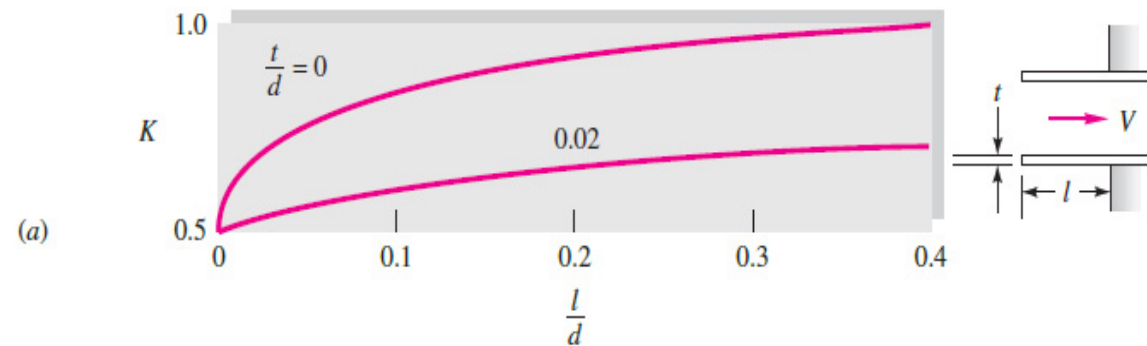


Fig. 6.21 Entrance and exit loss coefficients: (a) reentrant inlets; (b) rounded and beveled inlets. Exit losses are $K \approx 1.0$ for all shapes of exit (reentrant, sharp, beveled, or rounded). (From Ref. 37.)

ضریب افت هد در تبدیل
همگرا و واگرای ناگهانی

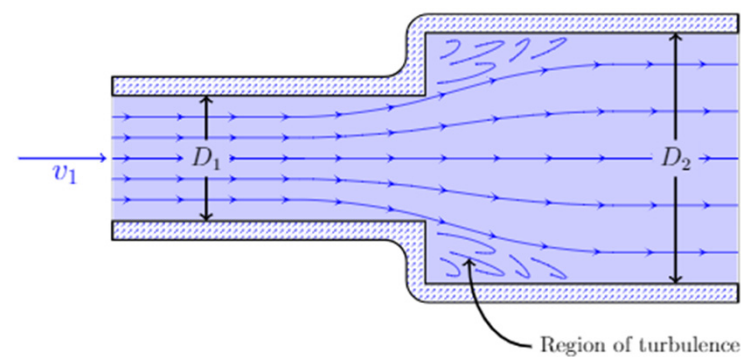
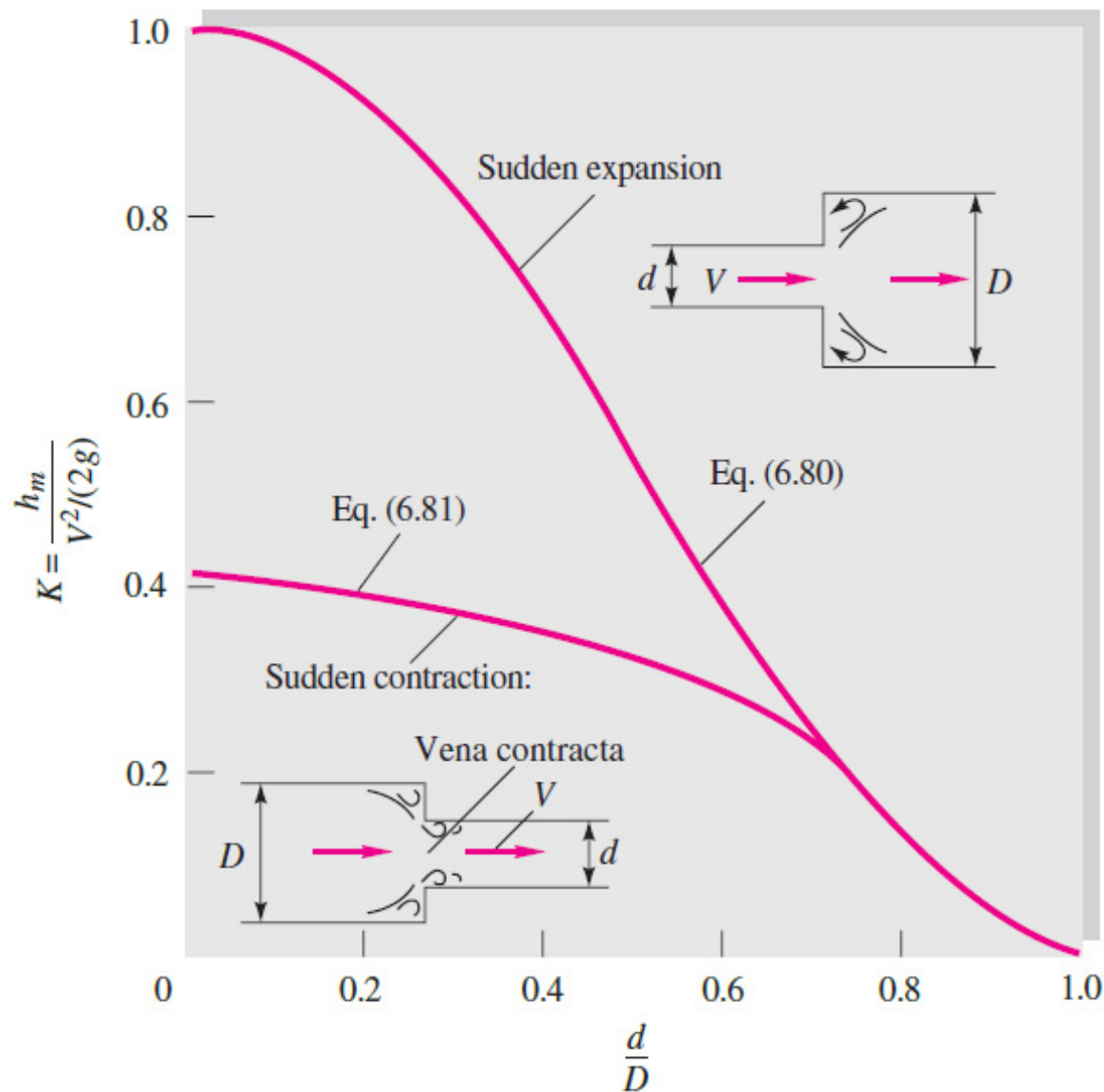


Fig. 6.22 Sudden expansion and contraction losses. Note that the loss is based on velocity head in the small pipe.

