

افت فشار در لوله ها

تهیه و تنظیم: امیر حسین ربیعی

هدف آزمایش

آشنایی با مفهوم افت انرژی اصطکاکی در لوله تحت رژیم های جریان مختلف

مقدمه

افت انرژی در یک سیستم لوله کشی را می توان به دو قسمت افت عمده و افت جزیی تقسیم کرد. افت عمده در واقع اتلاف انرژی اصطکاکی در اثر لزجت سیال و زبری سطح لوله است. و افت جزیی در واقع مجموعه افت انرژی در شیرها و اتصالات است. افت عمده موجب ایجاد اختلاف فشار در طول لوله می شود چون این اختلاف فشار برای غلبه کردن بر اصطکاک نیاز است. رابطه ی داری- وایزباخ عمومی ترین و معتبرترین رابطه برای محاسبه ی افت فشار در طول لوله است. در این رابطه از پارامتری به نام ضریب اصطکاک برای توصیف افت انرژی اصطکاکی در طول لوله استفاده می شود.

تئوری آزمایش

افت انرژی در یک لوله را می توان با اعمال معادله ی انرژی در قسمتی از لوله بدست آورد.

$$\frac{P_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} + Z_{in} = \frac{P_{out}}{\rho g} + \frac{v_{out}^2}{2g} + Z_{out} + h_L \quad (1)$$

در صورتی که لوله افقی باشد و سطح مقطع آن ثابت باشد؛

$$h_L = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} \quad (2)$$

اختلاف فشار در دو نقطه از لوله وابسته به مقاومت اصطکاکی است و افت ارتفاع در طول لوله (h_L) وابسته به افت فشار است.

افت ارتفاع در طول لوله با استفاده از رابطه ی داری- وایزباخ قابل محاسبه است:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

که در این رابطه L طول لوله، D قطر آن، v سرعت متوسط سیال در لوله و f ضریب داری- وایزباخ (ضریب اصطکاک) است. اگر در لوله جریان آرام برقرار باشد، برای افت فشار می توان از رابطه ی معروف هاگن- پوازی استفاده نمود.

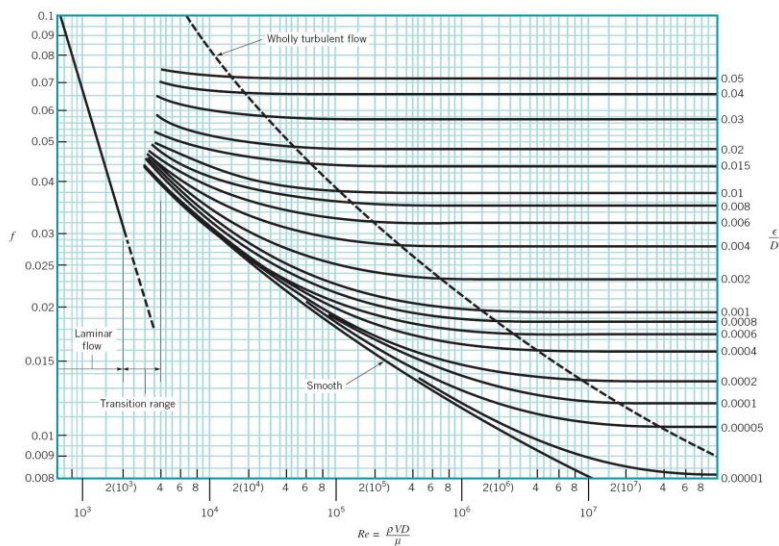
¹ Darcy-Weisbach

$$\Delta p = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} \quad (4)$$

که در این رابطه μ ویسکوزیته سیال، Q دبی سیال عبوری و R شعاع لوله است. از مقایسه رابطه های ۳ و ۴ در می یابیم که ضریب اصطکاک در جریان آرام تنها تابعی از عدد رینولدز بوده و مستقل از زبری سطح لوله می باشد.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

برای جریان آشفته ضریب اصطکاک علاوه بر عدد رینولدز تابع زبری سطح لوله نیز می باشد. پارامترهای دیگری مانند فاصله و شکل زبری نیز ممکن است بر ضریب اصطکاک موثر باشند هر چند رابطه ی اخیر هنوز به درستی درک نشده و در بسیاری از موارد نادیده گرفته می شود. دیاگرام مودی^۲ ضریب اصطکاک را بعنوان تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی سطح (ϵ/D) بدست می دهد.



