

آزمایش افت در سیستم لوله‌کشی

تهیه و تنظیم: امیر حسین ربیعی

هدف آزمایش

هدف این آزمایش آشنایی با میزان افت انرژی جریان سیال در طول لوله و اتصالات معمول مورد استفاده در سیستم های لوله کشی مانند سهرامی، زانویی، انواع شیرآلات، انقباض، انبساط، تاثیر پارامترهای هندسی بر میزان افت انرژی این اتصالات و آشنایی با روش های معروف محاسبه افت انرژی در طول اتصالات است.

مقدمه

تقریباً تمام افت انرژی ناشی از جریان سیال در سیستم لوله‌کشی را می‌توان تحت دو عنوان طبقه‌بندی کرد، افت عمده¹ و افت جزئی². افت عمده شامل افت انرژی اصطکاکی ناشی از لزجت سیال و زبری دیواره لوله می‌شود. در حالی که افت جزئی نامی است که بر مجموع افت انرژی سیال حین ورود به سیستم لوله‌کشی و یا خروج از آن، گذر از اتصالات، تغییر جهت جریان و تغییر سطح مقطع آن نهاده شده است. البته این "افت جزئی" ممکن است چندان هم جزئی نباشد، به عنوان مثال کاملاً محتمل است که یک شیر نیمه بسته افت فشار بیشتری از یک لوله‌ی بلند ایجاد کند.

از آنجایی که الگوی جریان در شیرها و اتصالات نسبتاً پیچیده است، تئوری توسعه داده شده برای آنها، دقت کمی برای پیش‌بینی افت فشار دارد، به همین علت معمولاً افت فشار در اتصالات به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و با استفاده از پارامترهای تجربی به شرایط جریان ارتباط داده می‌شود. از طرفی پیچیدگی سیستم‌های لوله‌کشی و تعداد زیاد شیرها و اتصالات، مهندسان را به استفاده از ضرایب تجربی به منظور دستیابی به محاسبات سریع، آسان و البته دقیق تشویق می‌کند. یکی از روش‌های متداول و پرکاربرد در این زمینه استفاده از ضریب افت K برای اتصال مورد نظر است که در واقع نسبت اختلاف هد فشار بین خروجی و ورودی اتصال به هد سرعت است.

کاربرد عملی

اصطلاح افت جزئی که در بسیاری از کتب مرجع برای افت انرژی در طول اتصالات استفاده می‌شود، ممکن است گمراه‌کننده باشد، زیرا این افت انرژی ممکن است بخش عمده افت انرژی کل در سیستم لوله‌کشی باشد، به خصوص در سیستمی که شامل تعداد زیادی اتصالات و شیرآلات است. این مسئله نشان می‌دهد که داشتن ضریب افت (K) دقیق برای همه‌ی اتصالات و شیرها، به جهت پیش‌بینی دقیق افت انرژی کل ضروری است. روش‌های متعددی برای محاسبه افت انرژی در طول اتصالات توسعه داده شده، که روش مذکور به علت مزایای متعدد، بیش از سایر روش‌ها مورد استقبال قرار گرفته است. از جمله‌ی این مزایا، سادگی بسیار در

¹ Major Loss

² Minor Loss

محاسبات است، که در بخش تئوری توضیح داده می‌شود. روش دیگری که گاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد روش طول معادل است که هم‌چنین در محاسبات بسیار ساده است ولی دقت کم‌تری نسبت به روش ضریب افت دارد.