ضریب افت هد در انبساط تدریجی

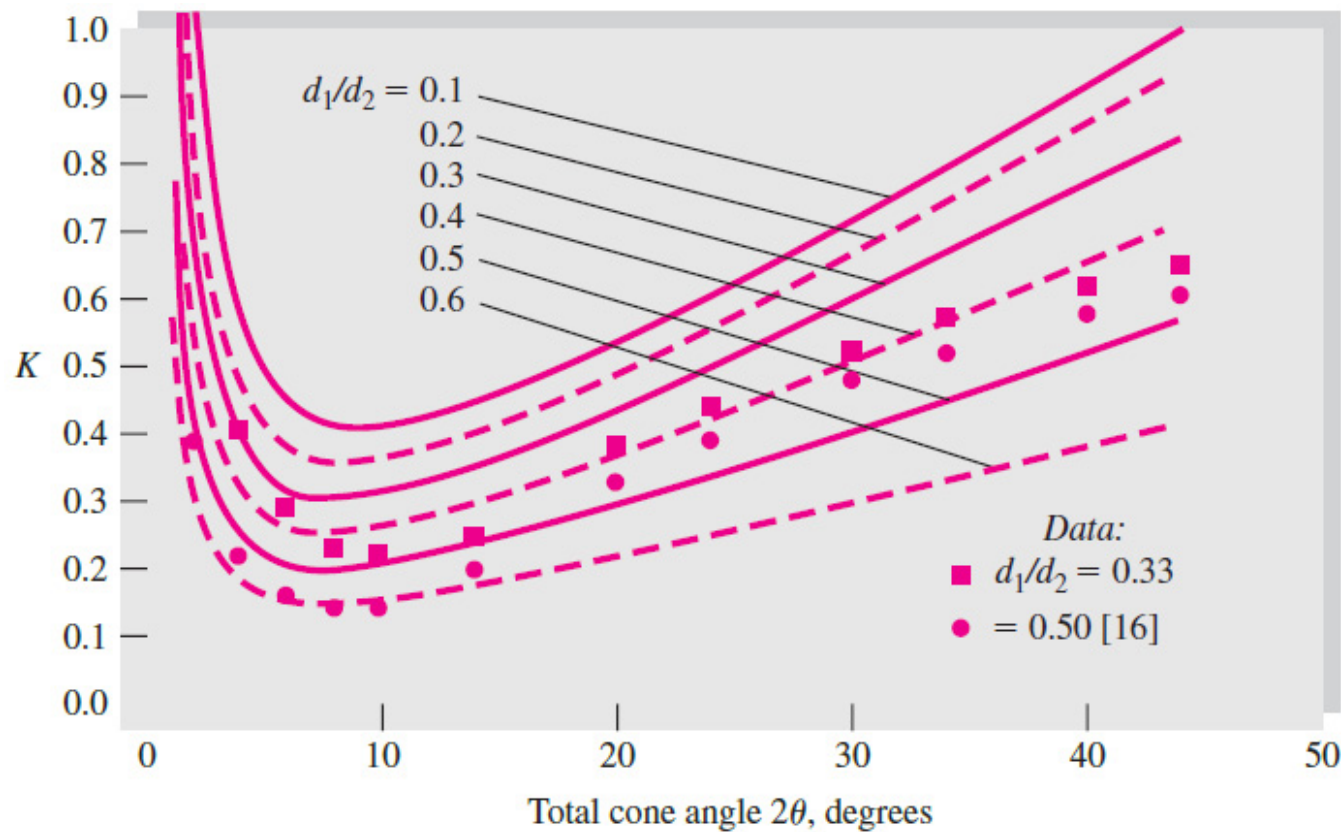
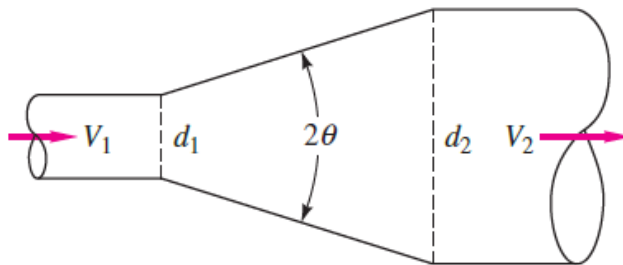


Fig. 6.23 Flow losses in a gradual conical expansion region, as calculated from Gibson's suggestion [15, 50], Eq. (6.82), for a smooth wall.



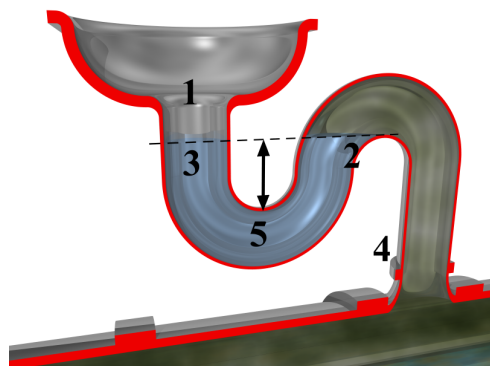
درپوش



سه راهی



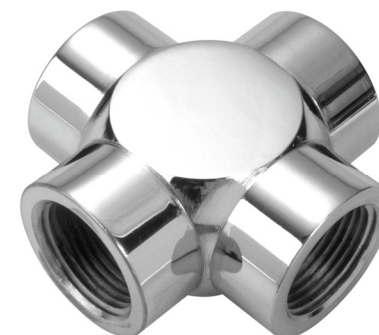
سه راهی زاویه دار



شترگلوئی (سیفون)



