

# فصل پنجم

## محاسبه افتها در لوله‌ها

### ۵-۱ افت انرژی در خطوط لوله

یکی از شاخه‌های کاربردی علم مکانیک سیالات، برآورد افت انرژی جریان سیال در سیستم‌های لوله کشی و به‌خصوص تأسیسات آبرسانی است. عموماً شبکه لوله‌ها به‌صورت سری، موازی و حلقوی در سیستم آبرسانی طراحی می‌گردند. بنابراین سنجش میزان افت انرژی در نقاط مختلف برای انجام محاسبات دقیق آبرسانی لازم است.

افت‌های حاصله در حرکت سیالات در لوله‌ها را می‌توان به دو بخش افت‌های اصطکاکی (طولی یا خطی) و موضعی (فرعی) تقسیم نمود که افت اصطکاکی ناشی از لزجت و اصطکاک داخلی سیال و افت موضعی به واسطه عوارض موضعی و یا تغییر ناگهانی سطح مقطع پدید می‌آید. بنابراین افت کلی لوله از مجموع افت‌های اصطکاکی و موضعی آن به‌دست می‌آید.

$$\sum h_l = h_f + h_e \quad (5-1)$$

برای محاسبه افت اعم از اصطکاکی و یا موضعی در یک لوله، ابتدا باید نوع جریان آن را تعیین کرد و برای این کار ابتدا عدد رینولدز مربوط به آن را محاسبه می‌کنند. با معلوم شدن نوع جریان، می‌توان با استفاده از فرمول‌ها، جداول و یا منحنی‌ها افت را محاسبه کرد.

### ۵-۲ افت اصطکاکی (طولی یا خطی) در خطوط لوله

قسمت اعظم افت حاصله در لوله‌ها را افت ناشی از اصطکاک تشکیل می‌دهد که این افت، از اصطکاک ذرات سیال ناشی می‌شود و در مواردی که هیچ‌گونه پدیده موضعی

نیز در لوله موجود نباشد باز هم وجود دارد. اساسی‌ترین فرمول برای محاسبه افت اصطکاکی در لوله‌ها، رابطه دارسی - ویسباخ<sup>۱</sup> به شرح زیر است:

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (۲-۵)$$

که در آن  $h_f$  افت انرژی (افت ارتفاع یا افت خط تراز هیدرولیکی)؛  $L$  طول لوله؛  $D$  قطر لوله؛  $V$  سرعت متوسط و  $f$  ضریب اصطکاک لوله می‌باشد. این رابطه را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$j = \frac{h_f}{L} = \frac{f}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (۳-۵)$$

که در آن  $j$  زافت حاصله به ازای واحد طول است.

رابطه (۲-۵) نشان می‌دهد که مقدارافت در لوله با طول لوله و با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد. این بدان معنی است که هرچه طول لوله بیشتر باشد، مقدار افت نیز به همان نسبت بیشتر می‌شود و هر چه سرعت بیشتر شود مقدار افت با توان دوم سرعت افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر سرعت دو برابر شود، افت در لوله چهار برابر خواهد شد. این نکته به ما کمک می‌کند تا از طراحی سیستم لوله با سرعت زیاد اجتناب شود، تا ضمن جلوگیری از افت زیاد، احتمال ضربه قوچ کاهش یابد.

مقدار افت با قطر لوله رابطه معکوس دارد، یعنی با افزایش قطر افت کاهش می‌یابد و با کاهش قطر، افت افزایش خواهد یافت. البته با توجه این که مقدار  $V$  نیز به قطر بستگی دارد ( $Q = VA = V \cdot \frac{\pi D^2}{4}$ )، در صورتی که برای یک دبی مشخص قطر افزایش یابد، سرعت نیز به شدت کاهش خواهد داشت. به عنوان یک معیار اگر قطریک لوله دو برابر شود، سرعت نیز یک چهارم خواهد شد و در نتیجه با دو برابر شدن قطر لوله سبب خواهد شد که افت  $\frac{1}{۳۲}$  شود، یعنی ۳۲ بار کوچک‌تر خواهد شد.

### ۳-۵ افت‌های موضعی<sup>۲</sup>

در خطوط انتقال سیالات، در برخی نقاط، سرعت جریان از لحاظ مقدار و جهت تغییر

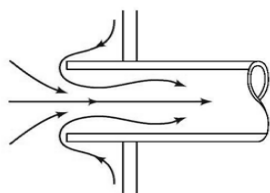
1. Darcey weisbach  
2. Minor losses

می‌کند که این خود باعث تلاطم در جریان و کاهش انرژی در اثر جریان می‌شود. این تغییر سرعت می‌تواند ناشی از انبساط یا انقباض مقطع باشد یا در اثر وجود خم‌ها (زانویی‌ها) شیرفلکه و یا سایر اتصالات باشد.

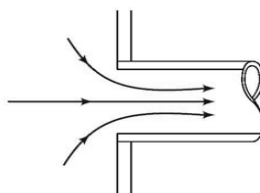
در این حالت مقداری از انرژی جریان تلف می‌شود که به آن افت انرژی موضعی (فرعی) می‌گویند و طبق رابطه عمومی زیر افت موضعی محاسبه می‌شود:

$$h_e = K \frac{V^2}{2g} \quad (۴-۵)$$

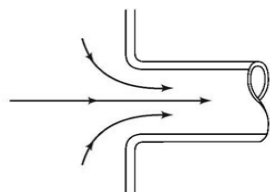
در فرمول فوق  $V$  سرعت متوسط جریان در لوله و  $K$  ضریب افت است و  $K$  قویاً به مشخصات هندسی اتصالات مورد استفاده و مشخصات جریان که توسط عدد رینولدز ارائه می‌شود بستگی دارد. تقریباً تمام تلفات موضعی به‌طور تجربی و با انجام آزمایش تعیین می‌شوند. یک استثناء مهم ناشی از انبساط ناگهانی است که آن را به‌طور تحلیلی به‌دست می‌آوریم. افت‌های موضعی در لوله‌های طولانی با توجه به مقدار یا جهت سرعت به‌وجود می‌آید که این خود باعث تلاطم در جریان و کاهش انرژی در اثر جریان می‌شود. برای کاهش تلفات ورودی از لوله‌های با دهانه ملایم‌تر استفاده می‌شود. این لوله‌ها اثرات پدیده فشردگی<sup>۱</sup> را کاهش می‌دهند و هر چه انتهای دهانه ورودی لوله ملایم‌تر باشد، ضریب افت بار موضعی  $K$  کوچک‌تر خواهد بود. شکل (۵-۱)



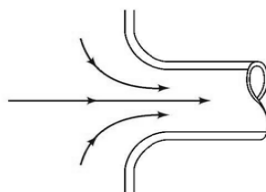
دهانه ورودی لوله در مخزن  $K = 0.8 - 1$



ورودی لبه تیز  $K = 0.5 - 0.4$



ورودی تا حدی گرد  $K = 0.25 - 0.2$



ورودی کاملاً گرد  $K = 0.05 - 0.1$

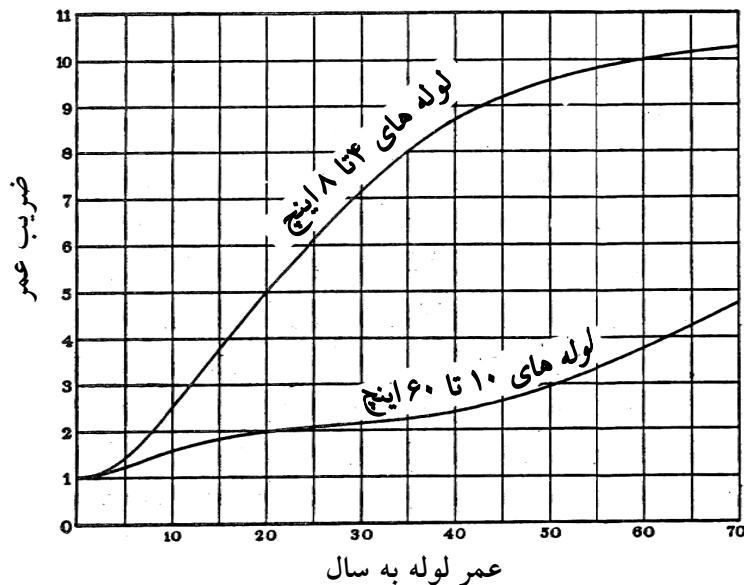
شکل ۵-۱ افت موضعی به هنگام ورود مایع از مخزن به لوله

#### ۴-۵ گذشت زمان و تأثیر آن در ضریب اصطکاک (f) لوله‌ها

ضریب اصطکاک در حالت کلی تابع عدد رینولدز و زبری سطح داخلی است ولی علاوه بر این مسائل، عامل زمان نیز در این ضریب موثر است.

ضریب اصطکاک بر اثر گذشت زمان افزایش می‌یابد که علت آن فرسودگی سطح داخلی لوله و رسوبات بر جداره‌های لوله و افزایش زبری آن است که این عوامل بستگی به نوع لوله و خواص سیال در حال جریان در لوله دارد.