شکل ۱. دیاگرام مودی

ضریب اصطکاک علاوه بر دیاگرام مودی از طریق روابط تجربی نیز قابل محاسبه است. برای جریان آشفته داخل یک لوله کاملاً صاف و بدون زبری، معمولاً از معادله ی معروف بلازیوس^۳ استفاده می شود.

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (6)$$

همچنین رابطه ی کلبروک^۴ برای جریان آشفته و لوله هایی با زبری های متفاوت قابل استفاده است.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\epsilon}{D} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

² Moody Diagram

³ Blasius

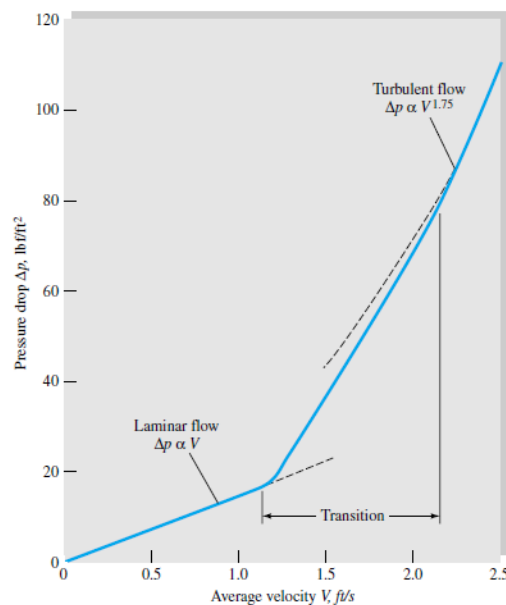
⁴ Colebrook

به منظور بی بعد سازی افت انرژی اصطکاکی در لوله از پارامتری به نام گرادیان هیدرولیکی استفاده می شود که در واقع نسبت افت ارتفاع مانومتری به طول لوله است.

$$i = \frac{h}{L} \quad (8)$$

بررسی جریان سیال داخل لوله نشان می دهد که افت فشار در جریان آرام متناسب با توان اول سرعت متوسط و در جریان آشفته متناسب با سرعت به توان عددی بین ۱٫۷ تا ۲ می باشد.