چهار راهی زاویه دار



چهار راهی

انواع متداول شیر آلات

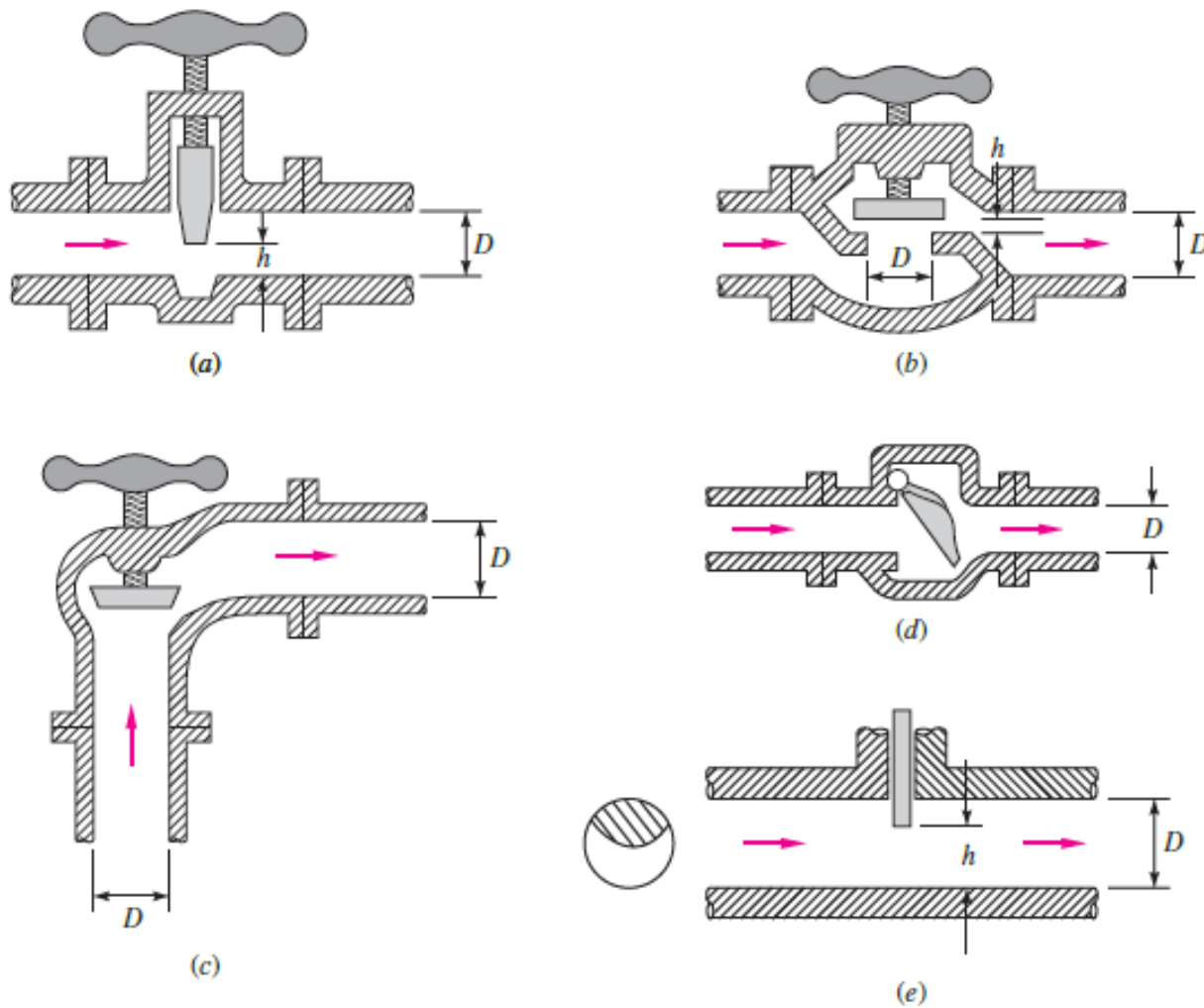
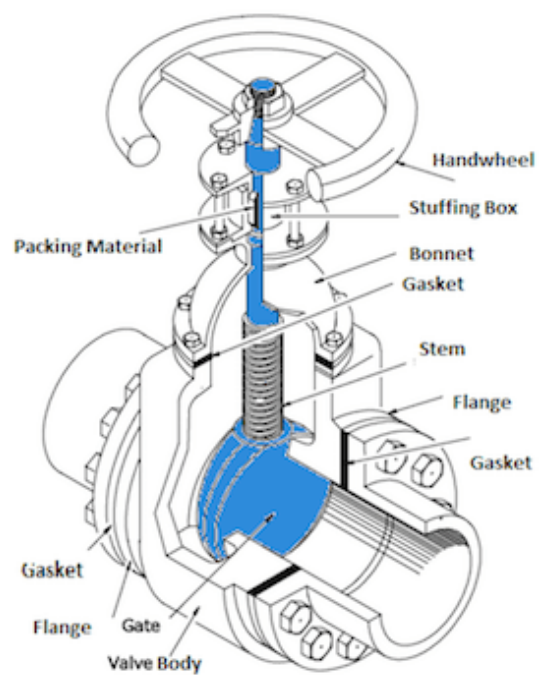
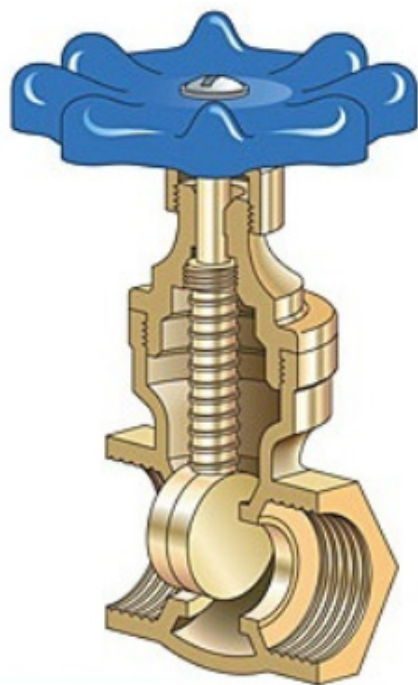
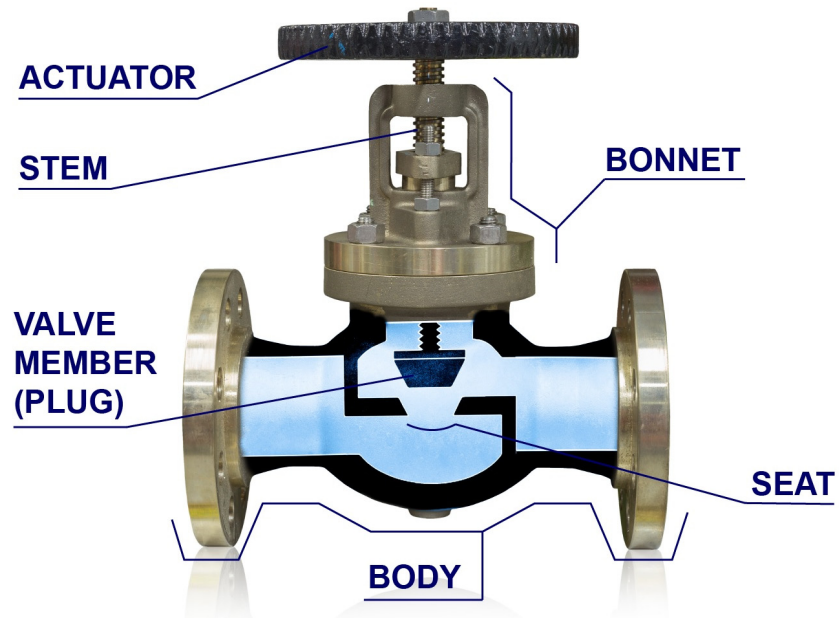
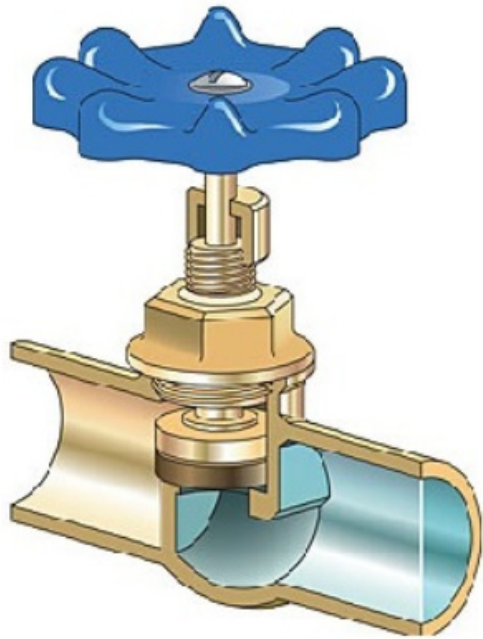