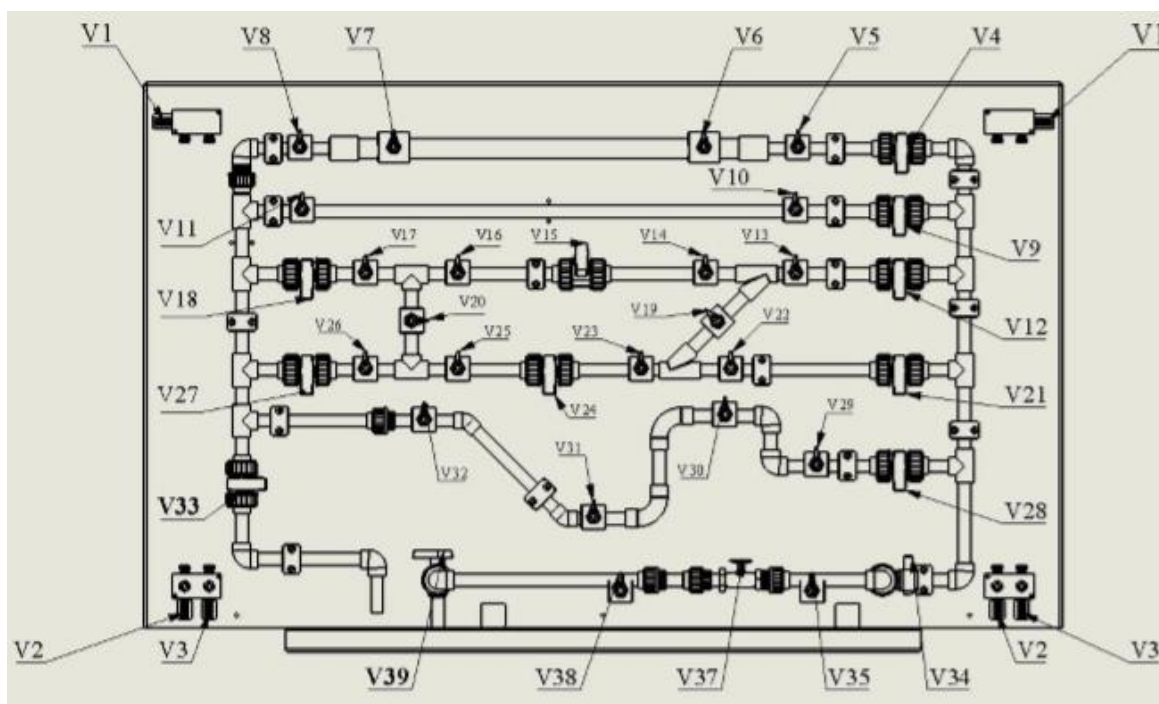
شناخته شدن هر اتصالی با یک ضریب افت مشخص، به مهندس طراح برای انتخاب مناسب‌ترین اتصال به منظور کمینه کردن افت انرژی در سیستم و بیشینه کردن دبی جریان سیال کمک شایانی می‌کند.