معمولاً در طراحی خطوط لوله، بسته به مدت استفاده از لوله، ضریب اصطکاک را بیشتر در نظر می‌گیرند تا در سالهای آینده نیز استفاده از خطوط لوله براحتی ممکن باشد. در نمودار شکل (۲-۵) رابطه بین عمر لوله و ضریب عمر نشان داده شده است. از روی این منحنی ضریب عمر را تعیین کرده و با ضرب این ضریب در ضریب اصطکاک لوله، ضریب اصطکاک واقعی لوله به دست می‌آید.



شکل ۲-۵ تأثیر زمان در ضریب اصطکاک لوله‌ها

تأثیر گذشت زمان در مورد لوله‌های با قطر کم بسیار بیشتر از لوله‌های با قطر زیاد است چون زبری نسبی در مورد لوله‌های با قطر کمتر، اثر بسیار زیادی نشان

خواهد داد. در طراحی سیستم‌های لوله کشی با توجه به این که آن‌ها باید جوابگوی ۲۰ یا ۲۵ سال آینده باشند، لذا باید زبری‌های ۲۰ یا ۲۵ سال در محاسبات به کار گرفته شوند تا از کارکرد صحیح سیستم در آینده اطمینان حاصل نمود.

#### ۵-۴-۱ افت موضعی در انبساط ناگهانی<sup>۱</sup> مقاطع (واگرایی)

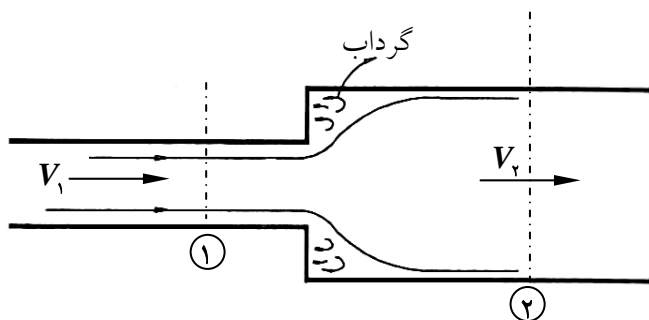
با توجه به شکل (۵-۳) سیال با سرعت  $V_1$ ، مقطع (۱) به قطر  $D_1$  را ترک کرده و با سرعت  $V_2$  وارد مقطعی با قطر  $D_2$  می‌گردد و به واسطه افزایش سطح مقطع وجدایش، افت فشاری ایجاد می‌شود که در این حالت افت انرژی موضعی، طبق رابطه تحلیلی زیر محاسبه می‌گردد:

$$h_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (5-5)$$

رابطه (۵-۵) را می‌توان به شکل رابطه کلی افت موضعی نیز در آورد:

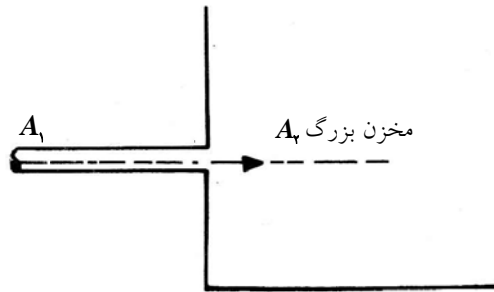
$$h_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \frac{\left(V_1 - \frac{A_1 V_1}{A_2}\right)^2}{2g} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]^2 \frac{V_1^2}{2g} = K_1 \frac{V_1^2}{2g}$$

$$h_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \frac{\left(\frac{A_2 V_2}{A_1} - V_2\right)^2}{2g} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} = \left[\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 - 1\right]^2 \frac{V_2^2}{2g} = K_2 \frac{V_2^2}{2g}$$



شکل ۵-۳ انبساط مقطع لوله

در حالتی که لوله‌ها همانند شکل (۴-۵) به مخزن بزرگی متصل شود، با توجه به این که مقطع لوله ( $A_1$ ) نسبت به مخزن ( $A_2$ ) بسیار کوچک است لذا می‌توان از نسبت صرف‌نظر کرد و در نتیجه افت انرژی به صورت  $h_e = \frac{V_1^2}{2g}$  در می‌آید. در این حالت انرژی جنبشی به‌طور کامل به انرژی حرارتی تبدیل شده و  $K = 1$  می‌باشد.

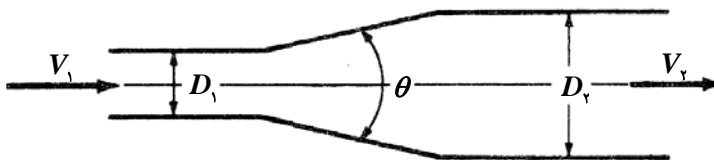


شکل ۴-۵ افت در محل ورود سیال به مخزن

#### ۴-۴-۵ افت موضعی در اثر انبساط تدریجی<sup>۱</sup> (انبساط مخروطی)

افت انرژی ناشی از انبساط تدریجی متناسب با فرم و زاویه رأس مخروط است. این افت شامل اثرات اصطکاک لوله در طول انبساط و تلاطم گردابی است و از فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$h_e = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (۴-۵)$$



شکل ۴-۵ ضریب افت در انبساط تدریجی (انبساط مخروطی)

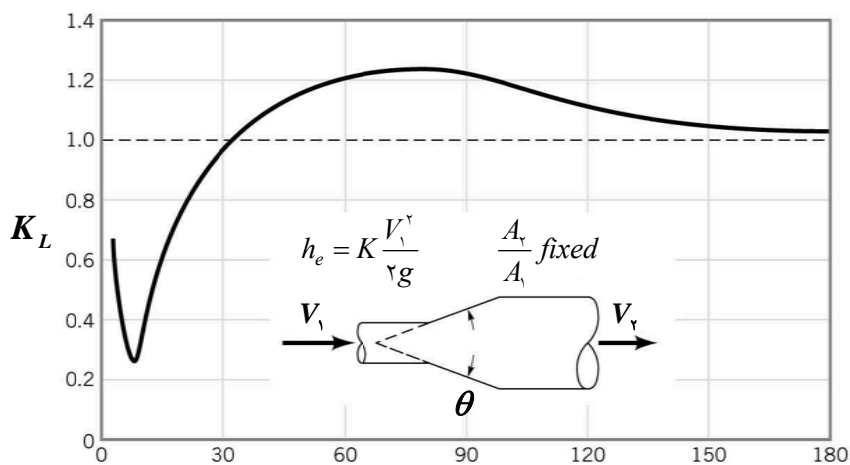
از این سیستم برای بازیافت و جبران فشار دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار استفاده می‌شود (نظیر واتنوری و شیپوره). عموماً در شرایط قطرهای ورودی و خروجی یکسان

مقدار افت هد ناشی در انبساط تدریجی کمتر از افت هد ناشی از انبساط ناگهانی می‌باشد.

$$\theta \leq 45^\circ \rightarrow K = \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4} \quad (7-5)$$

$$45^\circ < \theta < 180^\circ \rightarrow K = \frac{\left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4} \quad (8-5)$$

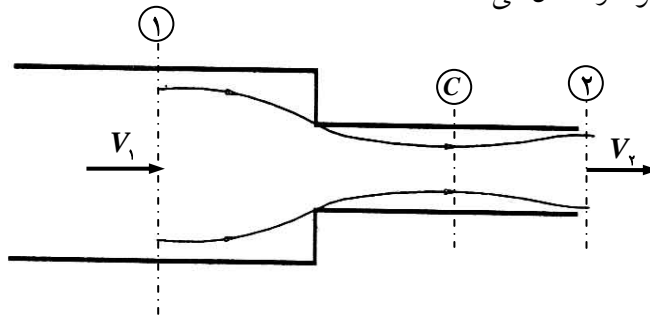
همان‌طور که در شکل (۵-۶) مشاهده می‌شود با افزایش  $\theta$  مقدار  $K$  افزایش می‌یابد که منجر به افزایش تلفات می‌شود.



شکل ۵-۶ ضریب افت در انبساط تدریجی (انبساط مخروطی)

## ۵-۴-۳ افت موضعی در اثر انقباض ناگهانی (همگرایی)

افت انرژی ناشی از انقباض ناگهانی با همان روشی که در انبساط ناگهانی تحلیل شد، بررسی می‌شود به شرطی که مقدار انقباض معلوم باشد. شکل (۷-۵) انقباض ناگهانی در مقطع لوله را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۵ انقباض ناگهانی در خط لوله

از مقطع (۱) تا (c) که در آن انقباض به حداکثر خود رسیده است، ارتفاع فشاری به ارتفاع نظیر سرعت تبدیل می‌شود و از مقطع (c) تا (۲)، مجدداً ارتفاع نظیر سرعت به ارتفاع فشاری تبدیل می‌گردد. از آنجاکه که فرایند تبدیل ارتفاع فشاری به ارتفاع نظیر سرعت راندمان بالایی دارد، تلفات از مقطع (۱) تا (c) در مقایسه با تلفات از مقطع (c) تا (۲) بسیار کوچک خواهد بود. بنابراین تلفات از مقطع (c) تا (۲) را به عنوان افت موضعی ایجاد شده در این حالت، در نظر می‌گیریم و با استفاده از رابطه انبساط ناگهانی مقطع، می‌نویسیم:

$$h_e = \frac{(V_c - V_2)^2}{2g} = \frac{\left(\frac{V_2 A_2}{A_c} - V_2\right)^2}{2g} = \left(\frac{A_2}{A_c} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (۹-۵)$$

نسبت مساحت جت در مقطع c (مقطع منقبض = Vena contracta) به مقطع ۲،

ضریب انقباض نامیده می‌شود که آنرا با  $C_c$  نمایش می‌دهند. با جایگذاری  $C_c = \frac{A_c}{A_2}$

در رابطه افت موضعی، خواهیم داشت:

$$h_e = \left(1 - \frac{1}{C_c}\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (۱۰-۵)$$



$$h_e = K \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{از طرفی داریم:}$$

بنابراین:

$$K = \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \quad (۱۱-۵)$$

که در این حالت  $K$  را ضریب همگرایی می‌گویند.