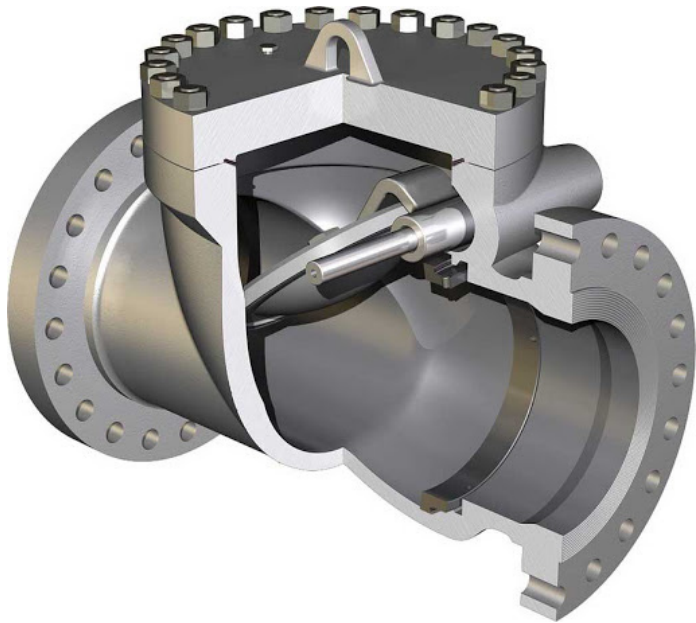
Fig. 6.17 Typical commercial valve geometries: (a) gate valve; (b) globe valve; (c) angle valve; (d) swing-check valve; (e) disk-type gate valve.



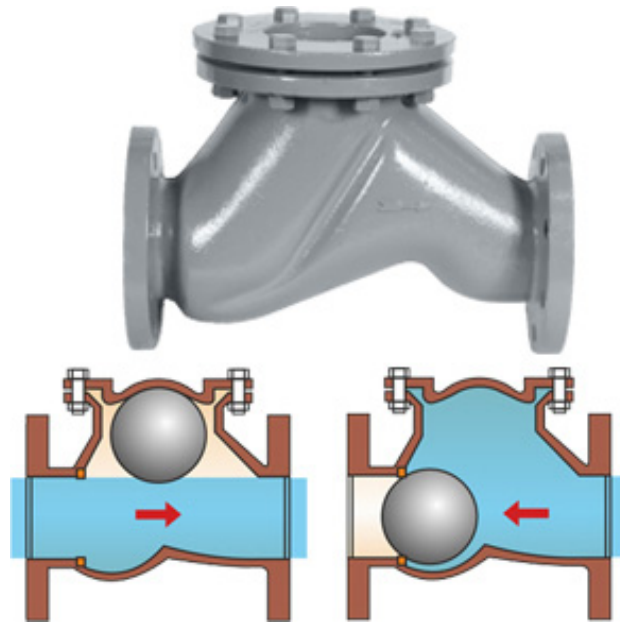
شیر دروازه ای (Gate Valve)



شیر بشقابی (Globe Valve)



Swing Check Valve



Ball Check Valve

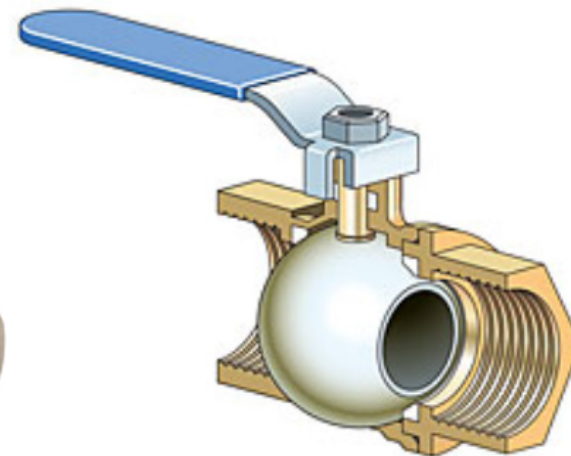
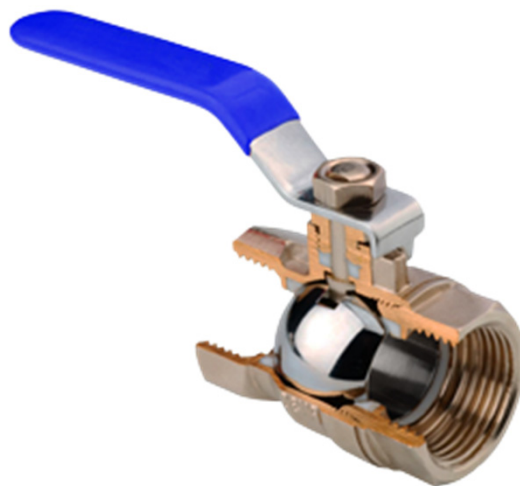