روش کلی

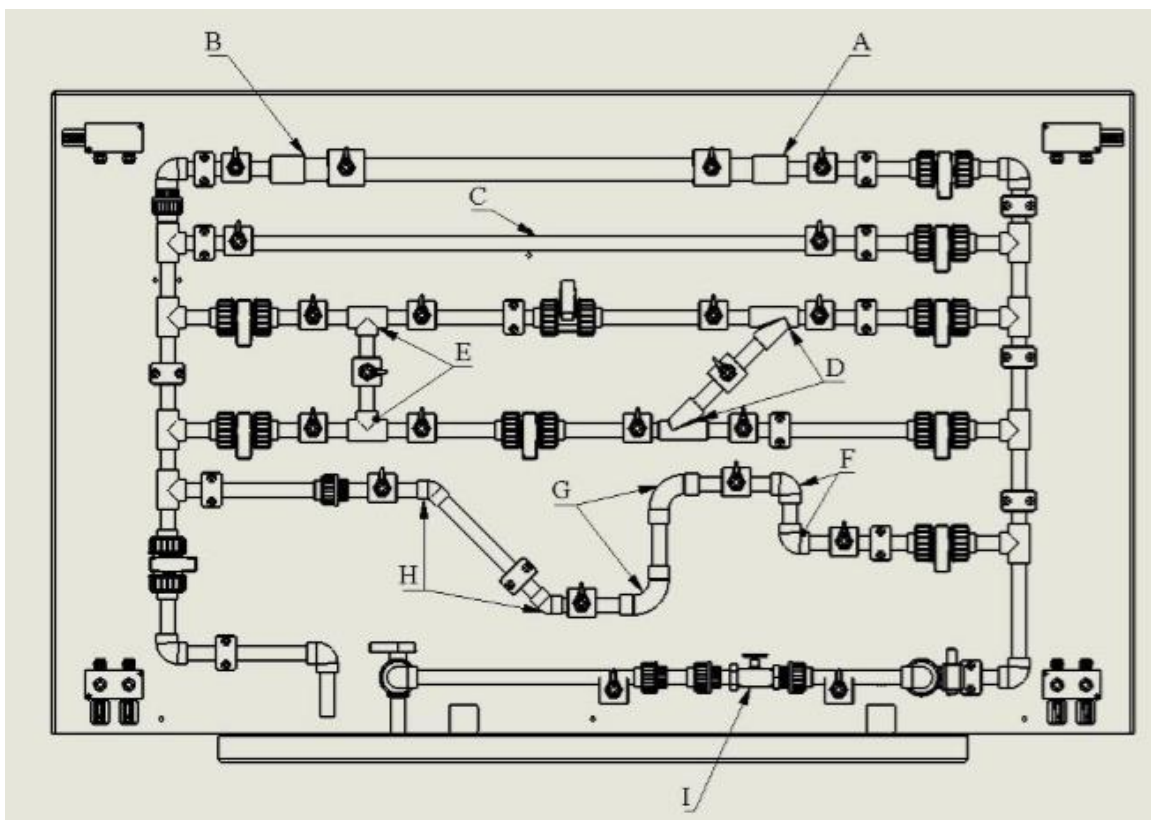
ایده‌ی کلی آزمایش، وصل کردن نقاط ابتدایی و انتهایی هر لوله و اتصال به یک مانومتر است، از این طریق افت فشار در طول تجهیز مربوطه اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه‌ی افت انرژی، ضریب اصطکاک و یا ضریب افت محاسبه می‌شود.

شرح دستگاه

دستگاه مورد آزمایش از شش مسیر عبور جریان تشکیل شده که هر یک برای منظور خاصی در نظر گرفته شده است. هر یک از مسیرها شامل لوله‌ها، زانویی، سه‌راهی، شیر و اتصالات مختلف برای بررسی افت فشارهای مختلف می‌باشد. دستگاه از لوله‌ها ۳۷۳۳۱ (زبری = PVC و اتصالات) ساخته شده است. در دو طرف دستگاه مانومترهایی برای اندازه‌گیری اختلاف فشار در نظر گرفته شده که توسط شلنگ به نقاط مختلف وصل می‌شوند. هر یک از شیرها با یک شماره مشخص شده‌اند و در آزمایش‌های مختلف به آن‌ها اشاره خواهد شد.



تصویر شماره ۱. راهنمای شیرهای دستگاه



تصویر ۲. راهنمای اتصالات دستگاه

جدول شماره ۱. راهنمای اتصالات دستگاه

انبساط ناگهانی از قطر ۱۶,۵ به ۲۶,۵ میلی‌متر	A
انقباض ناگهانی از قطر ۲۶,۵ به ۱۶,۵ میلی‌متر	B
لوله مستقیم به قطر ۱۶,۵ و طول ۸۰۰ میلی‌متر	C
سه راهی ۴۵ درجه	D
سه راهی استاندارد ۹۰ درجه	E
زانویی ۹۰ درجه استاندارد ($r=d$)	F
زانویی ۹۰ درجه ($r=2d$)	G
زانویی ۴۵ درجه استاندارد	H
شیر پی وی سی (angle seat valve) یا شیر برنجی (gate valve)	I

تئوری

افت جزئی معمولاً به صورت نسبتی از افت هد (h_m) در طول تجهیز به هد سرعت سیستم لوله کشی مربوطه بیان می‌شود.