به‌عنوان نمونه ضریب انقباض  $C_c$  برای آب در جدول زیر ارائه شده است. در

$C_c = ۱$  که هیچگونه انقباضی رخ نمی‌دهد، افت برابر صفر است.

$A_2/A_1$	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱/۰
$C_c$	۰/۶۲۴	۰/۶۳۲	۰/۶۴۳	۰/۶۵۹	۰/۶۸۱	۰/۷۱۲	۰/۷۵۵	۰/۸۹۲	۰/۸۱۳	۱/۰

افت فشار در مدخل خط لوله از یک مخزن در صورتی که دهانه دارای لبه‌های

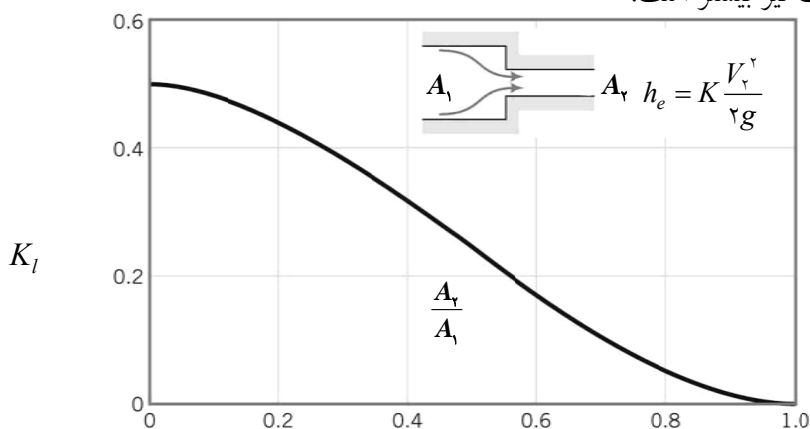
تیز باشد را معمولاً  $۰/۵ \frac{V_2^2}{2g}$  در نظر می‌گیرند. برای دهانه‌ای که گرد شده باشد (مدور)

افت حاصل بین  $۰/۱ \frac{V_2^2}{2g}$  و  $۰/۰۵ \frac{V_2^2}{2g}$  است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. برای

دهانه‌های تورفته مانند مواردی که لوله در درون مخزن ادامه یافته است، افت بین

$۰/۸ \frac{V_2^2}{2g}$  و  $۱ \frac{V_2^2}{2g}$  می‌باشد. با توجه به رابطه کلی افت  $(h_e = k \frac{V_2^2}{2g})$ ، هرچه  $K$  بزرگ‌تر

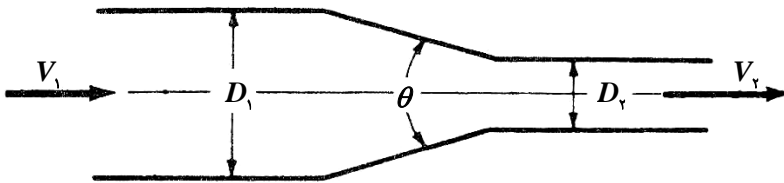
باشد، افت نیز بیشتر است.



شکل ۵-۸ ضریب افت موضعی در اثر انقباض ناگهانی (همگرایی)

#### ۴-۴-۵ افت موضعی در اثر انقباض تدریجی (انقباض مخروطی)

افت انرژی در اثر انقباض تدریجی بسیار کم است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در رابطه (۱۲-۵) و (۱۳-۵) فرمول‌های مربوطه برای تعیین  $K$  داده شده است.



شکل ۹-۵ ضریب افت موضعی در اثر انقباض تدریجی (انقباض مخروطی)

$$45^\circ < \theta < 180^\circ \rightarrow K = \frac{0.5 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2\right]}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4} \quad (12-5)$$

$$45^\circ < \theta < 180^\circ \rightarrow K = \frac{0.5 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2\right] \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4} \quad (13-5)$$

#### ۵-۵ افت به واسطه اتصالات<sup>۱</sup> (زانویی، شیر و...)

به واسطه انواع اتصالات اعم از انواع شیرها، زانویی، سه راهی و... افت‌هایی به وجود می‌آید. همان‌طور که مشاهده گردید افت طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_e = K \frac{V^2}{2g} \quad (14-5)$$

لازم به یادآوری است که  $K$  برای هر اتصال مقدار مشخص دارد و هر چه افت بیشتر باشد،  $K$  نیز بیشتر خواهد شد.

برای انواع اتصالات مقدار  $K$  در جدول (۱-۵) زیر آمده است:

جدول ۵-۱ ضریب افت (K) برای اتصالات مختلف

نوع اتصال	$K$ (ضریب افت)
زانویی $45^\circ$	۰/۲۵-۰/۴۵
زانویی $90^\circ$	۰/۵-۰/۷۵
شیر توپی (کاملاً باز)	۱۰/۰
شیر زاویه‌ای (کاملاً باز)	۵/۰
شیر یکطرفه (کاملاً باز)	۲/۵
شیر دروازه‌ای (کاملاً باز)	۰/۱۹
خم با بازگشت تند	۲/۲
سه راه استاندارد	۱/۸
زانویی استاندارد	۰/۹
زانو با شعاع متوسط	۰/۷۵
زانو با شعاع زیاد	۰/۶۰
ورود سیال از مخزن به لوله	۰/۵
ورود سیال از لوله به مخزن	۱/۰

## ۵-۶ طول معادل<sup>۱</sup>

در اکثر مواقع به منظور خلاصه کردن معادلات در حل مسائل سیستم‌های انتقال آب، افت‌های موضعی را با طولی از لوله اصلی که افتی معادل آن ایجاد می‌نماید، جایگزین می‌نمایند. این طول را طول معادل لوله  $L_e$  گویند.

$L_e$  طولی از لوله است که معادل افت فشار اتصال یا اتصالات را ایجاد می‌کند.

افت ناشی از طول  $L_e$  برابر  $h_f = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g}$  و افت ناشی از اتصال برابر  $h_e = K \frac{V^2}{2g}$

می‌باشد که با هم برابرند، لذا طول معادل  $L_e$  طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{KV^2}{2g} \Rightarrow L_{eq} = \frac{KD}{f} \quad (5-15)$$

که  $D$  قطر و  $f$  ضریب اصطکاک می باشد.

اگر مجموعه ای اتصالات در سیستم وجود داشته باشد،  $K$  برای مجموع  $K$  ها می باشد. مثلاً اگر در سیستم دو شیر تویی با  $K = 10$  و یک زانویی استاندارد با  $K = 0.9$  داشته باشیم  $K$  معادل آنها برابر  $(2 \times 10 + 0.9)$  می باشد.

معمولاً برای محاسبه کل افت بایستی موارد زیر را در نظر داشت:

افت اتصالات + افت خروجی + افت مقطع انقباض یافته + افت مقطع انبساط

یافته + افت اصطکاک لوله ها + افت ورودی = افت کل

به طور کلی دو لوله را با هم یا یک سیستم لوله کشی معادل گویند در صورتی که برای یک دبی معین افت هد یکسان باشد.

**مثال ۵-۱:** حجم هوای  $30 \frac{m^3}{min}$  در فشار  $1 atm$  و در دمای  $20^\circ C$  در یک

انبساط ناگهانی جریان دارد. قطر اولیه  $300 mm$  و قطر ثانویه  $900 mm$  است. تلفات را بر حسب ژول بر نیوتن به دست آورید؟

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{\left(\frac{30}{60}\right)}{\left(\frac{\pi \times 0.3^2}{4}\right)} = 7.1 \frac{m}{s}$$

$$h_l = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right] \frac{V_1^2}{2g} = \left[1 - \left(\frac{0.3}{0.9}\right)^2\right] \frac{7.1^2}{2 \times 9.81} = 2 \frac{j}{N}$$

**نکته (۱):** افت انرژی را در حالت کلی می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sum h_l = h_f + h_e = \left(f \frac{L}{D} + \sum K\right) \frac{V^2}{2g} \quad (15-6)$$

**نکته (۲):** اگر افت های موضعی یا مساوی ۵ درصد افت اصطکاکی باشند،

می توان از آنها چشم پوشی کرد. در حالت کلی اگر به طور متوسط، طول لوله موجود بین هر دو افت موضعی ۱۰۰۰ برابر قطر لوله باشد، می توان از تلفات موضعی صرف نظر کرد.