Lift Check Valve

انواع شیر یک طرفه (Check Valve)



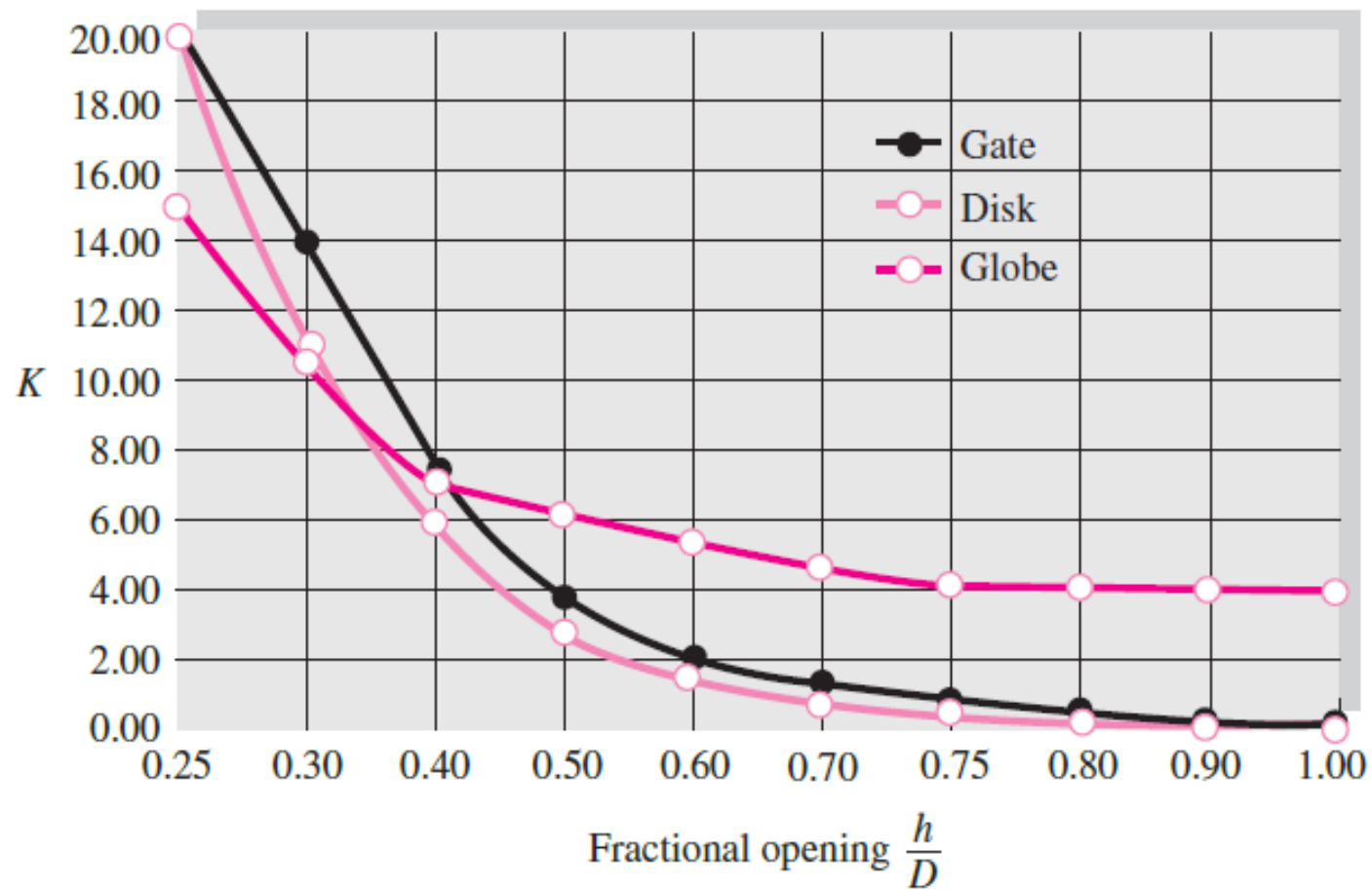
شیر پروانه ای (Butterfly Valve)



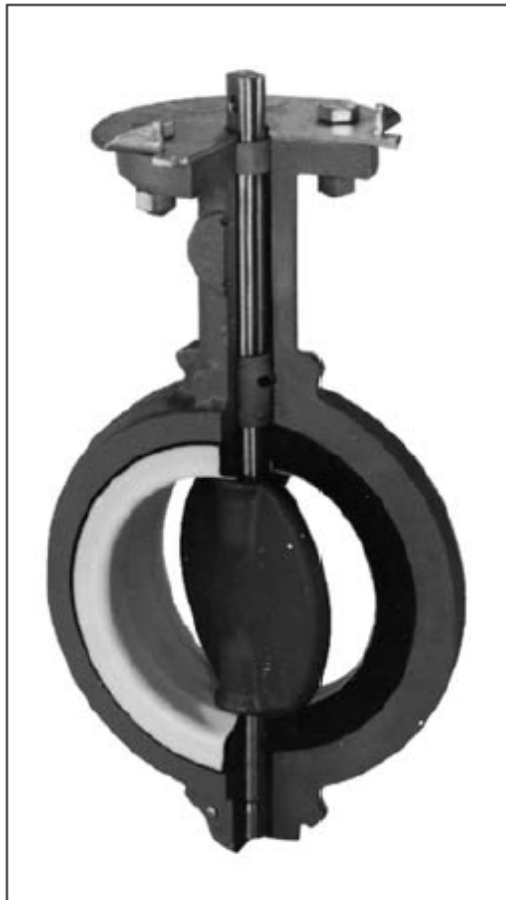
شیر توپی (Ball Valve)

ضریب افت هد انواع شیر (در حالت کاملاً باز) و اتصالات زانویی و سه راهی در سایزهای مختلف