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

K ضریب افت نامیده می‌شود. اگرچه ضریب افت یک پارامتر بی بُعد است، ولی متأسفانه روابط آن با عدد رینولدز و زبری دیواره لوله در کتاب‌ها و مقالات پیدا نمی‌شود و معمولاً خیلی ساده به صورت تابعی از سائز لوله بیان می‌شود. معمولاً داده‌های ضریب افت برای شرایط جریان مختلط بیان می‌شوند به همین خاطر در اعداد رینولدز پایین دقت کمی دارند. یک سیستم لوله‌کشی ممکن است اتصالات زیادی داشته باشد، از آنجایی که افت هد در همه‌ی آن‌ها بر اساس هد سرعت قابل بیان است، می‌توان همه‌ی آن‌ها را در قالب یک عبارت بیان کرد.

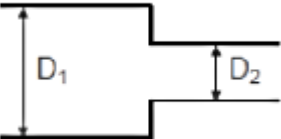
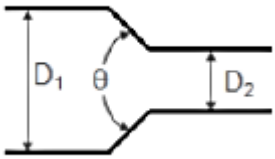
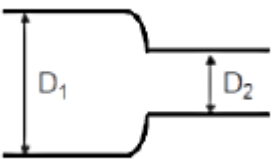
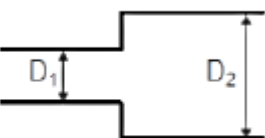
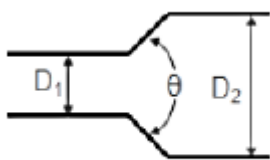
$$\Delta h_{tot} = h_f + \sum h_m = \frac{V^2}{2g} \left(\frac{fL}{d} + \sum K \right)$$

لازم به ذکر است که این عبارت تنها زمانی صحیح است که قطر لوله همه جا یکسان باشد. جدول ۲ حاوی مقادیر ضریب افت برای قطرهای مختلف انواع اتصالات از جمله شیر، زانویی و سهراهی است. در جدول ۳ فرمول‌های ضریب افت برای حالت‌های مختلف انقباض و انبساط در لوله آمده است. و جدول شماره ۴ فرمول‌های ضریب افت برای انواع ارفیس‌ها را شامل می‌شود.

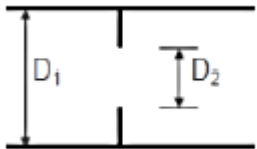
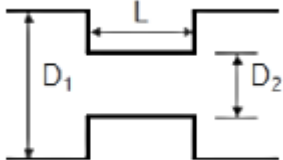
جدول ۲ مقادیر ضریب افت برای شیرهای کاملاً باز، زانویی و سهراهی [1]

قطر اسمی (اینچ)									
نوع اتصال	پیچی				فلنجی				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
شیر (کاملاً باز)									
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
زانویی									
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
سهراهی									
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

جدول ۳. روابط ضریب افت برای حالت‌های مختلف تغییر قطر لوله

انقباض ناگهانی	$Re_1 < 2500$	$Re_1 > 2500$
	$K_{SR} = \left(1.2 + \frac{160}{Re_1}\right) \left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1\right]$	$K_{SR} = (0.6 + 0.48f_1) \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 - 1\right]$
انقباض مخروطی	$\theta < 45^\circ$	$45^\circ < \theta < 180^\circ$
	$1.6 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) K_{SR}$	$\sqrt{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} K_{SR}$
انقباض لوله گرد		
	$\left(0.1 + \frac{50}{Re_1}\right) \left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1\right]$	
انبساط ناگهانی	$Re_1 < 4000$	$Re_1 > 4000$
	$K_{SE} = 2 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4\right]$	$K_{SE} = (1 + 0.8f_1) \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]^2$
انبساط مخروطی	$\theta < 45^\circ$	$45^\circ < \theta < 180^\circ$
	$2.6 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) K_{SE}$	K_{SE}