**مثال ۵-۲:** در شکل زیر، روغن با چگالی نسبی  $SG = 0.8$  و لزجت

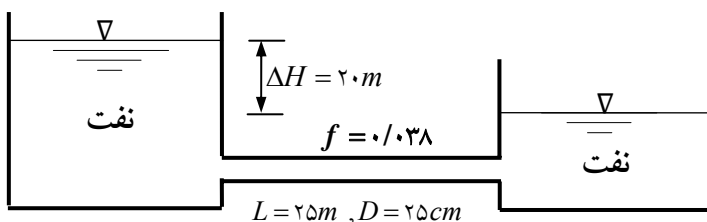
$\mu = 0.08 Pa.s$  در یک لوله چوبی جریان دارد. اگر لوله در محل خروج از مخزن

دارای لبه تخت ( $k=0.5$ ) باشد با در نظر گرفتن تلفات موضعی:

الف) دبی جریان را تعیین کنید؟

ب) اگر یک شیر فلکه در لوله نصب شود و طوری تنظیم گردد که دبی جریان نصف شود. ضریب افت موضعی آن چقدر است؟ (ضریب اصطکاک در این حالت ثابت می‌ماند).

ج) طول معادل لوله برای شیر فلکه نصب شده را به دست آورید؟



شکل ۵-۱۰

$$\Delta H = \sum h_l = h_f + h_e = \left( f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V^2}{2g}, \quad \sum K = K_{in} + K_{out} \quad \text{الف):}$$

$$20 = \left( 0.038 \times \frac{25}{0.25} + 0.5 + 1 \right) \frac{V^2}{2 \times 9.81} \rightarrow V = 8.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q = V.A = 8.6 \times \left( \frac{\pi \times 0.25^2}{4} \right) = 0.422 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 422 \frac{\text{lit}}{\text{s}} \quad \text{ب):}$$

$$\sum h_l = h_f + h_e = \left( f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V^2}{2g}, \quad \sum K = K_{in} + K_{out} + K_V$$

$$20 = \left( 0.038 \times \frac{25}{0.25} + 0.5 + 1 + K_V \right) \frac{4/3^2}{2 \times 9.81} \rightarrow K_V = 15.92$$

$$L_e = \frac{K.D}{f} = \frac{K_V.D}{f} = \frac{15.92 \times 0.25}{0.038} = 104.7 \text{ m} \quad \text{ج):}$$

## ۵-۷ مسائل مربوط به جریان در لوله‌ها

افت انرژی را در دو حالت کلی، شبکه‌های تک مسیری و چند مسیری بررسی می‌کنیم.

## ۵-۷-۱ افت انرژی در خطوط لوله (مسائل ساده جریان در لوله‌ها)

منظور ما «از مسائل ساده» مسائلی است که در آنها فقط تلفات ناشی از اصطکاک لوله وجود دارد.

برای سیال تراکم‌ناپذیر شش متغیر در مسئله مطرح می‌شود؛  $Q$ ،  $L$ ،  $h_f$ ،  $v$  و  $\mathcal{E}$ . در کارهای عملی عموماً طول لوله ( $L$ )، لزجت سینماتیک، ( $\nu$ ) و زبری مطلق، ( $\mathcal{E}$ ) معلومند. در این صورت مسائل ساده را می‌توان به سه نوع زیر تقسیم‌بندی کرد:

نوع مسأله	معلومات	مجهول
(۱)	$\mathcal{E}$ و $v$ و $D$ و $L$ و $Q$	$h_f$
(۲)	$\mathcal{E}$ و $v$ و $D$ و $L$ و $h_f$	$Q$
(۳)	$\mathcal{E}$ و $v$ و $L$ و $Q$ و $h_f$	$D$

در هر صورت برای حل مسأله از معادله دارسی ویسباخ، معادله پیوستگی و دیاگرام مودی استفاده می‌شود.

نکته: برای تعیین  $f$  می‌توان به جای دیاگرام مودی از فرمول صریح زیر در محدوده‌ای که برای کاربرد آن قید شده است، استفاده کرد. [۱]

$$10^{-6} < \frac{\mathcal{E}}{D} < 10^{-5}$$

$$f = \frac{1/325}{\left[ \ln \left( \frac{\mathcal{E}}{3/75 D} + \frac{5/74}{R^{1/4}} \right) \right]^2} \quad 5000 \leq R \leq 10^8 \quad (5-16)$$

مقدار  $f$  حاصل از فرمول فوق بامقدار حاصل از فرمول کلبروک حدود ۱ درصد اختلاف دارد. تعیین  $f$  از این فرمول با ماشین حساب آسان است. [۱]

روش حل مسائل نوع اول (مجهول  $h_f$ )

در این نوع مسائل با معلوم بودن دبی  $Q$ ؛ قطر  $D$  و زبری  $\mathcal{E}$  و می‌توان عدد رینولدز یعنی  $R = \frac{VD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu}$  و زبری نسبی یعنی  $\frac{\mathcal{E}}{D}$  را محاسبه کرده، سپس  $f$  را از دیاگرام

مودی یا فرمول محاسبه کرده و با جاگذاری  $f$  در معادله داریسی - ویسباخ،  $h_f$  به دست می‌آید.[]

مثال ۵-۳:  $\frac{L}{s}$  ۱۴۰ روغن با لزجت سینماتیک  $\frac{m^2}{s} = 0.00001$  در یک لوله چدنی به قطر 200mm و طول 400mm جریان دارد. افت ارتفاع را به دست آورید؟  
حل: ابتدا عدد رینولدز را محاسبه می‌کنیم:

$$R = \frac{4Q}{\pi D v} = \frac{4 \left( 0.14 \frac{m^3}{s} \right)}{\pi (0.2m) \left( 0.00001 \frac{m^2}{s} \right)} = 89/127$$

زبری نسبی لوله  $\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.25 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0.00125$  است. با میان یابی در دیاگرام مودی

داریم:  $f = 0.023$  اگر از فرمول (۵-۱۶) استفاده کنیم، خواهیم داشت:  $f = 0.0234$ . با جاگذاری مقادیر در معادله داریسی - ویسباخ به دست می‌آوریم:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.023 \frac{400}{0.2m} \frac{m}{s^2} \left[ \frac{0.14}{\left( \frac{\pi}{4} \right) (0.2m)^2} \right]^2 \frac{1}{2 \left( 9.806 \frac{m}{s^2} \right)} = 46/58 \frac{m.N}{N}$$

### روش حل مسائل نوع دوم (مجهول $Q$ )

در این نوع مسأله  $f$  و  $V$  مجهولند و برای تعیین آنها باید همزمان با حل معادله داریسی - ویسباخ از دیاگرام مودی استفاده کنیم. چون  $\frac{\varepsilon}{D}$  معلوم است، می‌توانیم از روی دیاگرام مودی مقداری برای  $f$  فرض کنیم. با قرار دادن این مقدار فرضی در معادله داریسی - ویسباخ مقداری برای  $V$  به دست می‌آوریم و با آن عدد رینولدز را محاسبه می‌کنیم. سپس با داشتن عدد رینولدز از روی دیاگرام مودی مقدار جدیدی برای  $f$  به دست می‌آوریم که نسبت به مقدار فرضی قبلی به جواب صحیح نزدیکتر است. این روند را تکرار می‌کنیم تا  $f$  با دو رقم با معنی معلوم شود. در آن هنگام مقدار  $V$ ، مقداری است که در جستجوی آن بوده‌ایم. با ضرب  $V$  در سطح مقطع،  $Q$  به دست خواهد آمد.[]

سوامی (Swamee) و جین (Jain) با استفاده از فرمول کلبروک و معادله داریسی -

ویسباخ معادله صریح برای تعیین دبی ارائه کردند که به اندازه فرمول کلبروک دقیق است و برای همان محدوده مقادیر  $\frac{\varepsilon}{D}$  و  $Re$  معتبر است.

$$Q = -0.965 D^2 \sqrt{\frac{g D h_f}{L}} \ln \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{1.48 v}{D \sqrt{g D h_f / L}} \right) \quad (17-5)$$

**مثال ۴-۵:** آب  $15^\circ C$  در لوله‌ای به قطر 300mm جریان دارد. لوله از ورقهای فولادی و با پرچ ساخته شده است و زبری مطلق آن  $\varepsilon = 3mm$  می‌باشد. افت فشار در 300m از طول لوله برابر با 6m است. دبی جریان را به دست آورید؟

**حل:** زبری نسبی لوله  $\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.003}{0.3} = 0.01$  است. با توجه به دیاگرام مودی مقدار  $f$  را برابر 0.04 فرض می‌کنیم و آن را در معادله داریسی - ویسباخ قرار می‌دهیم:

$$6m = 0.04 \frac{300 \left( \sqrt{\frac{m}{s}} \right)^2}{0.3m \times 2 \times \left( 9.806 \frac{m}{s^2} \right)}$$