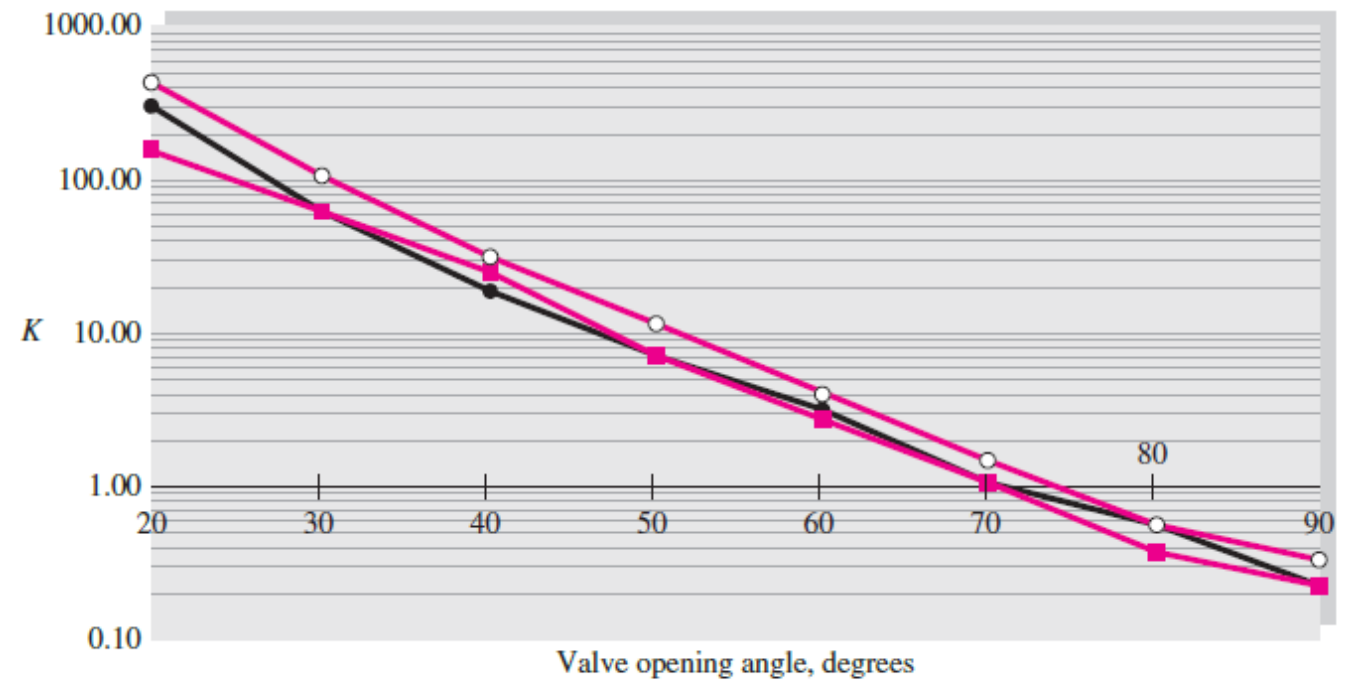
	Nominal diameter, in								
	Screwed				Flanged				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4	1	2	4	8	20
Valves (fully open):									
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Elbows:									
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
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



ضریب افت هد انواع شیر بر حسب نسبت بازبودن



(a)



(b)

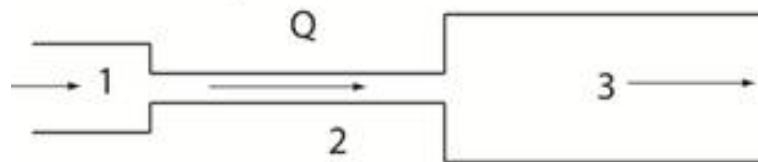
Fig. 6.19 Performance of butterfly valves: (a) typical geometry (*Courtesy of Tyco Engineered Products and Services*); (b) loss coefficients for three different manufacturers.

تحلیل جریان در مسیرهای لوله کشی

به طور کلی مسیرهای لوله کشی ترکیبی از مسیرهای **سری** و **موازی** با طولها و قطرهای مختلف به همراه انواع شیر، اتصال و ... هستند. به این منظور جهت تحلیل جریان باید به موارد زیر توجه نمود:

- در مسیرهای سری، دبی در کل مسیر جریان ثابت است اما برای رسیدن به افت هد کل باید افت هدهای اجزا مختلف مسیر با هم جمع شوند.
- در مسیرهای موازی، افت هد دو سر مسیرهای موازی با هم برابر است اما برای رسیدن به دبی کل باید دبی های مسیرهای مختلف با هم جمع شوند.

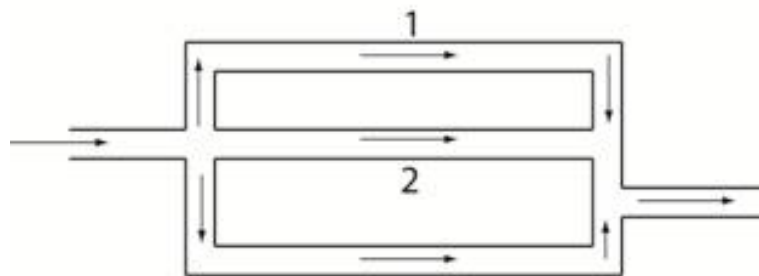
Pipes in Series



$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$h_{L_{total}} = h_{L_1} + h_{L_2} + h_{L_3}$$

Pipes in Parallel



$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$h_{L_1} = h_{L_2} = h_{L_3}$$

تحلیل مسیرهای سری

در شکل زیر جریان در یک مسیر لوله کشی سری نشان داده شده است. بنابراین برای دبی این مسیر داریم:

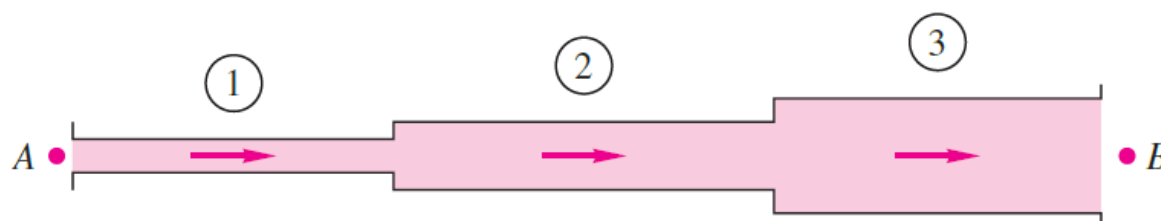
$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \text{const} \quad \text{or} \quad V_1 d_1^2 = V_2 d_2^2 = V_3 d_3^2 \quad (9)$$