جدول ۴. روابط ضریب افت برای انواع اریفیس

اریفیس تیز نازک	$Re_1 < 2500$
	$K_{TSO} = \left[2.72 + \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{120}{Re_1} - 1 \right) \right] \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right]$
	$Re_1 > 2500$
	$K_{TSO} = \left[2.72 + \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{4000}{Re_1} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right]$
اریفیس ضخیم	$\frac{L}{D_2} > 5$
	$K_{SE} + K_{SR}$
	$\frac{L}{D_2} < 5$
	$K_{TSO} \left[0.584 + \left(\frac{0.0936}{(L/D_2)^{1.5} + 0.225} \right) \right]$

راه دیگر بیان افت انرژی در طول اتصالات استفاده از روش طول معادل است. در این روش اتصال به صورت طولی از لوله توصیف می‌شود.

$$h_m = f \frac{L_{eq}}{d} \frac{V^2}{2g} = K \frac{V^2}{2g}$$

$$L_{eq} = \frac{Kd}{f}$$

دقیق‌ترین راه استفاده از این روش، زمانی است که جدول داده‌ها برای اتصالی که در آن افت فشار مجهول است، برای همان سایز، زبری و عدد رینولدز موجود باشد. هنگامی که یک یا چند پارامتر یا جدول داده‌های در دسترس تفاوت داشته باشد، خطاهایی در محاسبات به وجود می‌آیند. مزیت روش طول معادل سادگی در محاسباتش است. کل طول‌های لوله‌ها و اتصالات، می‌توانند جمع شوند تا یک طول کلی به دست آیند و افت فشار به کمک این طول محاسبه شود.

$$h_L = f \left(\frac{L}{D} + \sum \frac{L_e}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

جدول ۵ حاوی مقادیر طول معادل برای انواعی از اتصالات است.

جدول ۵. طول معادل برای انواعی از اتصالات

نام اتصال	نوع اتصال	L_e/D
زانویی ۹۰ درجه	پیچی-شعاع استاندارد (R/D=1)	30
	پیچی-شعاع بزرگ (R/D=1.5)	16
زانویی ۴۵ درجه	پیچی-شعاع استاندارد (R/D=1)	16
سه‌راهی	پیچی-مسیر مستقیم	20
	پیچی-مسیر انشعاب	60
شیر	استاندارد-Globe	340
	استاندارد-Gate	8
	زاویه ای ۹۰ درجه	150
	زاویه ای ۴۵ درجه	55

روش انجام آزمایش

برای شروع کار با دستگاه ابتدا آن را روی دستگاه میز هیدرولیک قرار می‌دهیم و اتصالات مربوطه و شلنگ ورودی را وصل می‌کنیم. شیر فلکه زیر میز هیدرولیک را تا انتها باز می‌کنیم و دبی دستگاه را با شیرهای V33 و V39 کنترل می‌کنیم. (چگونگی آن در ادامه بیان خواهد شد). برای اندازه‌گیری دبی آب خروجی از دستگاه، می‌توان از یک کرنومتر و خواندن اعداد روی آبنما کمک گرفت. برای این کار ابتدا شیر فلکه خروجی بزرگ زیر دستگاه را می‌بندیم و شیر ورودی را از مسیر مورد نظر باز می‌کنیم. (به طور مثال شیر V4 کاملاً باز و شیر V33 نیمه باز) اجازه می‌دهیم مخزن تا حدی مشخص پر شود. (ترجیحاً ۱۴ لیتر) سپس با کمک کرنومتر و روشن کردن دستگاه روند اضافه شدن ۱۰ لیتر به میزان قبلی را مشاهده می‌کنیم و به محض رسیدن به عدد ۱۰، کرنومتر را متوقف می‌کنیم تا بازه زمانی مشخص شود. حال با تقسیم عدد ۱۰ بر بازه زمانی، دبی طبق رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود.