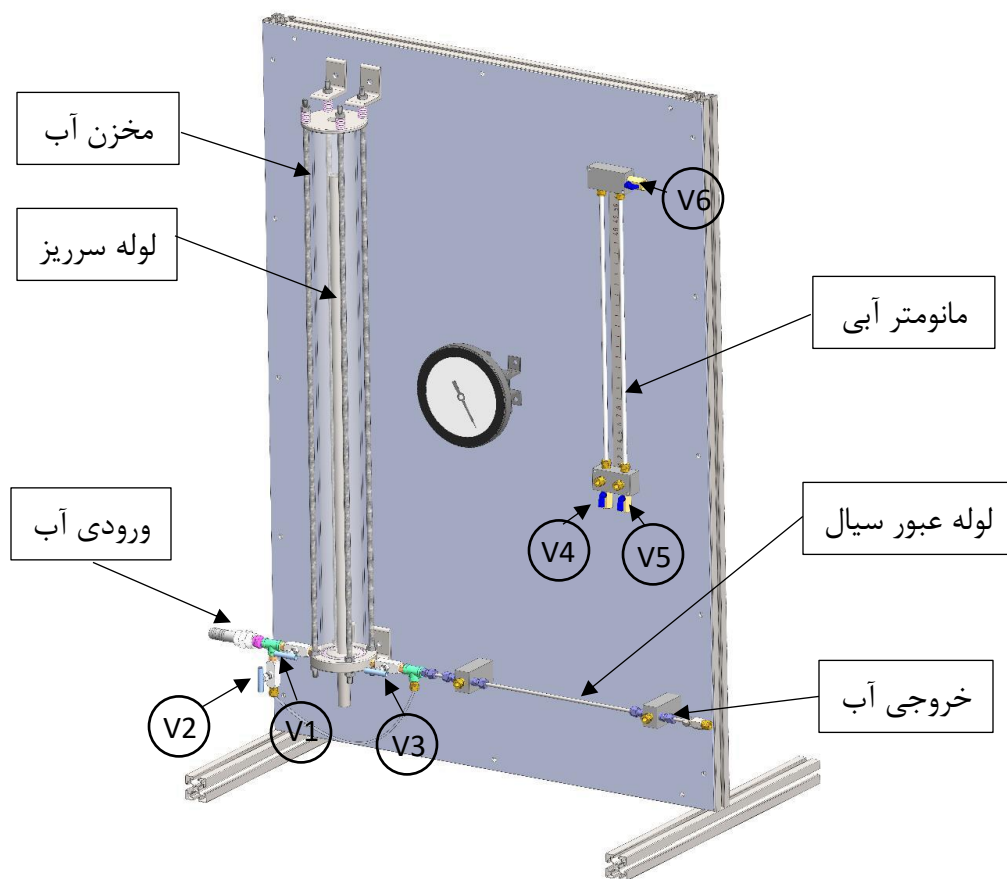
$$i = ku^n \quad (9)$$



شکل ۲. رابطه ی کلی افت فشار و سرعت در لوله

شرح دستگاه

دستگاه افت اصطکاک در لوله به منظور تعیین ضریب اصطکاک در یک لوله مشخص در دو رژیم جریانی آرام و آشفته طراحی شده است. طول لوله استفاده شده در این دستگاه ۴۰۰ میلی متر و قطر داخلی و خارجی آن به ترتیب ۳ و ۶ میلی متر است. آب به وسیله ی یک پمپ به دستگاه وارد می شود. دستگاه از یک مخزن با لوله سرریز تشکیل شده است که آب در این مخزن در ارتفاع ثابت قرار دارد و برای برقراری جریان آرام از آب موجود در این مخزن استفاده می شود. جهت برقراری جریان آشفته یک مسیر جدا در نظر گرفته شده است که با بستن شیر ورودی به مخزن V2 آب از مسیر تعبیه شده عبور می کند و مستقیماً از پمپ وارد لوله می شود. با استفاده از شیرهای تنظیم جریان (V2 برای تنظیم دبی جریان آشفته و V3 برای تنظیم دبی جریان آرام) می توان دبی آب عبوری از لوله را تغییر داد. دبی جریان سیال به وسیله بشر و کرنومتر اندازه گیری می شود. افت فشار در لوله با استفاده از مانومتر آبی و گیج اختلاف فشار اندازه گیری می شود. از مانومتر آبی برای اندازه گیری افت فشار در جریان آرام و از گیج اختلاف فشار برای اندازه گیری افت فشار در جریان آشفته استفاده می شود.



شکل ۳. دستگاه اندازه گیری افت اصطکاکی در لوله

روش هواگیری مانومتر:

ابتدا شلنگ های خارج شده از ورودی و خروجی لوله آزمایش (شلنگ های شفاف متصل به بلوک سفید رنگ در ورودی و خروجی لوله آزمون) را به وسیله اتصالات پنوماتیکی به مانومتر آبی متصل کنید. سپس پمپ را روشن کنید تا آب وارد سیستم شود. خروجی اصلی آب را با دست نگه داشته و شیرهای V4، V5 و V6 را در حالت باز قرار دهید. تا زمانی که هوا از شلنگ های متصل به مانومتر آبی کاملاً خارج شود و حبابی در این شلنگ ها باقی نماند، این کار را ادامه دهید. اگر دبی کم بود، مسیر خروجی آب را مسدود کنید یا دبی را توسط شیر میز هیدرولیک افزایش دهید تا هوای شلنگ های واسط خالی شوند. پس از اطمینان از خالی شدن هوای شلنگ های واسط، شیرهای V4 و V5 را بسته و شیر V6 را باز کنید و صبر کنید تا آب وارد لوله های مانومتر شود. اگر آب وارد لوله های مانومتر نشد، دبی را افزایش داده یا مسیر خروجی آب را مسدود کنید. این کار را تا زمانی که آب در لوله ها به ارتفاع ۳۰ تا ۴۰ سانتی متر برسد ادامه دهید، سپس مسیر خروج آب را رها کرده و شیر V6 را ببندید.

روش هواگیری گیج فشار:

شلنگ های خروجی از بلوک های ابتدایی و انتهایی لوله آزمایش را از گیج فشار جدا کنید.

مسیر خروجی آب را ببندید تا آب وارد شلنگ های شفاف شود. تا زمانی که هوای داخل شلنگ ها خالی شود، این کار را ادامه دهید. پس از خالی شدن هوا، شلنگ ها را به گیج اختلاف فشار متصل کنید.