از حل معادله فوق به دست می‌آوریم:  $V = 1.715 \frac{m}{s}$ . لزجت سینماتیک را از پیوست برابر  $1.13 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$  قرائت می‌کنیم. بنابراین:

$$R = \frac{VD}{v} = \frac{\left( 1.715 \frac{m}{s} \right) (0.3m)}{1.13 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 455$$

با مقادیر فوق از دیاگرام مودی ضریب اصطکاک را برابر  $f = 0.038$  قرائت می‌کنیم. تکرار محاسبات مجدداً به همین نتیجه می‌انجامد. لذا داریم:

$$Q = AV = \pi (0.15m)^2 \sqrt{\frac{(6m)(0.3m)(2) \left( 9.806 \frac{m}{s^2} \right)}{0.38(300m)}} = 0.1245 \frac{m^3}{s}$$

### روش حل مسائل نوع سوم (مجهول $D$ )

در این نوع مسأله که مجهول آن قطر است، در معادله داریسی - ویسباخ سه مجهول  $f$  و



$V$  و  $D$ ؛ در معادله پیوستگی دو مجهول  $D$  و  $V$  و در تعریف عدد رینولدز سه مجهول  $V$  و  $D$  وجود دارد. زبری نسبی نیز مجهول است. اگر با استفاده از معادله پیوستگی سرعت را در معادله دارسی - ویسباخ و در تعریف عدد رینولدز بر حسب قطر و دبی بیان کنیم، حل مسأله ساده تر می‌شود. معادله دارسی - ویسباخ به صورت زیر درمی‌آید:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{Q^2}{\pi^2 g \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)^3} \Rightarrow D^5 = \frac{8 L Q^2}{h_f g \pi^2} f = C_1 f \quad (18-5)$$

که در آن  $C_1$  برابر  $\frac{8 L Q^2}{h_f g \pi^2}$  و معلوم است. طبق معادله پیوستگی  $VD^2 = \frac{4Q}{\pi}$  است، پس عدد رینولدز را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R = \frac{VD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi \nu} \frac{1}{D} = \frac{C_2}{D} \quad (19-5)$$

که در آن  $C_2$  برابر  $\frac{4Q}{\pi \nu}$  و معلوم است. برای حل مسأله مطابق روال زیر عمل می‌کنیم:

۱. مقداری برای  $f$  فرض می‌کنیم.
۲.  $D$  را از معادله (۱۸-۵) می‌آوریم.
۳.  $R$  را از معادله (۱۹-۵) به دست می‌آوریم.
۴. زبری نسبی یعنی  $\frac{\varepsilon}{D}$  را محاسبه می‌کنیم.
۵. با داشتن  $R$  و  $\frac{\varepsilon}{D}$ ، مقدار  $f$  را از دیاگرام مودی قرائت می‌کنیم.
۶. با استفاده از  $f$  جدید مراحل فوق را تکرار می‌کنیم.
۷. هنگامی که مقدار  $f$  در دو محاسبه متوالی تا دو رقم با معنی تغییر نکرد، مسأله حل شده است.

معمولاً فقط یک یا دو بار تکرار کافی است. از آنجا که معمولاً از لوله‌های استاندارد استفاده می‌شود، قطر لوله را یک سایز بزرگتر از آنچه محاسبه به دست می‌دهد، می‌گیرند.

**مثال ۵-۵:** قرار است برای انتقال  $250 \text{ L/s}$  روغن به مسافت 3000m از لوله آهنی تمیز استفاده شود. به ازای افت ارتفاع  $25 \text{ m.N/N}$ ، قطر لوله لازم را تعیین کنید.

لزجت سینماتیک روغن  $m^2/s \times 10^{-5}$  است.

حل: از معادله (۵-۱۸) داریم:

$$D^5 = \frac{8(3000)(0/25)}{25(9/806)(\pi^2)} = 0/62f$$

و از معادله (۵-۱۹) داریم:

$$R = \frac{4(0/25)}{\pi(10^{-5})} \frac{1}{D} = \frac{31/830}{D}$$

و از نمودار مودی داریم:  $\varepsilon = 0/046 mm$

اگر فرض کنیم که  $f = 0/02$  باشد، آنگاه خواهیم داشت  $D = 0/416 m$ ،

$R = 76/5$ ،  $\frac{\varepsilon}{D} = 0/00011$  و از دیاگرام مودی داریم  $f = 0/0195$  با تکرار مراحل

فوق به دست می آوریم:  $D = 0/413 m$ ،  $R = 75/7$  و  $f = 0/196$ . بنابراین  $D = 413 mm$  می باشد.

سوامی و جین با استفاده از روابط بی بعد و به روشی مشابه به روش تعیین

فرمول کلبروک، فرمول تجربی زیر را برای تعیین مستقیم قطر ارائه کرده اند [۱۵]:

$$D = 0/66 \left[ \varepsilon^{1/25} \left( \frac{LQ^2}{gh_f} \right)^{4/75} + \nu Q^{9/4} \left( \frac{L}{gh_f} \right)^{5/2} \right]^{1/4} \quad (5-20)$$

معادله (۶-۲۳) در محدوده زیر معتبر است:

$$3 \times 10^2 \leq R \leq 3 \times 10^4 \quad 10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 2 \times 10^{-2}$$

و قطر حاصل از آن با جواب حاصل از فرمول کلبروک حدود ۲ درصد اختلاف دارد.

## ۵-۸ سیستم های لوله کشی

در سیستم های لوله کشی که کاربرد زیادی در شبکه های آبرسانی، گازرسانی و غیره دارند، لوله ها ممکن است به شکل سری، موازی، انشعابی یا شبکه ای به هم متصل شوند.

### ۵-۸-۱ لوله های سری (متوالی)

در صورتی که سیال به طور پیوسته در یک خط لوله یا چند لوله با طول، قطر و

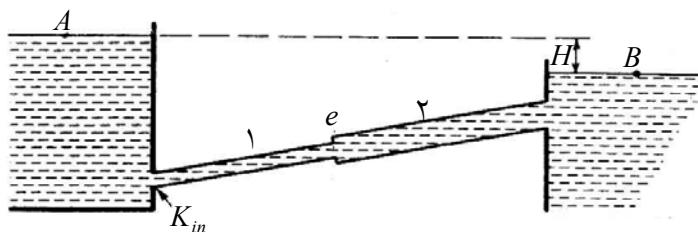
اتصالات مختلف به هم متصل باشند، این خط لوله را خط لوله به صورت سری (متوالی) می‌گویند. در شکل (۵-۱۱) دو لوله سری نشان داده شده است.

در حالت سری:

۱. دبی در تمام قسمت‌های لوله یکسان است.

۲. افت هد کل بین دو نقطه ابتدا و انتهای خط لوله برابر مجموع افت بخش‌های مختلف لوله و اتصالات خواهد بود. به عبارت دیگر:

$$h_{\text{کل}} = h_1 + h_f + \dots + \sum h_i = h_{in} + h_{f1} + h_e + h_{f2} + h_{out} \quad (5-21)$$



شکل ۵-۱۱ لوله‌های سری

دو نوع مسئله مطرح می‌شود. ممکن است  $Q$  معلوم و  $H$  مجهول باشد و یا اینکه  $H$  معلوم و  $Q$  مجهول باشد. معادله انرژی را بین  $A$  و  $B$  می‌نویسیم:

$$H + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + K_{in} \frac{V_1^2}{2g} + f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} + f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

اندیس‌های ۱ و ۲ مربوط به لوله‌ها هستند. آخرین جمله معادله فوق، افت ارتفاع در خروجی لوله ۲ است. معادله پیوستگی را به صورت  $V_1 D_1^2 = V_2 D_2^2$  نوشته، با استفاده از آن  $V_2$  را حذف می‌کنیم. در این صورت داریم:

$$H = \frac{V_1^2}{2g} \left\{ K + \frac{f_1 L_1}{D_1} + \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^5 \right] + \frac{f_2 L_2}{D_2} \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^5 + \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^5 \right\}$$

وقتی قطر و طول لوله‌ها معلوم باشد، این معادله به صورت زیر قابل بیان است:

$$H = \frac{V_1^2}{2g} (C_1 + C_2 f_1 + C_3 f_2) \quad (5-22)$$

در آن  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  مقادیری معلومند. در مسئله نوع اول که دبی معلوم است، ابتدا عدد رینولدز جریان در دو لوله را حساب می‌کنیم، سپس  $f$ ها را از دیاگرام مودی قرائت می‌کنیم. آنگاه با جاگذاری مقادیر در معادله (۵-۲۵) مستقیماً  $H$  را به دست می‌آوریم. در مسئله نوع دوم که دبی مجهول است، در معادله (۵-۲۵) سه مجهول وجود دارد؛  $V_1$ ،  $f_1$  و  $f_2$ . ابتدا مقادیری برای  $f_1$  و  $f_2$  فرض می‌کنیم (می‌توان آنها را برابر گرفت). با جاگذاری  $f$ های فرضی در معادله،  $V_1$  را به دست می‌آوریم. سپس از روی سرعت‌ها، اعداد رینولدز را تعیین می‌کنیم. آنگاه  $f_1$  و  $f_2$  را از دیاگرام مودی قرائت می‌کنیم. با جاگذاری  $f$ های جدید در معادله (۵-۲۵) مقدار بهتری برای  $V_1$  به دست می‌آوریم. سپس مراحل فوق را مجدداً تکرار می‌کنیم. از آنجا که تغییرات  $f$  با تغییر عدد رینولدز بسیار کم است. حل معادله به روش آزمون و خطا به سرعت همگرا می‌شود. این روش برای حالتی که تعداد لوله‌ها بیش از دو عدد باشد نیز به کار می‌رود.