همچنین در مسیر سری، افت هدر اجزا مسیر با هم جمع می شوند تا به افت هدر کل برسیم:

$$\Delta h_{A \rightarrow B} = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 \quad (10)$$

با توجه به اینکه لوله های هر بخش از مسیر سری می توانند دارای قطر، طول متفاوت به همراه انواع شیر و اتصال باشند، داریم:

$$\begin{aligned} \Delta h_{A \rightarrow B} = & \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{f_1 L_1}{d_1} + \sum K_1 \right) + \frac{V_2^2}{2g} \left(\frac{f_2 L_2}{d_2} + \sum K_2 \right) \\ & + \frac{V_3^2}{2g} \left(\frac{f_3 L_3}{d_3} + \sum K_3 \right) \end{aligned} \quad (11)$$



با توجه به رابطه (۹)، می توان سرعت های V_2 و V_3 را بر حسب V_1 نوشت ($V_2 = V_1 d_1^2 / d_2^2$ و $V_3 = V_1 d_1^2 / d_3^2$). بنابراین، رابطه (۱۱) بر حسب سرعت V_1 قابل بازنویسی به شکل زیر است:

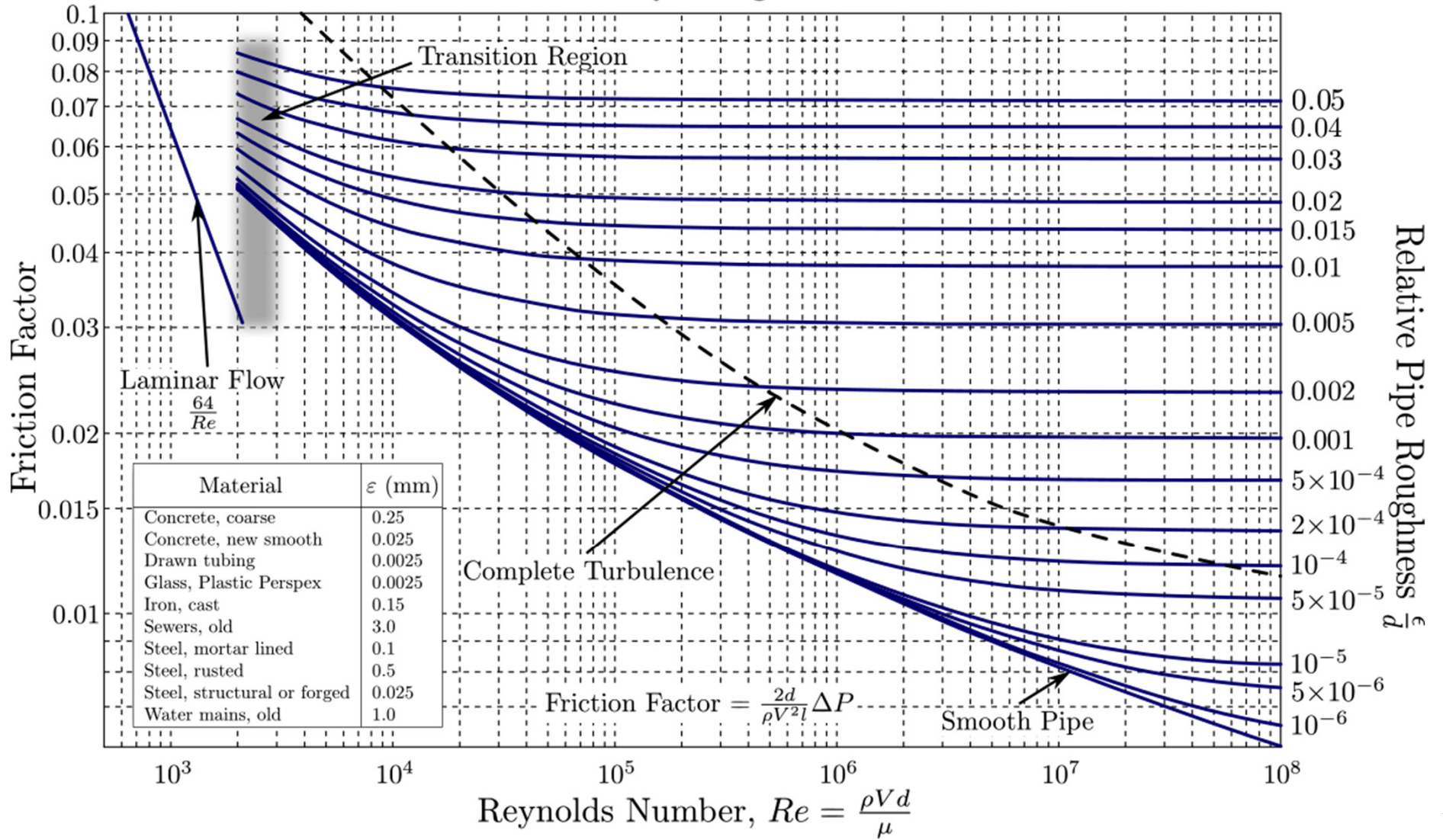
$$\Delta h_{A \rightarrow B} = \frac{V_1^2}{2g} (\alpha_0 + \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) \quad (12)$$

در رابطه فوق، ضرایب α_i همگی مقادیری ثابت هستند. در این حالت تحلیل مسائل ممکن است به دو شکل کلی پیش برود:

۱- **دبی معلوم و افت هد کل مجهول باشد.** در این حالت، محاسبه بسیار ساده است، چون مقادیر سرعت معلوم است و به سادگی می توان اعداد رینولدز هر بخش را محاسبه کرد و از دیاگرام مودی ضرایب اصطکاک f_1 ، f_2 و f_3 و در نهایت افت هد کل را از رابطه (۱۲) بدست آورد.