توجه: شلنگ های شفاف که از ابتدای لوله آزمون خارج شده است را به ورودی سمت راست گیج اختلاف فشار و شلنگ شفاف که از انتهای لوله آزمون خارج شده است را به ورودی سمت چپ گیج اختلاف فشار متصل کنید.

روش انجام آزمایش

آزمایش ۱: افت فشار جریان آرام

۱. در ابتدا مطمئن شوید که مانومتر آبی در مدار اندازه گیری افت فشار باشد.
۲. شیر ورودی پمپ به دستگاه را در حالت باز قرار داده و سپس پمپ دستگاه را روشن کنید.
۳. شیر ورودی آب به مخزن را در حالت کاملاً باز قرار دهید.
۴. شیر مسیر جریان آشفته را ببندید.
۵. صبر کنید تا مخزن کاملاً پر شود و آب از لوله سرریز خارج شود.
۶. سپس شیر خروجی از مخزن را باز کنید تا آب وارد لوله مورد آزمایش شود. با تنظیم این شیر می توان دبی عبوری از لوله را تنظیم کرد.
۷. سپس طبق مراحل گفته شده در بخش هواگیری مانومترها، مانومتر آبی را هواگیری کنید.
۸. با تغییر شیر تنظیم دبی، آزمایش را در دبی های مختلف انجام داده، اختلاف ارتفاع را اندازه گیری کنید و داده ها را در جدول زیر یادداشت کنید.

	V(m lit)	t(s)	Q(m ³ /s)	Δh (mm)	Δp (pa)	u(m/s)	i	Re	f
۱									
۲									
۳									
۴									
۵									
۶									

آزمایش ۲: افت فشار در جریان آشفته

۱. ابتدا مطمئن شوید که گیج اختلاف فشار در مدار اندازه گیری افت فشار باشد.
۲. شیر ورودی آب به مخزن را بسته و شیر مسیر جریان آشفته را در حالت باز قرار دهید. با تنظیم این شیر می توان دبی آب عبوری از لوله را تنظیم کرد.
۳. طبق مراحل گفته شده در بخش هواگیری، گیج اختلاف فشار را هواگیری کنید.

۴. با تغییر شیر تنظیم دبی، آزمایش را در دبی های مختلف انجام داده، اختلاف فشار را در جدولی مانند جدول ۱ یادداشت کنید.

خواسته ها

۱. برای تمام داده های آزمایش عدد رینولدز و ضریب اصطکاک را محاسبه کنید.
۲. در یک نمودار تمام لگاریتمی مقادیر تئوری ضریب اصطکاک را همراه با مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش برحسب عدد رینولدز رسم کنید. مقادیر محاسبه شده از آزمایش را در سه دسته جداگانه برحسب رژیم جریانی (آرام، گذرا و آشفته) قرار دهید و مقادیر تئوری را به دو دسته (آرام و آشفته) تقسیم بندی کنید.
۳. در یک نمودار تمام لگاریتمی گرادیان هیدرولیکی را برحسب سرعت متوسط رسم کنید.
۴. داده های آزمایش را برحسب رژیم جریانی دسته بندی کنید. عدد رینولدز بحرانی در آزمایش شما چه عددی است؟
۵. ثوابت معادله ی ۹ را برای آزمایش خود محاسبه کنید.
۶. با استفاده از ضرایب اصطکاک محاسبه شده از آزمایش های که در محدوده ی جریان آشفته قرار دارند، زبری نسبی و مطلق لوله مورد استفاده را محاسبه کنید.
۷. با استفاده از داده های محدوده ی جریان آرام، با استفاده از رابطه ی هاگن-پوازی، مقدار ویسکوزیته ی آب را در شرایط آزمایش محاسبه کنید و با مقداری که در منابع برای ویسکوزیته ی آب در دمای آزمایشگاه ثبت شده است، مقایسه کنید.

مراجع

1. White, F. M. (1979). *Fluid mechanics*. Tata McGraw-Hill Education.
2. Ahmari, Habib, and Shah Md Imran Kabir. *Applied Fluid Mechanics Lab Manual*. Mavs Open Press, 2019.
۳. دستور کار آزمایش بررسی افت فشار در جریان آرام و آشفته، شرکت پژواک پژوه صنعت، www.ppsedu.com