$$Q = \frac{V}{t}$$

روش وصل کردن مانومتر:

- برای وصل کردن و استفاده از مانومتر ابتدا با توجه به نزدیک بودن به اتصال مورد نظر، مانومتر چپ یا راست را انتخاب می‌کنیم.
- در ابتدا اطمینان حاصل می‌کنیم که آب داخل مانومتر کاملاً تخلیه شده باشد. برای این منظور همه‌ی شیرهای V1، V2 و V3 را باز می‌کنیم و پس از تخلیه کامل، شیر V1 را می‌بندیم و در طول آزمایش آن را باز نمی‌کنیم.
- اتصالات مربوطه (اتصال بالای شیرهای V2 و V3) را به دو طرف محل مورد نظر وصل می‌کنیم.

- بعد از روشن کردن دستگاه و اطمینان از اینکه آب در مسیر مورد نظر جریان دارد، شیر مرتبط با V2 را همزمان با V2 باز می‌کنیم و بعد از تخلیه هوای داخل شلنگ، همزمان می‌بندیم. باید توجه کنیم که حبایی درون شلنگ و ستون مانومتر باقی نماند.
- شیر مرتبط با V3 را همزمان با V3 باز می‌کنیم و مانند مرحله قبل همزمان می‌بندیم. تا در ستون مربوطه آب بایستد.
- حال مانومتر آماده استفاده شده و کافی است دو شیر مرتبط با V2 و V3 را به صورت همزمان باز و اختلاف سطح را یادداشت کنیم.

۱. اندازه‌گیری و مقایسه افت فشار در انبساط و انقباض:

الف) انبساط: ابتدا تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم و فقط شیر V4 را کاملاً باز و شیر V33 را نیمه باز نگه می‌داریم. دستگاه را روشن می‌کنیم. دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V5 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V6 را به شاخه‌ی دیگر مانومتر وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر، شیرهای V5 و V6 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V33 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

ب) انقباض: ابتدا تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم و فقط شیر V4 را کاملاً باز و شیر V33 را در حالت نیمه باز قرار می‌دهیم. دستگاه را روشن می‌کنیم. به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V7 را شاخه‌ای از مانومتر و شیر V8 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیر V7 و V8 را همزمان باز می‌کنیم. و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V33 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

۲. اندازه‌گیری و مقایسه افت فشار در سهرای 45 درجه و ۹۰ درجه

الف) سهرای ۴۵ درجه: ابتدا تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم و فقط شیرهای V12، V24 و V27 را کاملاً باز و شیر V33 را نیمه باز می‌کنیم. دستگاه را روشن می‌کنیم. به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V13 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V23 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیر V13 و V23 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V33 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

ب) سهرای ۹۰ درجه: ابتدا تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم فقط شیرهای V12، V15 و V27 را کاملاً باز و شیر V33 را نیمه باز می‌کنیم. دستگاه را روشن می‌کنیم. به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V16 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V26 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیر V16 و V26 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر

روی خط کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V33 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

۳. اندازه‌گیری و مقایسه افت فشار در زانویی ۹۰ درجه با نسبت شعاع انحنا به قطر ۲:

الف) زانویی ۹۰ درجه استاندارد ($r/d=1$): ابتدا تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم و فقط شیر V28 را کاملاً باز و شیر V33 را نیمه باز نگه می‌داریم. دستگاه را روشن می‌کنیم. به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V29 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V30 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیرهای V29 و V30 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V33 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

ب) زانویی با نسبت شعاع به قطر ۲ ($r/d=2$): ابتدا تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم و فقط شیر V28 را کاملاً باز و شیر V33 را نیمه باز نگه می‌داریم. دستگاه را روشن می‌کنیم. به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V30 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V31 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیرهای V30 و V31 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V33 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

۴. اندازه‌گیری و مقایسه افت فشار در شیر فلکه برنجی و زاویه‌ای ۴۵ درجه:

پیش از انجام این آزمایش بایستی شیر مورد نظر را بر روی دستگاه، به کمک باز کردن دستی مهره‌ها و جایگزین نمودن و مجدداً بستن مهره‌ها به صورت دستی، نصب کرد.