۲- **افت هد کل معلوم و دبی مجهول باشد.** در این حالت محاسبه مقداری دشوار است و نیاز به سعی و خطا دارد، چون در رابطه (۱۲) مقدار V_1 و هر سه ضرایب اصطکاک f_1 ، f_2 و f_3 مجهول هستند. یک راه مناسب برای شروع فرآیند سعی و خطا در نظر گرفتن **مقدار اولیه مناسب** برای ضرایب اصطکاک f_1 ، f_2 و f_3 بر حسب ناحیه کاملاً زبر است که در آن مقدار ضرایب اصطکاک مستقل از رینولدز و تنها تابعی از زبری است. حال با استفاده از رابطه (۱۲) می توان مقدار سرعت V_1 را بدست آورد. با داشتن سرعتها می توان اعداد رینولدز بخشهای ۱، ۲ و ۳ را محاسبه و مقدار ضرایب اصطکاک را بدست آورد. با تکرار فرآیند فوق الذکر (برای ۱ یا ۲ مرحله) می توان مقادیر همگرای سرعت و ضریب اصطکاک را محاسبه نمود.

Moody Diagram



تحلیل مسیرهای موازی

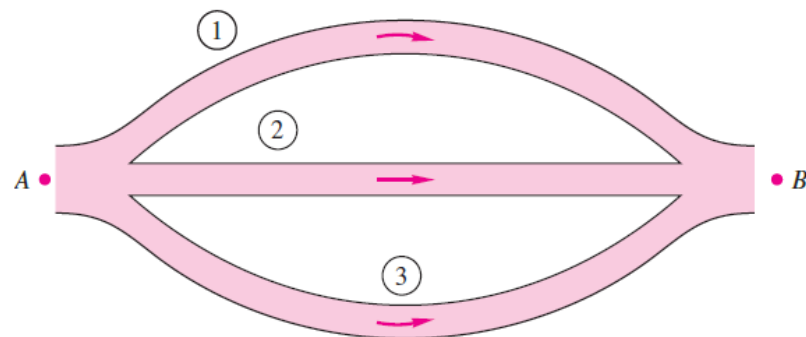
در شکل زیر جریان در یک سیستم لوله کشی موازی نشان داده شده است. بنابراین برای افت هد و دبی آن داریم:

$$\Delta h_{A \rightarrow B} = \Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h_3 \quad (۱۳)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (۱۴)$$

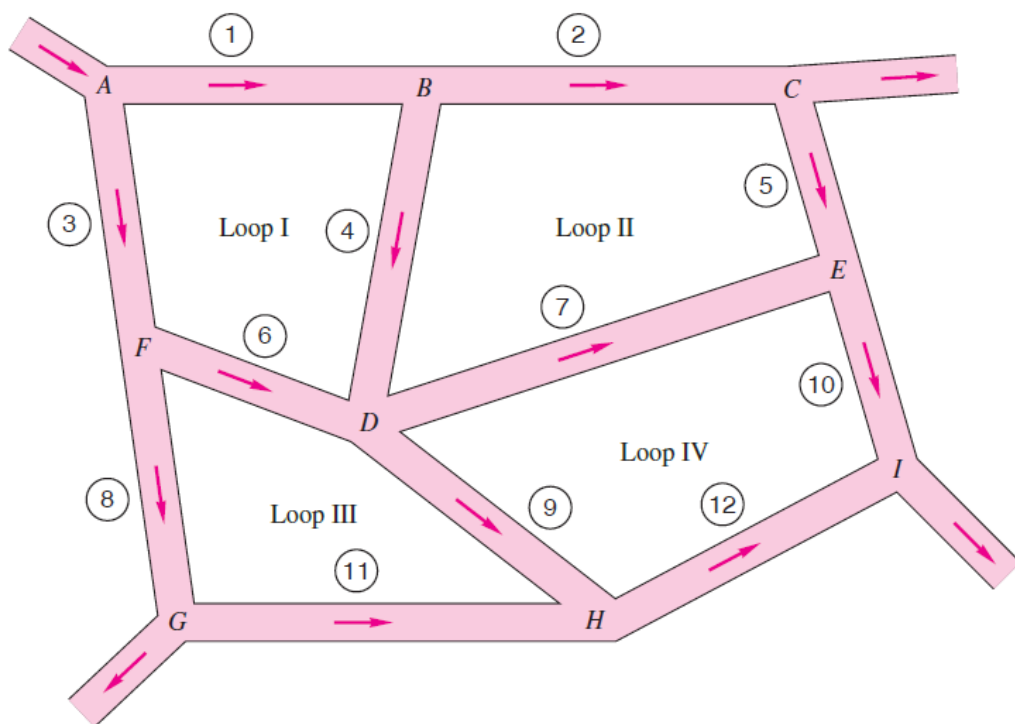
در این مساله نیز دو حالت متصور است:

- افت هد کل معلوم و دبی ها مجهول باشد. در این حالت مساله نسبتا ساده است. زیرا با داشتن افت هد هر مسیر موازی می توان دبی آنها نیز بدست آورد. در اینجا برای تعیین هر دبی نیاز به ۱ الی ۲ بار سعی و خطا است. در ابتدا ضریب اصطکاک هر مسیر موازی را می توان برابر ضریب اصطکاک حالت کاملا زیر در نظر گرفت و سپس مقدار سرعت را محاسبه نمود. پس از تعیین سرعت و بدست آوردن عدد رینولدز در هر مسیر، ضریب اصطکاک از دیاگرام مودی مجددا محاسبه و مقدار سرعت در صورت نیاز از رابطه (۱۳) تصحیح می شود. در نهایت دبی کل از رابطه (۱۴) محاسبه خواهد شد.



- دبی کل معلوم و دبی های هر مسیر و افت هد آنها مجهول باشد. در این حالت، حل با سعی و خطا نسبتا زیاد همراه بوده و معمولا نیاز به محاسبه با نرم افزارهای کامپیوتری نظیر EES است.

حل شبکه لوله ها



برای حل شبکه لوله ها بایستی که مطابق شکل شبکه لوله به مجموعه ای از حلقه ها و گره ها تقسیم بندی شود. در این مجموعه می توان معادلاتی بر اساس موارد زیر استخراج نمود:

- مجموع دبی ها در هر گره صفر است.
- تغییرات فشار در ابتدا و انتهای هر حلقه صفر است (نیاز است که رابطه انرژی در هر حلقه نوشته شود).

مجموع معادلات مذکور به دستگاه معادلات غیر خطی منجر می شود که حل آنها معمولاً بوسیله نرم افزارهایی نظیر EES، Piping Systems Fluid Flow و ... انجام می شود.



END

Thank You All

(have a nice day)