### ۵-۷-۳ لوله‌های معادل

اگر عبور دبی یکسان از لوله‌ها باعث ایجاد افت ارتفاع یکسان شود مسائل لوله‌های سری را با استفاده از روش لوله‌های معادل نیز می‌توان حل کرد. دو لوله ۱ و ۲ را در نظر بگیرید. برای اینکه این دو لوله معادل باشند، باید داشته باشیم:

$$h_{f_1} = h_{f_2} \quad , \quad Q_1 = Q_2$$

طبق معادله دارسی - ویسباخ برای لوله ۱ داریم:

$$h_{f_1} = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{Q_1^2}{\left(\frac{\pi D_1^2}{4}\right)^2 g} = \frac{f_1 L_1}{D_1^5} \frac{Q_1^2}{\pi^2 g}$$

$$h_{f_2} = \frac{f_2 L_2}{D_2^5} \frac{Q_2^2}{\pi^2 g}$$

و به همین ترتیب برای لوله ۲ داریم:

$h_{f_1}$  را با  $h_{f_2}$  برابر قرار داده، نتیجه را ساده می‌کنیم و به دست می‌آوریم:

$$\frac{f_1 L_1}{D_1^5} = \frac{f_2 L_2}{D_2^5}$$

از اینجا  $L_2$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$L_2 = L_1 \frac{f_1}{f_2} \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^5 \quad (23-5)$$

$L_2$  طولی از لوله ۲ است که معادل لوله ۱ می‌باشد. برای مثال فرض کنید بخواهیم 300m لوله به قطر 250m را با لوله‌ای به قطر 150m جایگزین کنیم. ابتدا مقداری برای دبی انتخاب کرده،  $f_1$  و  $f_2$  را تخمین می‌زنیم. فرض می‌کنیم  $f_1 = 0.020$  و  $f_2 = 0.018$  باشد. در این صورت داریم:

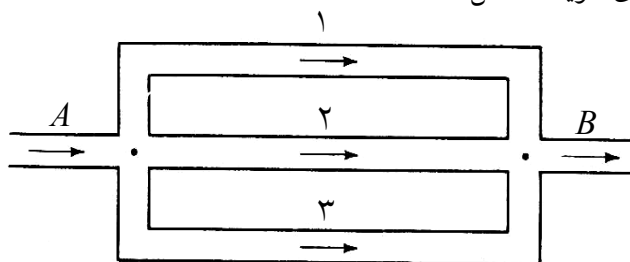
$$L_2 = 300 \cdot \frac{0.020}{0.018} \left( \frac{150}{250} \right)^5 = 25.9m$$

لذا برای این شرایط فرضی، 25.9m لوله به قطر 150m معادل 300m لوله به قطر 250m است.

هنگامی که دو یا چند لوله داشته باشیم نیز می‌توان به جای آنها یک لوله در نظر گرفت که به ازای همان دبی، همان افت ارتفاع را ایجاد کند.

### ۵-۷-۴ لوله‌های موازی

در صورتی که در خط لوله، یک خط لوله جریان به دو یا چند خط لوله جداگانه منشعب شود و مجدداً به یکدیگر متصل شوند این خطوط لوله را خطوط لوله به صورت موازی گویند (شکل ۵-۱۲).



شکل ۵-۱۲ لوله‌های موازی

در حالت موازی:

۱. دبی کل ( $Q$ ) به دبی‌های  $Q_1$  و  $Q_2$  و ... تقسیم می‌شود.
۲. افت ارتفاع برای تمام لوله‌ها یکسان است. به عبارت دیگر:

$$Q_{\text{کل}} = Q_1 + Q_2 + \dots = \sum Q_i \quad (24-5)$$

$$h_{\text{کل}} = h_1 = h_2 = \dots = h_i \quad (25-5)$$

در شکل (۵-۱۲) لوله‌های ۱ و ۲ و ۳ به‌طور موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. فرض کنید تلفات موضعی را برحسب طول معادل بیان کرده به طول واقعی لوله‌ها افزوده باشیم. در این صورت داریم:

$$= h_{f_1} = h_{f_2} = h_{f_3} = \frac{P_A}{\gamma} + z_A - \left( \frac{P_B}{\gamma} + z_B \right) \quad (26-5)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \text{و}$$

$z_A$  و  $z_B$  ارتفاع هندسی نقاط  $A$  و  $B$  است و  $Q$  دبی جریان در لوله ورودی یا خروجی می‌باشد.

دو نوع مسأله مطرح می‌شود:

۱. ارتفاع خط تراز هیدرولیک در نقاط  $A$  و  $B$  معلوم و  $Q$  مجهول است.
  ۲.  $Q$  معلوم، دبی هر لوله و افت ارتفاع معادل انرژی مجهول است. قطر و طول و زبری لوله‌ها و خواص سیال معلومند.
- مسأله نوع اول در واقع مسأله ساده تعیین دبی است. با معلوم بودن افت خط تراز هیدرولیک یعنی افت ارتفاع، دبی هر لوله به راحتی تعیین می‌شود و از جمع آنها دبی کل به دست می‌آید. مسأله نوع دوم مشکل تر است زیرا برای هر لوله نه دبی معلوم است و نه افت ارتفاع معادل انرژی.

پیشنهاد می‌شود که برای حل این نوع مسائل طبق روال زیر عمل کنید:

۱. مقداری برای دبی لوله ۱ فرض کنید. این دبی فرضی را به  $Q'_1$  نشان دهید.
۲. با استفاده از دبی فرضی فوق،  $h_{f_1}$  را به دست آورید.
۳. با استفاده از  $h_{f_1}$  دبی سایر لوله‌ها را تعیین کنید. این دبی‌ها را با  $Q'_2$  و  $Q'_3$  نشان دهید.

۴. دبی‌های  $Q'_1$  و  $Q'_2$  و  $Q'_3$  بر اساس افت ارتفاع معادل انرژی یکسان  $h_{f_1}$  به دست آمده است. حال فرض کنید که دبی  $Q$  به نسبت  $Q'_1$  و  $Q'_2$  و  $Q'_3$  در بین لوله‌ها تقسیم شود. یعنی

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\sum Q'} Q \quad Q_2 = \frac{Q'_2}{\sum Q'} Q \quad Q_3 = \frac{Q'_3}{\sum Q'} Q \quad (27-5)$$

۵. به ازای دبی‌های  $Q_1$ ،  $Q_2$  و  $Q_3$ ، افت ارتفاع در لوله‌ها یعنی  $h_{f_1}$ ،  $h_{f_2}$  و  $h_{f_3}$  را محاسبه کنید. برابری این مقادیر نشان از درستی جواب‌ها دارد.

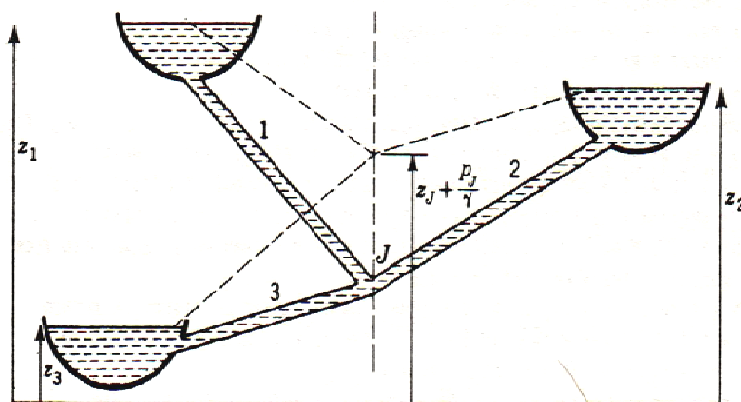
نکته: نسبت دبی‌ها در دولوله موازی (او ۲ از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{f_2}{f_1} \times \frac{L_2}{L_1} \times \frac{d_1^5}{d_2^5}} \quad (28-5)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^{5/2} \quad \text{اگر } f_1 = f_2 \text{ و } L_1 = L_2 \text{ باشد:}$$

### ۵-۷-۵ مخازن مرتبط

در شکل (۵-۱۳) سه مخزن نشان داده شده است که توسط سه لوله به یک اتصال مشترک مرتبط شده‌اند. ارتفاع هندسی سطح مخازن معلوم و دبی جریان در لوله‌ها مجهول است. قطر و طول لوله‌ها و خواص سیال معلومند. معادله داری - ویسباخ باید برای هر یک از لوله‌ها برقرار باشد.