الف) شیر فلکه برنجی: در ابتدا باید شیر برنجی را در محل مربوطه بر روی دستگاه نصب نماییم. تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم. فقط شیرهای V34 و V37 را کاملاً باز و شیر V39 را نیمه باز نگه می‌داریم. دستگاه را روشن می‌کنیم و به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V35 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V38 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیرهای V29 و V30 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V39 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

ب) شیر زاویه‌ای: در ابتدا باید شیر زاویه‌ای را در محل مربوطه بر روی دستگاه نصب نماییم. تمام شیرهای دستگاه را می‌بندیم. فقط شیرهای V34 را کاملاً باز و شیر V36 را روی درجه ۲ (کاملاً باز) و شیر V39 را نیمه باز می‌کنیم. دستگاه را روشن می‌کنیم. به روش گفته شده دبی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. مانومتر را طبق دستور آماده می‌کنیم. شیر V35 را به شاخه‌ای از مانومتر و شیر V38 را به شاخه‌ی دیگر آن وصل می‌کنیم. بعد از آماده کردن مانومتر شیرهای V29 و V30 را همزمان باز می‌کنیم و به محض ایجاد اختلاف فشار شیرها را می‌بندیم و اعداد متناظر روی خط‌کش‌ها را

یادداشت می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را حساب می‌کنیم. با تغییر وضعیت شیر V39 در چهار دبی مختلف آزمایش را تکرار کنید.

خواسته‌های آزمایش:

۱. به کمک جدول زیر ویسکوزیته‌ی آب را در دمای متوسط آزمایش تعیین نمایید. مقدار عدد رینولدز و سپس ضریب اصطکاک را برای هر مرحله بدست آورید. سپس جداول را تکمیل نمایید.

$T (^{\circ}\text{C})$	$\nu \left(\frac{10^{-6} \text{m}^2}{\text{s}} \right)$
15	1.134
16	1.106
17	1.079
18	1.055
19	1.028
20	1.004
21	0.980
22	0.957
23	0.935
24	0.914
25	0.894
26	0.875
27	0.856

۲. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز را با توجه به محاسبات سوال قبلی رسم کنید. با مقایسه‌ی نمودار ترسیمی با دیاگرام مودی زبری نسبی لوله‌ی مستقیم را محاسبه کنید.

۳. افت انرژی جزیی انبساط و انقباض ناگهانی لوله را برحسب انرژی جنبشی سیال جاری رسم نموده و به کمک این دو نمودار مقدار ضریب افت K_f را برای هر کدام بدست آورید.

۴. به کمک جدول داده‌ها و روابط مربوطه، تغییرات ضریب مقاومت K را برحسب نسبت سرعت به سرعت حداکثر $\frac{V}{V_{max}}$ رسم نمایید.

۵. آیا افت انرژی در انقباض ناگهانی همیشه از افت انرژی در انبساط ناگهانی بزرگتر است؟

۶. طول معادل را برای زانویی‌ها و نیز شیر برنجی کشویی بر حسب میلی‌متر محاسبه کنید.

۷. مقدار ضریب افت سه‌راهی را برای دو حالت مسیر مستقیم و مسیر انشعاب بدست آورید و با مقادیر داده شده در دستور کار مقایسه کنید. از اختلاف بین دو مقدار مربوط به مستقیم و انشعاب چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

منابع

1. White, F. M. (1979). *Fluid mechanics*. Tata McGraw-Hill Education.
2. McCabe, Warren L., Julian C. Smith, and Peter Harriott. *Unit operation of chemical engineering*. McGraw-Hill, 2018.
۳. دستور کار آزمایش بررسی افت فشار در سیستم لوله کشی، شرکت پژواک پژوه صنعت، www.ppsedu.com