شکل ۵-۱۳ مخازن مرتبط

معادله پیوستگی باید برای کل سیستم برقرار باشد، یعنی دبی ورودی به اتصال  $J$

باید با دبی خروجی از آن برابر باشد. مایع از بالاترین مخزن خارج می‌شود و به پایین‌ترین مخزن وارد می‌شود. بنابراین معادله پیوستگی می‌تواند به یکی از صورت‌های زیر بیان شود:

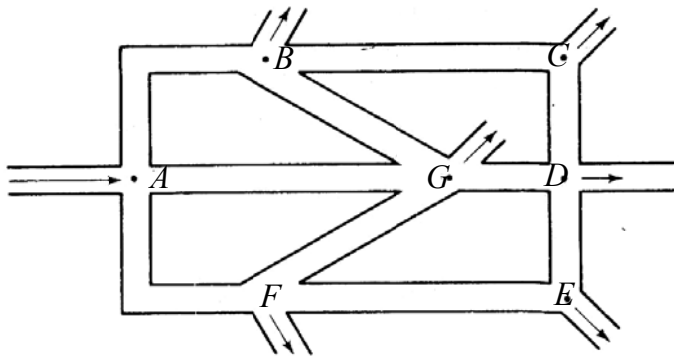
$$Q_1 = Q_r + Q_2 \quad \text{یا} \quad Q_1 + Q_r = Q_2$$

اگر ارتفاع خط تراز هیدرولیک در محل اتصال لوله‌ها،  $J$ ، از سطح مایع در مخزن میانی بالاتر باشد، مایع به آن مخزن وارد می‌شود. اگر پایین‌تر باشد، از آن خارج می‌شود. تلفات موضعی را می‌توان به صورت طول معادل بیان کرد و به طول واقعی لوله‌ها افزود.

برای حل مسأله ابتدا مقداری برای ارتفاع خط تراز هیدرولیک در  $J$  فرض می‌کنیم و دبی‌های  $Q_1$ ،  $Q_2$  و  $Q_r$  را محاسبه کرده، در معادله پیوستگی قرار می‌دهیم. اگر دبی ورودی  $J$  از دبی خروجی آن بیشتر باشد، باید ارتفاع خط تراز هیدرولیک را بیشتر بگیریم تا دبی ورودی کاهش و دبی خروجی افزایش یابد. و برعکس.

### ۵-۶-۷ شبکه‌های لوله کشی

از اتصال تعدادی لوله با نقاط ورودی و خروجی زیاد شبکه‌ای لوله بوجود می‌آید که در واقع مجموعه‌ای از لوله‌های موازی و سری است. برای بررسی این شبکه‌ها از روش هاردی کراس استفاده می‌کنیم. در هر شبکه بایستی شرایط زیر برقرار باشد:



شکل ۵-۱۴ شبکه لوله



برای هر لوله جداگانه در شبکه، دبی  $Q_i$  را فرض می‌کنیم که بایستی این فرض به گونه‌ای باشد که رابطه پیوستگی جریان برای لوله‌های موازی برقرار باشد. به عبارت دیگر کل جریان ورودی به هر اتصال باید برابر با کل جریان خروجی از آن باشد و با استفاده از این شرایط، افت بار هیدرولیکی در هر لوله محاسبه می‌شود.

جمع جبری افت هد در هر حلقه بسته از شبکه لوله برابر صفر است. جریانی که در حلقه در جهت عقربه‌های ساعت است مثبت فرض کرده همچنین افت بار هیدرولیکی جریان نیز مثبت است و جریانی که در خلاف جهت عقربه‌های ساعت است منفی فرض کرده و افت بار هیدرولیکی آن نیز منفی خواهد بود.

برای حل مسائل به روش هاردی کراس ابتدا مقدار دبی برای هر لوله تخمین زده می‌شود به گونه‌ای که رابطه پیوستگی جریان برای تمام شبکه و در هر نقطه اتصال برقرار باشد. سپس مقدار تصحیح دبی در هر حلقه بسته محاسبه می‌گردد و براساس این مقدار، دبی جدیدی تخمین زده می‌شود. این کار به وسیله سعی و خطا و تکرار آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا دبی موردنظر با دقت مناسب به دست آید و  $\Delta Q$  مقدار صفر و یا بسیار ناچیز گردد به عبارت دیگر:

$$Q = Q_o + \Delta Q$$

$$\Delta Q = - \frac{\sum h_f}{n \sum \left( \frac{h_f}{Q} \right)} \quad (29-5)$$

$\Delta Q$ : تصحیح دبی جریان برای هر حلقه

$\sum h_f$ : جمع جبری افت هد برای تمام لوله‌های حلقه

$\sum \left( \frac{h_f}{Q} \right)$ : مجموع افت هد تقسیم بر دبی جریان برای هر لوله در هر حلقه

## ۵-۸ افت ناشی از اصطکاک برای کانال‌ها و مقاطع غیرمردور

با اینکه لوله‌های به کار رفته در کارهای مهندسی عمدتاً سطح مقطع گرد دارند، ولی مواردی پیش می‌آید که محاسبات افت ارتفاع را باید برای مجراهای مستطیلی و سایر مجراهای غیر گرد انجام داد. در این بحث پارامتر جدیدی به نام شعاع هیدرولیکی ( $R$ ) به جای قطر ( $D$ ) به کار می‌رود.

شعاع هیدرولیکی (R) عبارت است از: نسبت مساحت سطح مقطع به محیط مرطوب.

به عبارت دیگر:

$$R = \frac{A}{P} \quad (۳۰-۵)$$

که برای یک مقطع دایره‌ای داریم:

$$R = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{D}{4} \Rightarrow D = 4R$$

و با جایگزینی این مقدار در معادله داریسی - وایسباخ داریم:

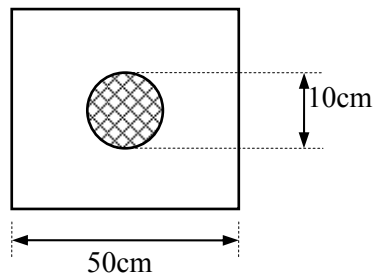
$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad , \quad D = 4R \Rightarrow h_f = f \frac{L}{4R} \frac{V^2}{2g}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \Rightarrow Re = \frac{V (4R) \rho}{\mu} \quad (۳۱-۴)$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\varepsilon}{4R} \quad (۳۲-۴)$$

مثال ۵-۶: مطابق شکل (۵-۱۵) آب از فضای بین دایره و مربع عبور می‌نماید.

قطر معادل مجرا چند متر است؟



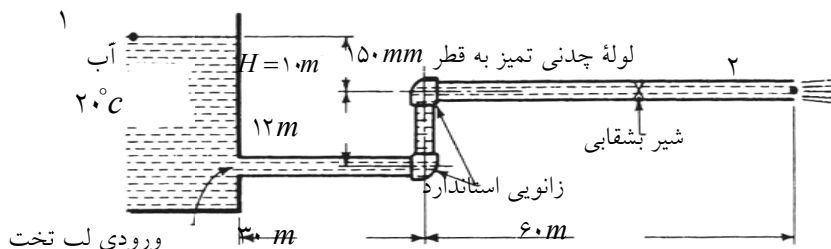
شکل ۵-۱۵

رابطه قطر هیدرولیکی با شعاع هیدرولیکی به صورت زیر است:

$$D = 4 \frac{A}{P} \rightarrow D = 4 \frac{0.5^2 - \frac{\pi \times 0.1^2}{4}}{4 \times 0.5 + \pi \times 0.1} = 0.4186 \text{ m}$$

مثال ۵-۷: در شکل زیر اگر  $H=10\text{m}$  باشد، دبی چقدر است؟ اگر دبی  $60\text{L/s}$

باشد،  $H$  چقدر است؟



شکل ۵-۱۶ خط لوله با تلفات موضعی

حل: روش اول:

معادله انرژی را بین نقاط ۱ و ۲ می‌نویسیم. تمام تلفات را منظور می‌کنیم:

$$H_1 + 0 + 0 = \frac{V_2^2}{2g} + 0 + 0 + \frac{1}{2} \frac{V_2^2}{2g} + f \frac{10.2 \text{ m}}{0.15 \text{ m}} \frac{V_2^2}{2g} + 2 \left( \frac{0.9}{9} \right) \frac{V_2^2}{2g} + 1.0 \frac{V_2^2}{2g}$$

ضریب افت موضعی را برای ورودی  $\frac{1}{2}$ ، برای زانویی  $\frac{0.9}{9}$  و برای شیر بشقابی

۱۰ گرفته‌ایم. پس از ساده کردن معادله فوق به دست می‌آوریم:

$$H_1 = \frac{V_2^2}{2g} (13/3 + 68.0 f)$$

داریم:

$$10 = \frac{V_2^2}{2g} [13/3 + 68.0 (0.022)]$$

و از حل آن به دست می‌آوریم:  $V_2 = 2/63 \text{ m/s}$ . از پیوست لزجت سینماتیک را

برابر  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  قرائت می‌کنیم. حال زبری نسبی و عدد رینولدز را محاسبه

می‌نماییم:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.0017 \quad R = \frac{(2/63 \text{ m/s})(0.15 \text{ m})}{1/0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 391$$

با توجه به مقادیر فوق ضریب اصطکاک را از دیاگرام مودی برابر 0/023 قرائت می‌کنیم. با تکرار مراحل فوق به دست می‌آوریم:

$$f = 0.023, R = 380, V_r = 2/60 \text{ m/s}$$

دبی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$Q = V_r A_r = (2/60 \text{ m/s}) \frac{\pi (0.15 \text{ m})^2}{4} = 45/9 \text{ L/s}$$

حل: قسمت دوم مساله با معلوم بودن دبی داریم:

$$V_r = \frac{Q}{A} = \frac{0.06 \text{ m}^3/\text{s}}{(\pi/4)(0.15 \text{ m})^2} = 3/40 \text{ m/s}, R = 505, f = 0.023$$

$$H_f = \frac{(3/40 \text{ m/s})^2}{2(9/86 \text{ m/s}^2)} [13/3 + 680(0.023)] = 17/06 \text{ m}$$

روش دوم: استفاده از روش طول معادل

ابتدا مقدار  $f$  را برابر 0/022 تخمین می‌زنیم. مجموع ضرایب افت موضعی  $K = 13/3$  است (انرژی جنبشی در مقطع ۲ نیز به عنوان یک افت موضعی در نظر گرفته شده است). بنابراین طبق معادله  $L_e = \frac{KD}{f}$  داریم:

$$L_e = \frac{13/3(0.15)}{0.022} = 90/07 \text{ m}$$

لذا طول کل برابر است با  $192/7 \text{ m} = 90/07 + 102$ . قسمت اول مساله به صورت

زیر حل می‌شود:

$$10 \text{ m} = f \frac{L + L_e}{D} \frac{V_r^2}{2g} = f \frac{192/7 \text{ m} (V_r \text{ m/s})^2}{0.15 \text{ m} \cdot 2g \text{ m/s}^2}$$

اگر  $f$  را برابر 0/022 بگیریم، داریم  $V_r = 2/63 \text{ m/s}$  و  $R = 391$ . بنابراین  $f = 0.023$  است و داریم  $V_r = 2/58 \text{ m/s}$ ,  $Q = 45/9 \text{ L/s}$  معمولاً لزومی ندارد که با استفاده از  $f$  جدید،  $L_e$  را تغییر دهیم.

اگر تلفات موضعی ۵ درصد افت ارتفاع ناشی از اصطکاک لوله یا کمتر باشند، می‌توان از آنها چشم‌پوشی کرد. به طور کلی اگر به طور متوسط طول لوله موجود بین هر

دو افت موضعی ۱۰۰۰ برابر قطر لوله باشد، می‌توان از تلفات موضعی صرف‌نظر کرد.

## تست‌های فصل پنجم: محاسبه افت در لوله‌ها

۱. شرح نادرست را تعیین کنید: افت‌های جزئی.....

(۱) هنگامی که ۵٪ یا کمتر باشند از افت اصطکاکی لوله صرف‌نظر می‌شود.

(۲) عبارتند از افت‌هایی که در اتصالات لوله به‌وجود می‌آیند.

(۳) معمولاً کمتر از افت اصطکاکی لوله می‌باشند.

(۴) می‌توانند برحسب طول معادل یک لوله مستقیم بیان شوند.

۲. هنگامی که جریانی از مخزن بزرگ به داخل لوله‌ای به‌وجود می‌آید، افت انرژی

هنگامی ماکزیمم خواهد بود که:

(۱) ورودی این لوله از نوع کاملاً گرد باشد.

(۲) ورودی این لوله از نوع لبه تیز باشد.

(۳) ورودی این لوله از نوع پیش آمده باشد.

(۴) ورودی این لوله از نوع قائمه باشد.

۳. افت هد ایجاد شده مربوط به انبساط ناگهانی لوله از مساحت  $A_1$  به مساحت  $A_2$  و

سرعت از  $V_1$  به  $V_2$  تعیین می‌شود بوسیله:

$$(1) \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g} \quad (2) \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_2^2}{2g}$$

$$(3) \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (4) \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g}$$

۴. آب به میزان  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  از داخل لوله‌ای به قطر ۲۰ سانتی متر عبور می‌کند. اگر قطر

لوله به‌طور ناگهانی به ۳۰ سانتی متر افزایش یابد، میزان افت بار ( $head\ loss$ ) در

این انبساط چند متر آب است؟

$$\left(g = 9.8 \text{ m/s}^2 \text{ و } \pi = 3.14\right)$$

$$(2) 299/63$$

$$(1) 399/28$$

$$(4) 89/50$$

$$(3) 199/64$$

۵. طول معادل افت‌های موضعی در لوله‌ها عبارت است از:

وقتی که  $D$  قطر لوله معادل،  $f$  ضریب اصطکاک لوله در رابطه داری و  $K$  ضریب افت موضعی می باشد.

$$\begin{array}{ll} \frac{Kf}{D} & (۱) \\ \frac{KD}{f} & (۲) \\ \frac{D}{Kf} & (۳) \\ \frac{f}{KD} & (۴) \end{array}$$

۶. طول معادل یک شیر توپی ( $k=10$ ) در یک خط لوله  $f=0.025$  چند برابر قطر لوله است؟

$$\begin{array}{ll} ۱۰۰ & (۱) \\ ۲۰۰ & (۲) \\ ۴۰۰ & (۳) \\ ۸۰۰ & (۴) \end{array}$$

۷. در یک زانویی که روی صفحه افقی قرار دارد سطح مقطع ورودی دو برابر سطح مقطع خروجی است و اختلاف فشار ورودی و خروجی برابر  $0.375\rho$  کیلو پاسکال است که در آن  $\rho$  دانسیته آب می باشد سرعت ورودی و خروجی در صورتی که جریان بدون اصطکاک باشد به ترتیب با کدام گزینه برابر است؟

$$\begin{array}{ll} ۱ و ۲ & (۱) \\ ۰.۵ و ۰.۲۵ & (۲) \\ ۰.۵ و ۰.۷۵ & (۴) \\ ۱ و ۰.۵ & (۳) \end{array}$$

۸. مجموع طول معادل از یک لوله به قطر  $0.5m$  و ضریب اصطکاک  $f=0.02$  برای یک زانو ( $k=0.9$ ) یک شیر توپی ( $k=10$ ) و یک شیر دروازه ای ( $k=0.7$ ) برابر چند متر است؟

$$\begin{array}{ll} ۷۲/۵ & (۱) \\ ۱۳۰ & (۲) \\ ۱۴۵ & (۳) \\ ۲۹۰ & (۴) \end{array}$$

۹. در یک جریان تحت فشار چنان چه مقطع جریان تنگ بشود و به آرامی به مقطع اولیه خود برگردد.....

- (۱) تغییر جزیی در مقدار سرعت جریان به وجود خواهد آمد.
- (۲) در مقطع فشردگی فشار کاهش و سرعت افزایش می یابد.
- (۳) خط شیب هیدرولیکی به خط انرژی نزدیک می شود.
- (۴) فشار آب در مقطع تنگ شده زیادتیر خواهد شد.

۱۰. کدامیک از تعاریف زیر درست است؟

- (۱) افت انرژی رابطه مستقیم با طول لوله دارد.
  - (۲) افت انرژی رابطه مستقیم با قطر لوله دارد.
  - (۳) افت انرژی رابطه مستقیم با سرعت دارد.
  - (۴) افت انرژی رابطه مستقیم با فشار دارد.
۱۱. در کدامیک از حالات زیر افت کمتری در رابطه با جریان سیال در یک شبکه خواهیم داشت؟
- (۱) گشاد شدن ناگهانی و یا تدریجی لوله
  - (۲) تنگ شدن ناگهانی یا تدریجی لوله
  - (۳) عبور جریان سیال از یک لوله مستقیم
  - (۴) عبور جریان سیال از شیر فلکه یا زانویی
۱۲. افت‌های موضعی در شیرها و اتصالات به چه عواملی بستگی دارد؟
- (۱) فقط به سرعت
  - (۲) به سرعت و شتاب ثقل
  - (۳) به سرعت، شتاب ثقل و عدد رینولدز
  - (۴) به سرعت، شتاب و ضریب  $K$  مربوط به آن اتصال
۱۳. افت فشار در ونتوری مترها عبارت است از:
- (۱) افت فشار تابع اختلاف فشار نیست
  - (۲) افت فشار همان اختلاف فشار است
  - (۳) درصدی ثابتی از فشار ورودی
  - (۴) درصدی از اختلاف فشار است
۱۴. سه لوله با قطرهای  $d = 100\text{ mm}$ ,  $d = 200\text{ mm}$ ,  $d = 300\text{ mm}$  به‌طور موازی قرار دارند. افت فشار در کدام لوله بیشتر است؟
- (۱) لوله با قطر  $100\text{ mm}$
  - (۲) لوله با قطر  $200\text{ mm}$
  - (۳) لوله با قطر  $300\text{ mm}$
  - (۴) افت فشار در هر ۳ لوله برابر است.
۱۵. در سیستم لوله‌های سری:
- (۱) افت واحد طول در همه لوله‌ها یکسان است.
  - (۲) دبی جریان در همه لوله‌ها برابر است.
  - (۳) تلفات کلیه لوله‌ها با هم برابر است.
  - (۴) دبی کل برابر است با مجموع دبی لوله‌ها.